
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA E BIODIVERSIDADE

**UMA NOVA PERSPECTIVA PARA ENTENDER A CONECTIVIDADE FUNCIONAL
INTEGRANDO PAISAGEM E FENOLOGIA**

Bruno Defane Borges

Dissertação/tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia .

Rio Claro
Estado de São Paulo
Janeiro de 2016

BRUNO DEFANE BORGES

**UMA NOVA PERSPECTIVA PARA ENTENDER A CONECTIVIDADE FUNCIONAL
INTEGRANDO PAISAGEM E FENOLOGIA**

Dissertação/tese apresentada ao
Instituto de Biociências do Câmpus de
Rio Claro, Universidade Estadual
Paulista, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em
Ecologia.

Orientadora: Prof. Dra. Leonor Patricia Cerdeira Morellato
Co-orientador: Prof. Dr. Milton Cezar Ribeiro

Rio Claro
2016

BRUNO DEFANE BORGES

**UMA NOVA PERSPECTIVA PARA ENTENDER A CONECTIVIDADE FUNCIONAL
INTEGRANDO PAISAGEM E FENOLOGIA**

Dissertação/tese apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ecologia.

Comissão examinadora:

Dra. Leonor Patricia Cerdeira Morellato
Dr. Thiago Sanna Freire Silva
Dr. Tomas Ferreira Domingues

Rio Claro
2016

142.7 Borges, Bruno Defane
B732c Combinando tecnologias novas para monitorar a fenologia
das folhas aos ecossistemas / Bruno Defane Borges. - Rio
Claro, 2016
50 f. : il., figs., gráfs., fots., mapas

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

1. Fenomenologia. 2. Campos rupestres. 3.
Heterogeneidade da paisagem. 4. Veículos aéreos não
tripulados. I. Título.

Agradecimentos

Aos meus pais, Henrique e Maria Eugênia, pela dedicação diária, partilha de vida, experiências e conhecimento, e pelo incentivo pleno para que eu seguisse aquilo que me fizesse feliz.

Ao meu irmão, Eric, pela amizade e parceria desde sempre.

A toda família que contribuiu, cada um à sua maneira, para a realização deste projeto.

Aos meus amigos e segunda família. A família Ecologia, que desde o começo se tornou parte inseparável na vida, com quem pude contar em todos os momentos, fossem nas alegrias ou nas angústias.

A todos os membros e agregados do Laboratório de Ecologia Espacial e Conservação – LEEC, que desde seu surgimento, sob liderança do grande mestre Miltinho, só fez agregar experiências de vida a cada um que nele entrasse. Obrigado pelas risadas e contribuições em minha vida!

A todos os membros e agregados do Laboratório de Fenologia, que de repente entraram em minha vida como grandes amigos e, em especial, um obrigado ao Leonardo, pela amizade e parceria no desenvolvimento de todas as fases deste trabalho, desde idas ao campo para pilotagem dos aviões e aquisição das fotografias até as incontáveis horas em laboratório tratando as imagens! Igual agradecimento à Bruna, que com toda a paciência do mundo, me ensinou bastante sobre a fenologia e as câmeras!

Obrigado ao professor Thiago Sanna que, com a parceria e experiência, contribuiu enormemente à realização deste trabalho.

Um agradecimento especial ao professor Miltinho, co-orientador deste estudo, pela paixão e paciência inesgotável em ensinar, pela amizade e companheirismo desde a época de graduação.

À professora Patricia Morellato, orientadora nesta caminhada, pela enorme paciência, interesse em ajudar e sempre presente em todos os momentos deste trabalho. Muito obrigado.

Ao professor Ricardo, da UNICAMP, e toda sua equipe, pela participação e apoio durante as fases complicadas de processamento dos dados. Em especial um agradecimento ao Jurandy, Eric, Héctor e Lucas, pela paciência e prontidão em ajudar nas fases de processamento das imagens da torre.

À FAPESP – Microsoft Research Institute, pelo financiamento desta dissertação (Projeto #2013/50155-0) e bolsa de mestrado (Processo #2014/07700-0) sem o qual o mesmo não seria possível, além do auxílio para a participação em um curso no exterior, que agregou enorme experiência pessoal e profissional.

Muito obrigado!!

Resumo

As observações das fases de vida das plantas, conhecida como fenologia, realizadas de formas tradicionais no solo não permitem o estudo em grandes áreas, são trabalhosas e consomem muito tempo dos observadores. Por outro lado, a fenologia feita por câmeras digitais - fenologia remota próxima a superfície - embora ainda limitada em espaço reduz consideravelmente o trabalho humano de coleta de dados. Adicionalmente, é comprovada a sua eficiência para monitorar de forma acurada a mudança foliar em muitas espécies. Este projeto teve como objetivo aplicar novas tecnologias para aumentar a capacidade de monitoramento de com imagens próximas à superfície (near remote phenology) e detectar mudanças em várias escalas, das folhas ao ecossistema. Nossa meta foi abordar problemas teóricos e práticos envolvendo a combinação de dois diferentes sistemas de monitoramento remoto: câmeras digitais em torres de fenologia e o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs). Esteve focada em dois objetivos inovadores: (a) aplicar essas tecnologias para extrair informações ecofisiológicas das plantas, avançando no entendimento das respostas sazonais aos fatores ambientais para um ecossistema peculiar de campos rupestres e (b) integrar as técnicas de extração dos canais de cores vermelho, verde e azul das plantas aos conceitos da Ecologia de Paisagem, a fim de se propor um método diferente aos estudos de conectividade.

Palavras-chave: Fenologia remota próxima, torres fenológicas, VANTs, campo rupestre.

Lista de figuras

Capítulo 1

Figura 1: As quatro fisionomias presentes na área de campos rupestres selecionadas para o presente estudo.

Figura 2: Precipitação diária (mm) para o período estudado (setembro 2013 a setembro 2014), na Serra do Cipó, MG, Brasil.

Figura 3: Amostra de imagem do campo rupestre (a) localizado no quadrante 16, Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil.

Figura 4: Proporções relativas de reflexão dos canais verde (G) e vermelho (R) baseadas no índice RGcc ao longo de um ano para cinco fitofisionomias encontradas nos campos rupestres, sendo elas o Campo arenoso, Campo úmido, Campo pedregoso e Afloramentos rochosos.

Figura 5: Descontinuidade entre os valores iniciais e finais observados nas curvas dos canais verdes para todas as tipologias, Apesar de representarem momentos similares do ano, setembro de 2013 e setembro de 2014.

Figura 6: Proporções de contribuição entre o canal verde das diferentes tipologias estudadas, comparadas em uma janela móvel de sete dias.

Figura 7: Valores do índice ExcessGreen para as fisionomias de campo rupestre na Serra do Cipó, MG, Brasil.

Capítulo 2

Figura 8: Fisionomias presentes na área de campos rupestres selecionadas para o presente estudo.

Figura 9: Plano de voo de uma área a ser fotografada pelo RPAS, Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil.

Figura 10: Paleta de cores atribuídas aos valores de contribuição do canal verde de cada pixel presente na imagem.

Figura 11: Proporção relativa do canal verde para as quatro fisionomias principais encontradas na área de campos rupestres, o campo arenoso, campo úmido, campo pedregoso e afloramento rochoso.

Figura 12: Variação da proporção de pixels em diferentes faixas de contribuição do canal verde para as quatro datas de imagens.

Figura 13: À esquerda imagens obtidas por meio do RPAS (Aeronave Remotamente pilotada), e à direita o processamento após a atribuição de cores aos pixels baseados em suas proporções de reflexão do canal verde.

Sumário	Página
Resumo	1
Lista de Figuras	2
Introdução Geral	4
Capítulo 1.	5
Introdução	5
1.4. Objetivos	9
2. Material e Métodos	9
3. Resultados	14
4. Discussão	19
5. Referências	21
Capítulo 2.	27
1. Introdução	27
1.4. Objetivo	32
2. Material e método	32
3. Resultados	36
4. Discussão	39
5. Referências	40
Conclusão Geral	47

Introdução Geral

O interesse em compreender os processos cíclicos presentes na vida da maioria dos organismos, como a migração ou então a produção de folhas, flores e frutos nos vegetais, cresce concomitantemente à busca do entendimento de como as diversas espécies vivas estão respondendo às variações que ocorrem no ambiente, seja por causas naturais ou provocadas pelo homem. As mudanças como, por exemplo, elevação da temperatura da superfície da Terra, nos regimes pluviométricos ou as mudanças da composição e uso do solo podem ocasionar alterações no tempo de duração das fases destes ciclos, ou mesmo na intensidade de sua expressão influenciando, dessa forma, os organismos que estejam a eles associados através de relações ecológicas (e.g. Reich 1995; Dalmolin et al., 2015), ou por uso dos recursos tais quais alimentação, abrigo ou reprodução.

As respostas da vegetação e o acompanhamento das fases fenológicas das plantas podem ser observados por meio de diferentes técnicas. As formas tradicionais através de saídas a campo e anotações sequenciais permitem que sejam notadas mudanças sutis na vegetação, apresentando alto potencial para análises robustas em diferentes escalas temporais. Além disso, por meio desta técnica é possível notar um grande número de interações entre as plantas e outros organismos, aumentando a complexidade da abordagem ecológica (Liang & Schwartz, 2009; Liang et al., 2011). Entretanto, esta técnica exige grande mão de obra uma vez que a área coberta pelos observadores se mostra limitada, exigindo igualmente maior tempo e despesas para observação de todos os indivíduos alvos.

Nas últimas décadas uma nova forma de acompanhamento fenológico vem se expandindo. A utilização de câmeras digitais programadas para fotografar de forma automática e sequencial transformou uma ferramenta simples em uma técnica revolucionária, capaz de obter informações da vegetação em escala temporal fina e a baixo custo, complementando a técnica tradicional em campo (Richardson et al., 2007, 2009). As “fenocâmeras”, como são conhecidos estes sistemas utilizados com propósito de investigar os eventos fenológicos, podem estar ainda conectadas a sensores meteorológicos, com o objetivo de relacionar os eventos climáticos às variações observadas nos indivíduos. Informações como temperatura, pluviometria, direção e intensidade do vento e luminosidade são de grande importância ao se investigar quais são os gatilhos que desencadeiam os eventos fenológicos, especialmente quando são analisadas séries temporais, em que é possível identificar com clareza o início e fim dos ciclos fenológicos.

Apesar de suas vantagens, as “fenocâmeras” apresentam restrições em relação à escala espacial de observação, limitando o entendimento das dinâmicas do ambiente na escala da paisagem. Para isso, outras tecnologias têm ganhado destaque. O crescente uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs, ou UAVs), associado às novas técnicas computacionais, proporcionou a observação de maiores áreas, possibilitando ainda a aquisição de novas informações graças ao desenvolvimento de diferentes sensores ópticos. Assim, a possibilidade de aquisição de imagens de acordo com a escala espacial e temporal adequadas, além da alta resolução das fotografias fez desta tecnologia uma nova forma de responder às questões ecológicas cada vez mais complexas.

Uso de câmeras digitais para detectar padrões sazonais em paisagens naturalmente heterogêneas: o caso dos campos rupestres.

1. Introdução

O desenvolvimento em paralelo entre as tecnologias de obtenção de imagens, como as câmeras digitais, associadas às novas ideias de como utilizá-las em prol da ciência, têm promovido a abertura de novas portas quando se pensa, entre outros, em entender os processos ecossistêmicos, sejam eles naturais ou consequências das ações humanas (Richardson et al., 2007; Richardson et al., 2009; Ahrends et al., 2008; Crimmins & Crimmins 2008; Morisette et al., 2009; Zhao et al., 2012; Alberton et al., 2014). A aplicação das câmeras digitais como técnica de se obter informações em alta resolução espacial e fina escala temporal, revolucionou, de forma simples, o modo como podem ser observados os ciclos de vida, ou fenologia, tanto animal como vegetal.

O acompanhamento das fases de vida de um organismo, em especial das plantas, tanto a curto como em longo prazo (décadas), é de extrema importância quando buscamos compreender sua história natural, assim como as possíveis relações entre as plantas e outros grupos a elas associados. Em ambientes naturalmente heterogêneos, como os campos rupestres, formando um mosaico natural com fitofisionomias peculiares (Giuliette et al., 1997; Rapini et al., 2008), os padrões de respostas da vegetação podem se mostrar igualmente complexos (Belo et al., 2013; Rocha et al., 2016), principalmente relacionados aos gatilhos ambientais que desencadeiam as fases fenológicas. Assim, o desenvolvimento de técnicas capazes de captar e interpretar de forma fina as variações sutis no ambiente se mostram cada vez mais relevantes, se mostrando como uma tendência para os estudos futuros.

1.1. Fenologia, *leafing* e conectividade da paisagem.

A fenologia é o campo das ciências naturais interessado no entendimento dos eventos recorrentes nos ciclos de vida, sejam eles animais ou vegetais, e sua relação com o clima dos ambientes a que estão associados (Morellato & Leitão-Filho 1996; Schwartz 2013). Quando tratamos da fenologia vegetal, estamos nos referindo a eventos como brotamento e senescência foliar, floração e frutificação, considerando que cada uma destas fases apresentará uma intensidade e duração de acordo com a espécie ou grupo que esteja sendo estudado, bem como de acordo com as características do ambiente e a época do ano (Gentry 1974; Silvério & Lenza 2010).

Dentro do estudo fenológico da vegetação, o acompanhamento do desenvolvimento foliar (processo compreendido desde o início do brotamento (*leaf-out*), até a queda foliar (*leaf fall*); para detalhes ver Rathcke & Lacey 1985 e Polgar & Primack 2011), também conhecido como mudança foliar (*leafing*, referente ao ciclo completo), é de importância estratégica para se entender como as espécies ou comunidades

respondem às variações no ambiente como, por exemplo, alteração na luminosidade e disponibilidade hídrica ao longo do ano (e.g. Reich 1995; Dalmolin et al., 2015). Além disso, o entendimento e acompanhamento das estações de crescimento das plantas e detecção de suas variações ao longo do tempo podem nos levar a inferências a respeito de possíveis alterações climáticas em níveis globais (Jeong et al. 2011).

Dentre as estruturas que constituem uma planta as folhas são, na maioria dos casos, facilmente visíveis, e em grande proporção quando comparadas às outras estruturas como flores e frutos. Adicionalmente, apresentam mudanças na coloração de acordo com sua fase fenológica (Polgar & Primack 2011), o que faz deste órgão vegetal um componente essencial dos estudos que buscam compreender variações nos padrões cíclicos da vegetação em escala temporal fina e sua relação com o clima. Essas características foliares têm sido utilizadas na definição das estações de crescimento e dinâmica das vegetações em diferentes escalas (Fischer et al., 2006; Xiao et al., 2006; Morisette et al. 2009).

Em paisagens com alta dinâmica estrutural, formadas por mosaicos de diferentes fisionomias vegetais, as variações entre as estações de crescimento ocasionadas pelas características fenológicas particulares de cada espécie ou comunidade podem possibilitar uma diferenciação espacial e temporal quanto à produção das folhas, ocasionando variações na oferta dos recursos aos organismos que utilizam esse órgão vegetal como recurso alimentar, abrigo ou reprodução (Crawley 1983, Sharma 2010). Esta dinâmica espaço-temporal pode influenciar assim os processos ecológicos e evolutivos ao conectarem ou imporem certo grau de isolamento entre os diferentes componentes estruturais da paisagem (e.g. Gulmon et al., 1983; Fahrig 2003; Schellhorn 2015).

Todavia, apesar do elevado número de trabalhos focados na conectividade da paisagem, a grande maioria tem sido feita principalmente para ambientes florestais (Uezu et al., 2005; Metzger et al., 2009; Ribeiro et al., 2009; Martensen et al., 2012). Estes estudos não consideram as possíveis dinâmicas de conectividade baseadas nas diferenças entre as estações de crescimento das plantas e consequentemente diferenciação na oferta de recursos (mas veja Schellhorn et al., 2015), sendo igualmente raros os estudos realizados em campos naturalmente heterogêneos e ou naturalmente fragmentados, como o caso dos campos rupestres, destacando a importância deste estudo.

1.2. Campos rupestres como paisagens heterogêneas: riqueza e desafio do estudo.

O primeiro documento em que se tem registrado o nome Serra do Espinhaço, região na qual estão inseridos os campos rupestres, foi elaborado pelo geólogo alemão Wilhelm Von Eschwege (1822), com intenção de descrever a complexidade orográfica destas paisagens (Derby 1906), assim como a natureza dos cursos d'água associados a esta geomorfologia particular. Como pôde ser constatado posteriormente, seu relevo, substrato e topografia contribuem também para o surgimento de microclimas, refletindo na rica estrutura de suas comunidades dentro de uma mesma paisagem (Giuliette et al., 1997; Rapini et al., 2008).

Os campos rupestres apresentam enorme heterogeneidade, fazendo deles formações vegetais de alta relevância biológica e que possuem altas taxas de endemismo, onde se encontram diferentes formações vegetais (Silveira et al., 2015). A combinação específica de fatores climáticos associados às características edáficas e geomorfológicas, altamente associado aos afloramentos rochosos, garantem a vegetação característica existente no local, com o predomínio da fisionomia campestre, que é encontrada principalmente acima dos 1.000 m de altitude acima do nível do mar (Giulietti et al., 1987). Além disso, esta vegetação específica apresenta enorme variação ao longo da altitude e tipo de substrato, estando associada às matas ciliares nas linhas de drenagem, capões de mata, cerrado e campos de altitude (Derby 1906; Giulietti et al., 1987; Meguro et al., 1996; Rapini et al., 2008). Este mosaico é composto por uma grande diversidade de espécies, com predomínio das famílias Poaceae, presente nos locais com solos mais arenosos e profundos, contendo menor teor de nutrientes; Velloziaceae, localizada principalmente nos afloramentos rochosos, com solos mais rasos, porém com maior quantidade de matéria orgânica e outras famílias como Bromeliaceae, Cactaceae, Cyperaceae e Melastomataceae (Giulietti et al., 1987; Rapini et al., 2008; Silveira et al., 2015).

Nos campos rupestres, o regime particular de precipitação e a presença de afloramentos d'água estão também intimamente relacionados ao estabelecimento de determinadas espécies na região, como estudado tanto por Magalhães et al., (2011) a partir da observação de uma espécie arbórea na Cadeia do Espinhaço (*Kielmeyera lathrophyton* - Clusiaceae), como por Meguro et al., (1996) a partir da observação do processo de colonização de matas ripárias e capões de altitude.

Graças a enorme variedade de ambientes, os padrões fenológicos encontrados nos campos rupestres podem ser igualmente muito distintos (Belo et al., 2013; Rocha et al., 2016). Um estudo realizado em uma área de campo rupestre na Serra do Cipó, em que se acompanhou a fenologia reprodutiva e vegetativa de sete espécies de arbustos, foi encontrada uma grande diversidade de padrões, mesmo num pequeno grupo de espécies. (Belo et al., 2013). Em outro estudo, Le Stradic (2014) observou diferentes estratégias fenológicas exibidas pela flora dos campos rupestres, mesmo as espécies estando sob as mesmas condições ambientais.

Ao avaliarmos a heterogeneidade dos ambientes com alta riqueza de espécies e complexidade promovendo o surgimento de condições particulares, junto à necessidade de se compreender como se dão as respostas fenológicas da vegetação nesses mosaicos naturais, surge o desafio de transitar entre o modo convencional de obtenção de informações fenológicas (observação direta em campo) e o desenvolvimento de novas técnicas que permitam não só observarmos uma região maior de nosso espaço, como coletar informações em escalas temporais cada vez mais refinadas. Desta forma, a ciência ambiental tem aproveitado tecnologias já existentes, como o imageamento digital (Crimmins & Crimmins 2008; Migliavacca et al., 2011), porém agora adaptadas às novas perguntas, para responder de forma mais precisa essas questões.

Assim, esta capacidade de detectar variações sutis da vegetação em função do tempo permitirá que avancemos no conhecimento sobre ambientes altamente complexos, como o caso dos campos rupestres, aumentando o potencial de conservação desta fisionomia.

1.3. Uso de câmeras na fenologia.

O interesse em entender de forma mais acurada os processos naturais das comunidades vegetais impulsionou o uso de novas tecnologias para o monitoramento de eventos temporais, que até então não eram possíveis de serem acompanhados em estudos fenológicos tradicionais (Morisette et al., 2009). Muitos estudos já foram realizados com interesse na detecção e interpretação das respostas da vegetação a partir de imagens de sensores remotos (Sakamoto et al., 2005; Fischer et al., 2006; Xiao et al., 2006; Studer et al., 2007; Verbesselt et al., 2010), porém estes utilizaram-se principalmente de sistemas orbitais (transportados por satélites), o que resulta em média resolução espacial, com pixels geralmente de 30x30m (como é o caso do Landsat/TM) ou mais baixa (MODIS, p.ex., com 250 m de resolução).

O uso de câmeras digitais para obtenção de imagens sequenciais próximas do objeto de estudo é uma das formas de aplicação da técnica de *Near-surface Remote Phenology* ou fenologia remota próxima (Richardson et al., 2007, 2009), revolucionando não somente os estudos fenológicos, mas também diversos outros campos de pesquisa (ver Claridge 2004; Pike 2010).

A alta frequência de aquisição dos dados, referente à resolução temporal, surge como o maior diferencial desta técnica em relação a outras, permitindo que sejam identificados com precisão os períodos de início e fim das estações de crescimento e senescência e sua relação com os fatores climáticos (Morisette et al., 2009; Richardson et al., 2009). Adicionalmente, vantagens como baixo custo, facilidade de instalação e de manutenção, demonstram o grande potencial desta técnica de “fenocâmeras” quando aplicada em diferentes ecossistemas, de florestas a campos congelados (Richardson et al., 2007; Richardson et al., 2009; Migliavacca et al., 2011; Sonnentag et al., 2012; Keenan et al., 2014; Inoue et al., 2014), e recentemente no cerrado (Alberton et al., 2014).

A fenologia remota próxima utilizando câmeras digitais ou “fenocâmeras” apresentou uma aplicação crescente na última década nos estudos de fenologia vegetativa, permitindo o avanço tanto do conhecimento a respeito das características particulares das espécies vegetais e da comunidade, quanto das variações das estações de crescimento e sua relação com o clima geral e local (Richardson et al., 2007; Richardson et al., 2009; Ahrends et al., 2008; Crimmins & Crimmins 2008; Morisette et al., 2009; Zhao et al., 2012; Alberton et al., 2014). Com a extração da informação da proporção dos pixels para os canais RGB (R=vermelho, G=verde e B=azul) obtidas a partir de imagens da vegetação é possível inferir sobre questões como, por exemplo, os períodos da produção de folhas novas (“*leaf flushing*” ou “*leaf-out*”) e senescência (“*leaf fall*”) em nível de comunidade ou das espécies para uma determinada vegetação (e.g. Richardson et al., 2009; Alberton et al., 2014).

1.4. Objetivos

Tendo em vista o potencial destas tecnologias e a crescente necessidade de um maior entendimento dos processos ecológicos baseados na relação espaço-tempo, neste caso da paisagem e sua fenologia, o presente estudo buscou descrever, pela primeira vez, os padrões de mudança foliar nos campos rupestres da Serra do Cipó baseadas na interpretação da reflexão dos canais verde e vermelho pelas plantas, e responder: (i) se em uma vegetação típica de campo rupestre, representada por quatro diferentes fisionomias (campo arenoso, campo úmido, campo pedregoso e afloramentos rochosos), existem diferenças quanto ao padrão fenológico vegetativo e duração das estações de crescimento e, (ii) se diferenças fenológicas nas vegetações podem favorecer a conexão desses ambientes, baseado na sobreposição e duração das estações de crescimento, ou se há um padrão sazonal comum. Esperamos encontrar um gradiente de sazonalidade onde a vegetação sobre afloramento apresentaria a estação de crescimento mais curta, seguida dos campos arenosos e pedregosos e ao final os campos úmidos, que poderia indicar uma potencial conexão das estações de crescimento no mosaico vegetacional.

2. Material e Métodos

2.1. Área de Estudo.

O estudo foi desenvolvido na região do Parque Nacional da Serra do Cipó e Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira, situada ao sul da Cadeia do Espinhaço no estado de Minas Gerais. A área caracterizada pelos campos rupestres é localmente denominada Quadrante 16 (abreviada como Q16) e está localizada a uma altitude de 1.300m em relação ao nível do mar (Figura 1). De acordo com a classificação proposta por Köppen (1931), o clima da região é identificado como Cwb, apresentando verão quente e chuvoso e o inverno frio e seco. De acordo com a análise climática realizada por Madeira & Fernandes (1999), a região pode ser dividida em duas principais estações, uma chuvosa (novembro a janeiro), e uma seca (maio a setembro), apresentando precipitação média anual equivalente a 1.622mm. A estrutura pedológica, por sua vez, é predominantemente de natureza quartzítica, exibindo pontos de afloramentos de calcário (Rapini et al., 2008; Silveira et al., 2015; Rocha et al., 2016).

Dentro da área de estudo destacamos quatro das tipologias de vegetação de campos rupestres (ver Silveira et al., 2015) descritas a seguir. **Campo arenoso:** com solos arenosos e mais profundos, apresentam alto nível de drenagem e reduzido teor de nutrientes (Benites et al., 2003), sendo irrigados predominantemente pela água da chuva, fazendo com que seja constituído por espécies gramíneas (em especial da família Poaceae, Cyperaceae e Xyridaceae) e também representantes da família Eriocaulaceae (Fig 1a); **campo úmido:** circundado por pequenos cursos d'água temporários, se assemelha ao campo arenoso em relação aos altos níveis de drenagem e nutrientes, porém o maior teor de umidade no solo influencia o grupo de espécies encontradas no local (Fig. 1b); **campo pedregoso:** as particularidades desta

fisionomia caracterizada pelo afloramento quartzítico também garantem uma composição de espécies diferentes das outras formações campestres, tais como espécies das famílias Cyperaceae e Velloziaceae, além de Poacea comuns também aos outros campos (Fig. 1c); **Afloramentos rochosos:** os afloramentos rochosos marcam a fisionomia denominada de campos rupestres e representam matações ou áreas onde a rocha aflora com solo escasso e raso e maior teor de matéria orgânica, que suportam o desenvolvimento de espécies características ou exclusivas deste ambiente, com representantes das famílias Velloziaceae, Cactaceae, Bromeliaceae, Cyperaceae e Xyridaceae (neste estudo monitoramos dois afloramentos, 1 e 2, representados nas Figuras 1d e 1e).

Como foi constatado em campo, e comparado com outros estudos já realizados (Giulietti et al., 1987; Derby 1906; Benites et al., 2003), as distinções entre os tipos de solo nos quais cada tipologia está situada pode ser um importante fator seletivo para as espécies neste ambiente (Silveira et al. 2016).

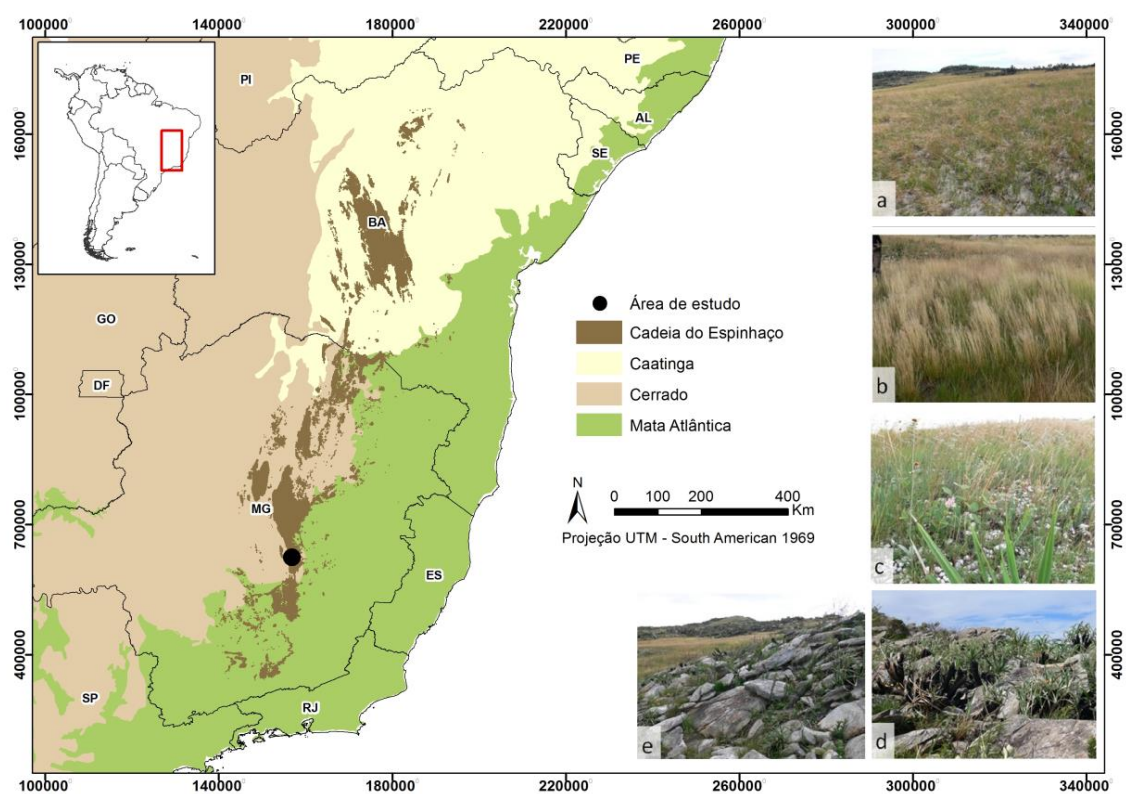


Figura 1: As quatro fisionomias presentes na área de campos rupestres selecionadas para o presente estudo: (a) Campo arenoso, (b) Campo úmido, (c) Campo pedregoso, (d) afloramento 1 e, (e) afloramento 2, demonstrando a grande diversidade de tipologias e cobertura vegetal na Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil.

2.2. Dados meteorológicos e obtenção de imagens.

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de uma estação meteorológica completa (modelo U30 - Hobo) que registra dados ambientais a cada cinco minutos. Para este estudo, utilizamos os dados diários de precipitação (Fig. 2), relacionando-os posteriormente aos padrões de mudanças de cor da vegetação.

A partir das informações adquiridas na estação meteorológica local, dois principais períodos foram delimitados para o ano de estudo (Fig. 2): um com elevado índice pluviométrico (100mm a 400mm mensais) entre os meses de outubro de 2013 e março de 2014, considerado como a estação úmida, e outro com precipitação reduzida (abaixo de 50mm, entre abril e setembro de 2014), considerado como a estação seca, aproximando-se do que foi observado por Madeira & Fernandes (1999).

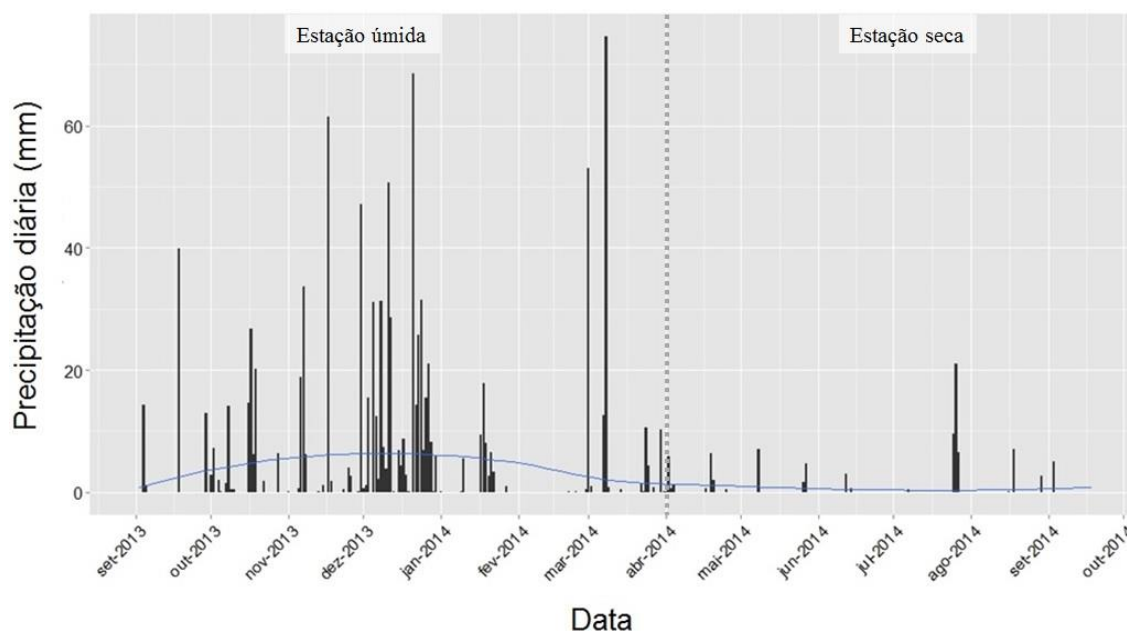


Figura 2: Precipitação diária (mm) para o período estudado (setembro 2013 a setembro 2014), na Serra do Cipó, MG, Brasil. Em azul é mostrada a curva de suavização dos níveis pluviométricos, evidenciando a caracterização da precipitação anual para a região. É possível diferenciar dois períodos de grande variação no nível de precipitação, de outubro a março (estação úmida), e abril a setembro (estação seca), separados pela linha vermelha tracejada.

Neste estudo as imagens utilizadas foram obtidas por uma câmera Mobotix Q24 (Mobotix AG – Germany, com resolução de 3,1 megapixels), instalada em uma torre meteorológica de aproximadamente 3m de altura, localizada a uma altitude de 1.300m no Q16. O equipamento foi fixado de forma que se minimizassem os efeitos de possíveis perturbações (devido à altitude, o local está sujeito a rajadas de vento de altas velocidades), que poderiam comprometer a qualidade da sequência temporal de dados.

A câmera foi posicionada de modo que fossem enquadrados tanto os campos quanto os afloramentos rochosos (Fig. 3a), e configurada para realizar seis disparos sequenciais a cada hora, iniciando às 6 horas da

manhã e parando às 18 horas, seguindo o método proposto em (Alberton et al., 2014). Foi analisado um total de 19.091 imagens obtidas ao longo de um ano, de setembro de 2013 a setembro de 2014, garantindo o registro das variações sazonais na vegetação. As fotografias apresentam dimensões de 1280 x 960 pixels, com resolução de cor de 8bits, sendo que a exposição à luz foi configurada para fixa (não variando conforme a condição de luminosidade), e o intervalo de variação das cores para cada pixel foi de 0-255 (sendo os extremos R=0, G=0 e B=0 referentes ao preto, e R=255, G=255 e B=255 referente ao branco). A área fotografada corresponde a aproximadamente 6.500m², considerando o ângulo de cobertura da câmera.

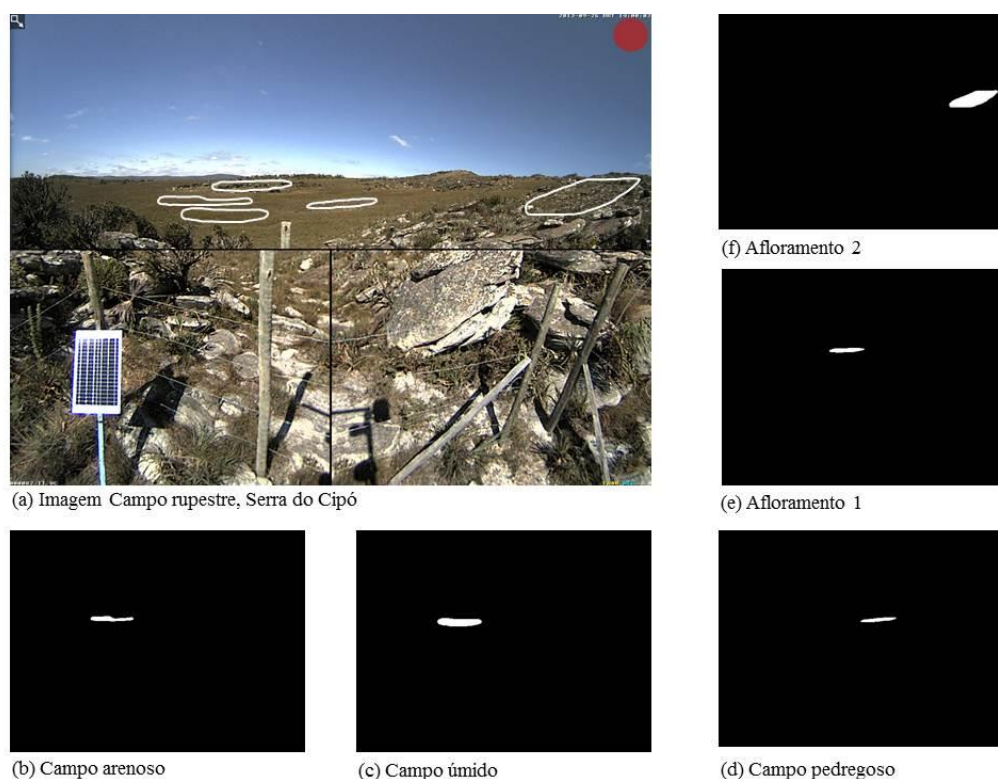


Figura 3: Amostra de imagem do campo rupestre (a) localizado no quadrante 16, Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil. Os polígonos brancos representam as máscaras que delimitam as Regiões de Interesse (ROIs) referentes às fisionomias da paisagem analisadas, visualizadas como áreas brancas: Campo arenoso (b), Campo úmido (c), Campo pedregoso (d), afloramento 1 (e), afloramento 2 (f).

2.3. Processamento e interpretação das imagens digitais.

O critério que utilizamos para interpretação das respostas da vegetação em relação ao tempo foi baseado no padrão de reflexão da luz pelas estruturas das plantas, em especial as folhas (Ponzoni & Shimabukuro 2007), registrado nos canais vermelho, verde e azul (RGB) das fotografias digitais.

Para a extração da proporção dos canais RGB de cada fotografia foram primeiramente delimitadas, dentro da imagem da área de estudo (Figura 3a), as Regiões de Interesse (ROIs, ver Richardson et al., 2007, Alberton et al., 2014) referentes as tipologias vegetais previamente descritas: campo arenoso, campo úmido, campo pedregoso, e afloramentos rochosos (Figura 3b a 3f). Após a definição das ROIs, uma máscara foi criada para cada uma destas regiões, delimitando as porções da fotografia de onde foram extraídos os canais RGB (Figura 3b a 3f).

Extraímos dois índices, o RGB Chromatic Coordinate (RGBcc), capaz de separar as proporções dos três canais de cores (vermelho, verde e azul) a partir de uma transformação não linear do número digital (DN) de cada pixel; e o Excess Green (ExG), um índice de contraste que destaca o canal verde das plantas em relação aos outros canais refletidos (para detalhes dos índices, ver Sonnentag et al., 2012). O índice RGBcc é apresentado nos resultados de forma individualizada, sendo a proporção relativa do canal vermelho e verde apresentados como Rcc e Gcc, respectivamente. Além dos valores brutos de contribuição de cada canal de cor para os pixels, o programa gera também os valores normalizados. Dessa forma, a soma das proporções dos três canais sempre resultará em 1. Esta normalização permite uma melhor interpretação dos dados quanto às contribuições de cada canal.

Utilizamos o software PhenoViewer (em desenvolvimento - Instituto de Computação UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo) para delimitar as máscaras e extrair os valores de cada canal de cor presente dentro das máscaras. Abaixo são explicitadas as equações referentes aos índices RGBcc e ExG, sendo R a proporção relativa do canal vermelho, G a proporção relativa do canal verde e B a proporção relativa do canal azul:

$$Gcc = G / [R + G + B] \quad Rcc = R / [R + G + B] \quad ExG = 2G - [R + B]$$

Apesar de termos extraído as proporções referentes aos três canais de cor, vermelho, verde e azul, decidimos por não analisar o canal azul, uma vez que os dois primeiros apresentam informações interpretativas mais diretas a respeito da fenologia da vegetação (principalmente em relação ao desenvolvimento e senescência foliar, baseados nas variações de produção da clorofila, pigmento com pico de reflexão no canal verde), quando comparados à resposta fenológica relacionada ao canal azul. Este pode estar relacionado ao amadurecimento da folha, no entanto é um canal de cor que apresenta maior ruído, dificultando sua interpretação (Richardson et al., 2007, Richardson et al., 2009).

Dois momentos da sequência temporal apresentaram perda de dados, ocasionadas por questões técnicas (dia 12 de junho de 2014 e dias 22 a 31 de julho de 2014). Entretanto estas lacunas não prejudicaram as análises da sequência.

Para minimizar os efeitos de angulação do Sol, aplicamos aos dois índices a técnica de filtragem proposta por Sonnentag et al. (2012). Nesta, os valores diários das proporções dos canais RGB são reduzidos ao valor do percentil de 90 (*per90th*) para todo o dia. Para a suavização da curva resultante utilizamos o valor central do percentil 90 dentro de uma janela (média móvel) de três dias. Desta forma, considerando o processo de suavização, removemos *outliers* originados de uma intensidade luminosa extrema, ocasionando redução no número de observações na série temporal.

Os resultados referentes às proporções dos canais verde e vermelho são apresentados de forma gráfica, onde são plotadas as proporções em função dos Dias do Ano (DOY – Day of Year), sendo esta notação a mais usual para observação de fenômenos cíclicos, podendo ser observada em outros estudos semelhantes (por exemplo, Migliavacca et al., 2011; Sonnentag et al., 2012; Inoue et al., 2014). Para interpretação das respostas da vegetação baseadas nas proporções dos canais de cores, consideramos como critério as estações de crescimento para cada tipologia escolhida. A estação de crescimento foi caracterizada como sendo a faixa temporal em que a proporção relativa do canal verde (Gcc) se mostra mais pronunciada dentro do período observado.

3. Resultados

A partir dos gráficos das proporções de reflexão dos canais vermelho (R) e verde (G), pudemos observar variação nos padrões de reflexão entre as diferentes fisionomias (Figura 4). Analisando a amplitude da variação dos canais para todas as tipologias dentro do período de um ano, notamos que o canal vermelho apresenta sempre uma contribuição relativa maior (Rcc máximo de 0,447) quando comparado ao canal verde (Gcc atingindo máximo de 0,3752).

Além disso, para ambos os canais, em especial nos gráficos referentes às três fisionomias de campos (campo arenoso, campo úmido e campo pedregoso), as curvas mostraram três períodos distintos ao longo da faixa temporal estudada, o primeiro entre 20 de setembro de 2013 e fim de janeiro de 2014; o segundo de fevereiro a maio de 2014; e o terceiro de junho a setembro de 2014 (Figura 4).

Observamos um comportamento inverso entre a intensidade de chuva ao longo do ano (ainda na figura 4) e a proporção relativa do canal vermelho a partir do mês de maio (DOY 121), momento em que ocorre significativa redução no volume de chuva na região (como observado pelos dados pluviométricos da figura 2). O canal verde por sua vez, que exibe comportamento contrário ao canal vermelho após o mesmo mês, passa a acompanhar a curva da pluviosidade. Da mesma forma, anterior ao mês de maio, os dois canais apresentaram comportamentos inversos menos pronunciados.

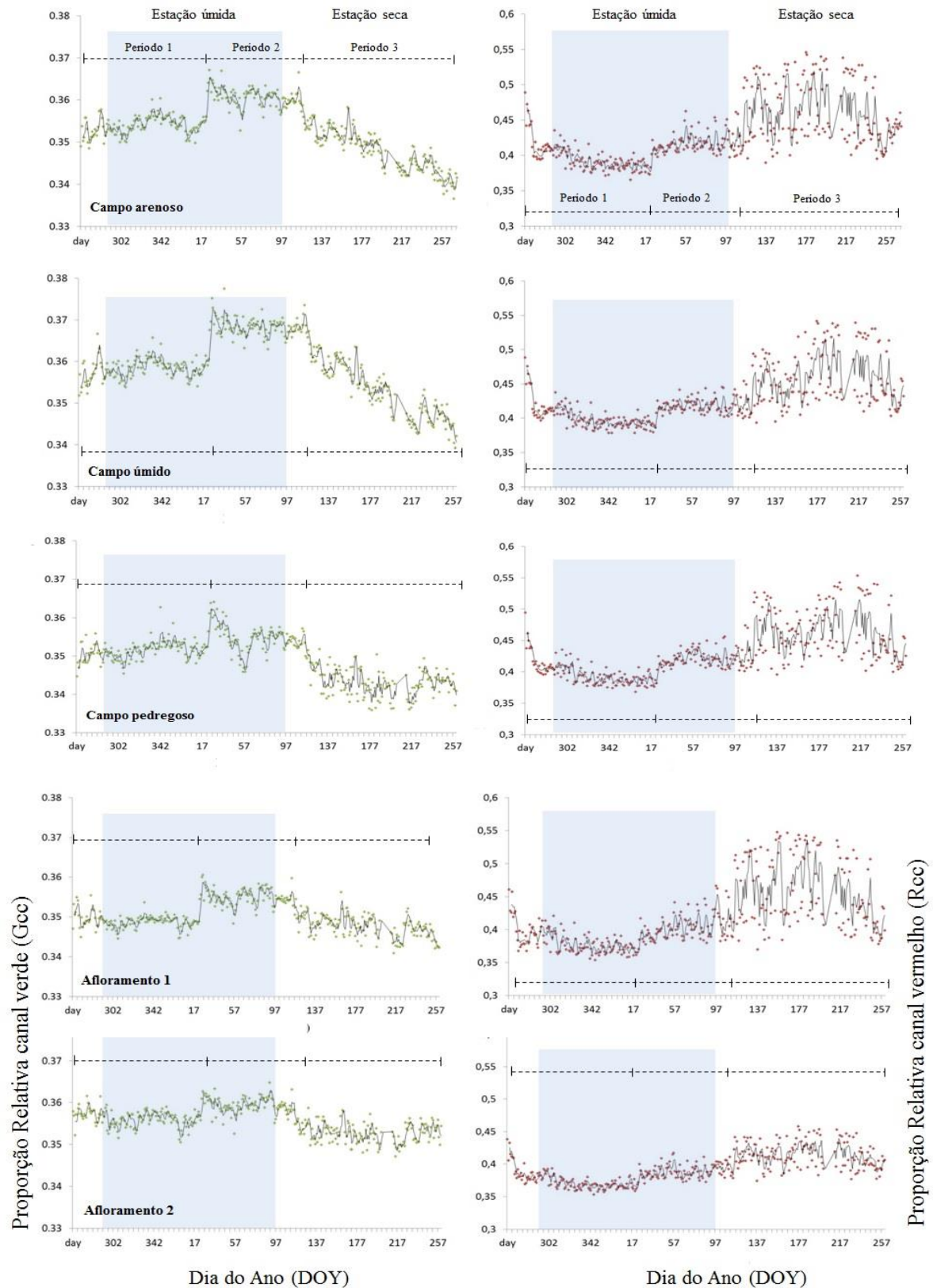


Figura 4: Proporções relativas de reflexão dos canais verde (G) à esquerda e vermelho (R) à direita baseadas no índice RGcc ao longo de um ano para cinco fitofisionomias encontradas nos campos rupestres, sendo elas o Campo arenoso, Campo úmido, Campo pedregoso e Afloramentos rochosos. São delimitadas também a estação úmida (polígono azul) e a estação seca, além da linha pontilhada referente aos três períodos distintos observados.

Apesar das diferentes intensidades dos picos das fases de desenvolvimento (Gcc) de cada vegetação estudada, constatamos que a duração destes períodos foi semelhante para as distintas tipologias, todas apresentando início da estação de crescimento ao final do mês de janeiro (próximo ao DOY 30) e início de senescência em maio (próximo ao DOY 121). Ver Figura 4.

Nas curvas referentes ao canal verde de todas as tipologias (Figura 4), com exceção do campo úmido, notamos que a vegetação exibiu uma resposta pronunciada em relação à queda do índice pluviométrico ocorrido nos meses de janeiro e fevereiro. Após este momento de baixa pluviosidade o volume de chuva volta a aumentar no mês de março (DOY 60), sendo possível notar a rápida recuperação da vegetação, comprovada pelo crescimento do canal verde.

Além disso, pudemos observar um atraso temporal entre os meses com maiores volumes de chuva (novembro e dezembro) e o início de crescimento da curva de reflexão do canal verde (final de janeiro e início de fevereiro).

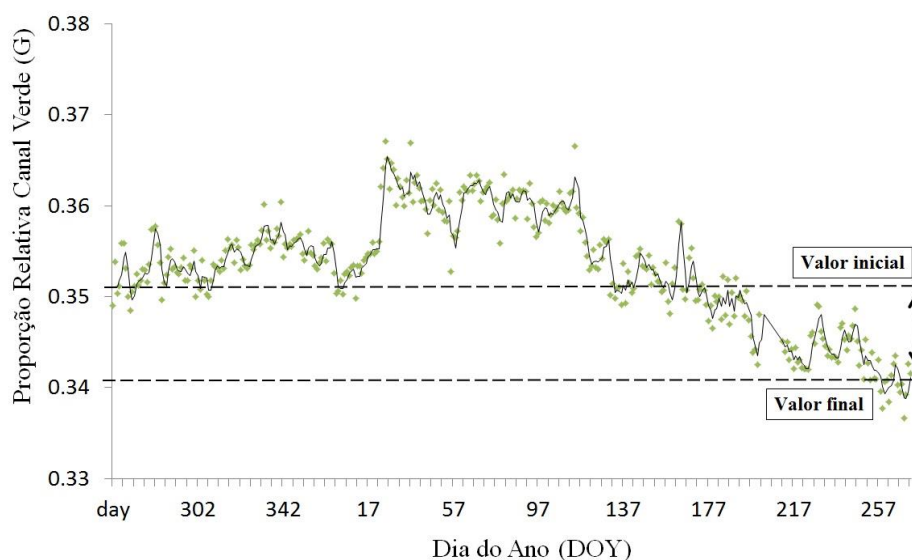


Figura 5: Apesar de representarem momentos similares do ano, setembro de 2013 e setembro de 2014, os valores iniciais e finais observados nas curvas dos canais verdes para todas as tipologias apresentam nítida descontinuidade.

Quando analisamos em conjunto as curvas de contribuição do canal verde das distintas tipologias, podemos observar uma tendência comum de resposta das comunidades florísticas (Figura 8). Entretanto, as curvas apresentam tendências similares, mas com valores de contribuição diferentes. O campo úmido (linha vermelha) foi o que apresentou os maiores níveis de contribuição do canal verde ao longo do período estudado, acima das demais curvas, assim como também a maior diferença entre os valores mínimo e máximo de reflexão do canal verde (variando de 0,339 a 0,377). Por outro lado, as fisionomias referentes aos Afloramentos 1 e 2 (cores laranja e azul na Figura 8), apresentaram as menores variações entre o início

e fim da série temporal (Afloramento 1 e Afloramento 2 exibiram diferenças de 0,0197 e 0,0176 respectivamente).

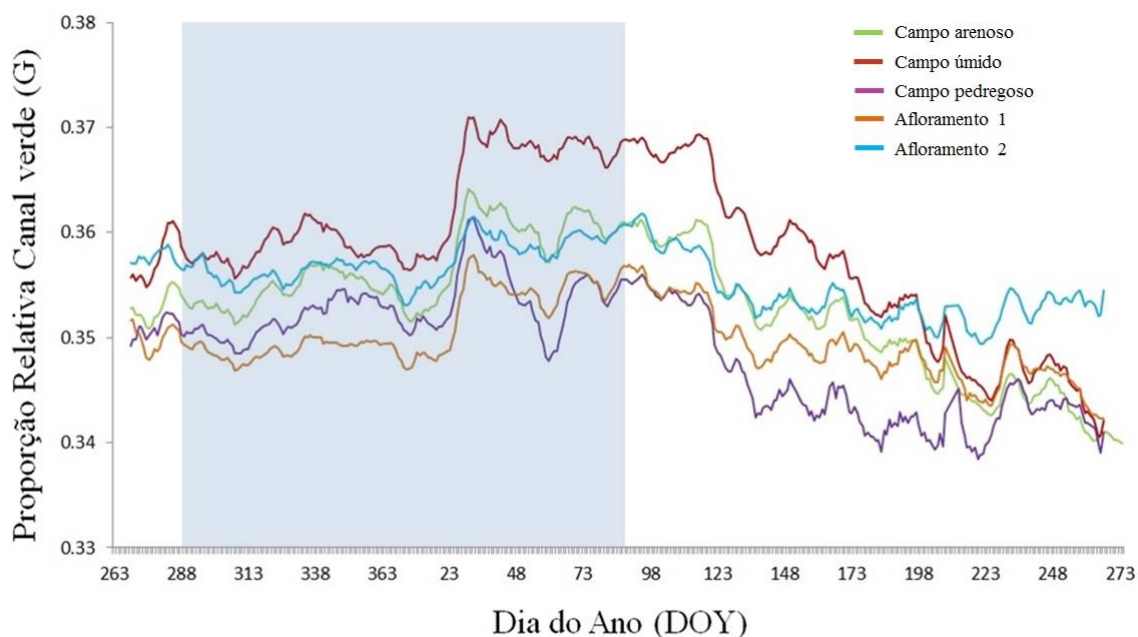


Figura 6: Proporções de contribuição entre o canal verde das diferentes tipologias estudadas, comparadas em uma janela móvel de sete dias. As tipologias são representadas pelas linhas coloridas, sendo: verde (Campo arenoso), vermelho (Campo úmido), roxo (Campo pedregoso), laranja (Afloramento 1) e azul (Afloramento 2). O retângulo em azul representa a estação chuvosa para o período estudado, de Outubro de 2013 a Março de 2014, como definido em Madeira & Fernandes (1999).

Os resultados obtidos pelas extrações por meio do índice ExcessGreen como proposto por Sonnentag et al., (2012) se mostraram altamente ruidosos, não possibilitando uma interpretação adequada e não se fazendo claro quanto à tendência da fenologia nas diferentes tipologias (Figura 9).

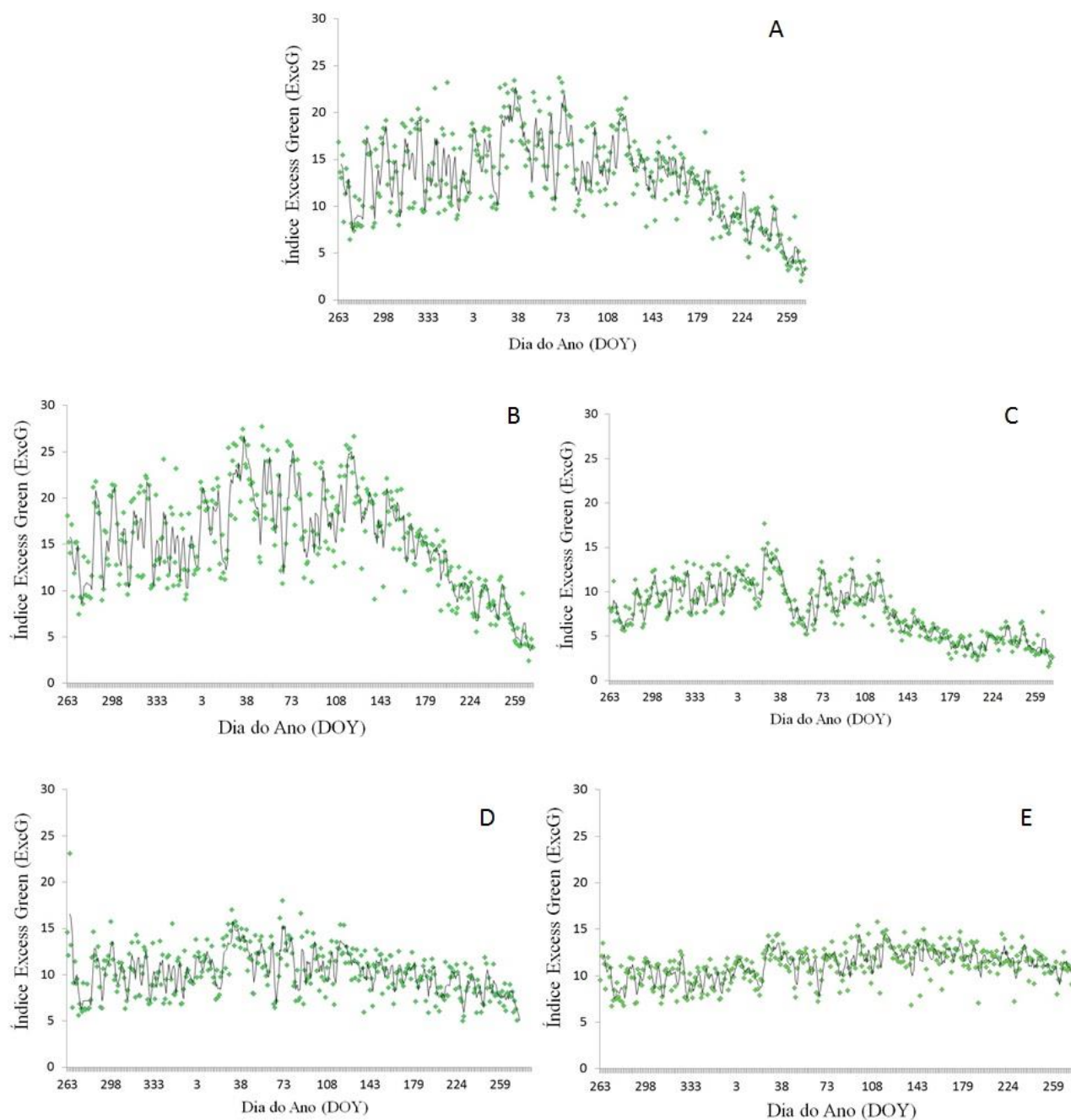


Figura 7: Valores do índice ExcessGreen para as fisionomias de campo rupestre na Serrado Cipó, MG, Brasil. (a) Campo arenoso, (b) Campo úmido, (c) Campo pedregoso. (d) afloramento 1, (e) Afloramento 2. A linha representa os dados suavizados em uma janela de três dias.

4. Discussão

O presente estudo é o primeiro a descrever os padrões de mudança foliar nos campos rupestres, um ecossistema altamente heterogêneo e rico em espécies da Cadeia do Espinhaço, utilizando a técnica da fenologia próxima remota com fotografias repetidas com fenocâmeras. Assim, pudemos responder à primeira pergunta proposta, detectando que o padrão fenológico vegetativo difere quanto à intensidade da produção de folhas, descrita pelo valor de verde, mas não quanto a duração das estações de crescimento para as quatro fisionomias existentes neste mosaico natural, o campo arenoso, o campo úmido, o campo pedregoso e dois afloramentos rochosos. Complementar à forma tradicional de estudo fenológico em campo (Studer et al., 2007; Liang & Schwartz, 2009; Liang et al., 2011), a técnica de utilização de câmeras digitais para extração de informações fenológicas remotas baseadas nas proporções dos canais vermelho e verde das plantas dentro de uma sequência temporal de imagens, se mostrou altamente eficiente para identificar as respostas das diferentes comunidades florísticas (como já discutido por Turner et al., 2003; Richardson et al., 2007; Richardson et al., 2009; Ahrends et al., 2008; Crimmins & Crimmins 2008; Morisette et al., 2009; Migliavacca et al., 2011; Zhao et al., 2012; Alberton et al., 2014). Estes autores mostraram o potencial da técnica em diferentes ambientes, desde florestas decíduas, florestas temperadas e cerrados.

Outros estudos baseados em sequências temporais de imagens utilizaram séries temporais maiores do que um ano (por exemplo Ide & Oguma, 2010, série de 8 anos; Migliavacca et al., 2011, série de 2 anos Keenan et al., 2014, série de 5 anos; Julitta et al., 2014, série de 3 anos). Um período maior de aquisição de informações permite que sejam feitas inferências mais concretas acerca das respostas das comunidades vegetais aos fatores abióticos, uma vez que podem ser comparadas épocas similares e relacioná-las às condições ambientais e mesmo eventuais alterações nos padrões do clima entre anos. Neste estudo, a faixa temporal referente a um ano de coleta de dados limitou o aprofundamento das perguntas quanto à relação das comunidades e os fatores abióticos (como a pluviometria anual). Porém, a alta resolução temporal, ou frequência na qual as informações foram adquiridas e analisadas, se mostrou essencial para a observação da fenologia das comunidades, sua caracterização e diferenciação.

Encontramos dificuldade em definir previamente o conceito de estação de crescimento para os campos rupestres, considerando a ausência de estudos fenológicos baseados em séries temporais para este tipo de ecossistema. Este conceito foi definido em alguns estudos (por exemplo, Chen et al., 2000; Jeong et al. 2011), porém para outros ambientes e baseados em outras formas de obtenção dos dados (sistemas orbitais em escalas continentais). Aqui, atribuímos a estação de crescimento como a faixa temporal em que a proporção relativa do canal verde (Gcc) se mostrou mais pronunciada dentro do período de um ano observado, que correspondeu entre aproximadamente os dias julianos 25 e 125.

Considerando índices usados para extração das proporções dos canais verde e vermelho, o índice Gcc (Green Chromatic Coordinate) respondeu melhor à representação das variações das comunidades florísticas para o período estudado em relação ao índice ExG (ExcessGreen), assim como concluiu Sonnentag et al.

(2012), uma vez que, sob os mesmos processos de filtragem dos dados, o ExG se mostrou altamente ruidoso (ver Figura 8 do anexo), não permitindo uma interpretação clara quanto às respostas fenológicas.

Para todas as tipologias estudadas, foi interessante notar a diferença entre os valores iniciais e finais das curvas de proporções relativas do canal verde, não havendo concordância entre os dois momentos, apesar dos mesmos representarem épocas similares do ano, setembro de 2013 e setembro de 2014 (ver Figura 7). Esta discordância pode indicar diretamente duas interpretações, tanto uma variação positiva no índice pluviométrico em setembro de 2013 quanto um déficit do mesmo em setembro de 2014. Todavia, para descobrirmos qual dos dois momentos fenológicos (início ou final do período analisado, ou mesmo os dois) está desconexo com o que pode ter acontecido antes e posteriormente no tempo, o monitoramento deve abranger uma faixa temporal mais ampla, como fizeram Ide & Oguma (2010); Migliavacca et al., (2011); Keenan et al., (2014) e Julitta et al., (2014).

As respostas acentuadas dos canais de cor dentro das estações, como o observado em fevereiro de 2014 para todas as fisionomias (com exceção dos campos úmidos), podem estar intimamente relacionadas à forte redução do volume pluviométrico ocorrido no mês de janeiro, seguido de uma intensificação no mês de fevereiro. O estresse hídrico ocasiona alteração na fisiologia no que diz respeito à produção da clorofila, pigmento com pico de reflexão no canal verde, responsável pelo processo de fotossíntese, gerando um impacto negativo no desenvolvimento das plantas (Santos & Carlesso, 1998; Sims & Gamon 2002). Assim, durante a estação seca o canal vermelho sofreu intensificação em detrimento do canal verde, o qual voltou a apresentar aumento quando se iniciou novamente o período de chuvas.

Nossos resultados mostraram que as fisionomias estudadas apresentaram alta sobreposição com relação à época e duração das estações de crescimento, com início da fase de desenvolvimento a partir do final de janeiro (DOY 30) e início de senescência em maio (DOY 121), podendo ser justificada por uma semelhança quanto às espécies presentes nas fisionomias. Porém, os valores das proporções de contribuição em que foram refletidos os canais, em especial o canal verde, se mostraram distintos, evidenciando três possibilidades: (i) diferentes respostas por parte das famílias predominantes nas comunidades amostradas uma vez que, mesmo sendo semelhantes, as comunidades apresentam dominâncias particulares de determinadas famílias florísticas (Benites et al., 2003; Rocha et al., 2016, Silveira et al. 2016); (ii) as tipologias podem apresentar respostas distintas em relação às condições do ambientes, como no caso dos eventos pluviométricos e das condições de umidade do solo, que variam de muito úmido a saturado nos campos úmidos a muito baixa nos afloramentos (ver Silveira et al. 2016), e (iii) a diferença entre as proporções do canal verde pode estar relacionada à diferença de biomassa entre as tipologias, quando consideramos a densidade de cada vegetação (Silveira et al. 2016).

Desse modo, não pudemos concluir positivamente sobre a sustentação da conexão da paisagem local por parte de alguma das fisionomias, como proposto na segunda pergunta deste estudo, uma vez que era esperada uma diferenciação mais pronunciada entre a duração das estações de crescimento, o que ocasionaria uma heterogeneidade quanto à oferta dos recursos como alimento, abrigo ou reprodução ao longo do ano (Ghazoul, 2005). Assim, a oferta ou escassez de recursos pode estar agindo de forma similar para todas as

fisionomias durante o ano. Por outro lado, a fisionomia referente aos campos úmidos não sofreu forte influência da redução da pluviosidade nos meses de janeiro e fevereiro de 2014, ao contrário das demais fisionomias, podendo ser inferido que a umidade proporcionada pelos pequenos cursos d'água no entorno possa ter garantido a manutenção hídrica necessária à vegetação (Santos & Carlesso, 1998). Neste caso em particular, esta fisionomia poderia suprir, em parte, as demandas de alimento, abrigo ou área de reprodução para outros organismos. Portanto, esta segunda pergunta levanta a necessidade de mais informações a respeito da composição das comunidades vegetais presentes no local do estudo, bem como quanto à fenologia das diferentes espécies.

Este estudo buscou contribuir de forma inédita com o conhecimento tradicional já existente a respeito da fenologia das comunidades dos campos rupestres (Madeira & Fernandes, 1999; Garcia & Diniz, 2003; Belo et al., 2013), um ecossistema de extrema riqueza e relevância ecológica, e que foi ainda pouco estudado quando comparado a outros ambientes. Em busca rápida no Portal de Periódicos CAPES, os resultados para campo rupestre totalizam 598 publicações, em contraste à Mata Atlântica com 3.397, caatinga com 3.975 e Amazônia com 18.603. Os estudos de fenologia de comunidade são raros (Rocha et al. 2016), sendo que nenhum trata da fenologia vegetativa dos campos rupestres. A aplicação da técnica de sensoriamento remoto próximo, permitindo a aquisição de imagens em fina escala temporal, associada à extração das informações das proporções dos canais de cores RGB da vegetação por meio de índices específicos, expande o potencial de observação sobre o comportamento da vegetação em relação às variações abióticas. Quando analisadas em médio e longo prazo, esta será uma ferramenta essencial para entendermos os efeitos das mudanças ambientais globais nos campos rupestres, e o conhecimento gerado poderá ser aplicado em estratégias mais específicas para conservação deste ecossistema.

5. Referências

- AHRENDTS H.; BRUEGGER R.; STOECKLI R.; SCHENK J.; MICHNA P.; JEANNERET F.; WANNER H.; EUGSTER W. 2008. Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern Switzerland with digital photography. *Journal of Geophysical Research*. 116:1-11.
- ALBERTON B.; ALMEIDA J.; HELM R.; TORRES R.S.; MENZEL A.; MORELLATO L.P.C. 2014. Using phenological cameras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation. *Ecological Informatics*. 19:62-70.
- BAGUETTE M.; DYCK H.V. 2007. Landscape connectivity and animal behavior: functional grain as a key determinant for dispersal. *Landscape Ecology*. 22:1117-1129.

- BELO R.M.; NEGREIROS D.; FERNANDES G.W.; SILVEIRA F.A.O.; RANIERI B.D.; MORELLATO P.C. 2013. Fenologia reprodutiva e vegetativa de arbustos endêmicos de campo rupestre na Serra do Cipó, Sudeste do Brasil. *Rodriguésia*. 4:817-828.
- BENITES V.M.; CAIAFA A.N.; MENDONÇA E.S.; SCHAEFER C.E.; KER J.C. 2003. Solos e vegetação nos complexos rupestres de altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. *Floresta e Ambiente*. 10:76-85.
- CLARIDGE A.W. 2004. Use of infrared digital cameras to investigate the behaviour of cryptic species. *Wildlife Research*. 31:645-650.
- CRAWLEY M.J. 1983. *Herbivory. The dynamics of animal-plant interactions* Oxford: Blackwell Sci. 437 pp.
- CRIMMINS M.A.; CRIMMINS T.M. 2008. Monitoring plant phenology using digital repeat photography. *Environmental Management*. 41:949-958.
- DALMOLIN A.C.; LOBO F.A.; VOURLITIS G.; SILVA P.R.; DALMAGRO H.J.; ANTUNES JR M.Z.; ORTÍS C.E.R. 2015. Is the dry season an important driver of phenology and growth for two Brazilian savanna tree species with contrasting leaf habitats? *Plant Ecology*. 216:407-417.
- DERBY O.A. 1906. The Serra do Espinhaço, Brazil. *The Journal of Geology*. 14:374-401.
- ESCHWEGE, W. L. VON. *Geognostisches Gemälde von Brasilien und das wahrscheinlichen Muttergestein der Diamanten*. Weimar, 1822.
- FAHRIG L. 2003. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 34:487-515.
- GARCIA Q.S. & DINIZ I.S.S. 2003 Comportamento germinativo de três espécies de *vellozia* da serra do cipó, mg. *Acta botanica brasílica*. 17:487-494.
- GHAZOUL J. 2005. Pollen and seed dispersal among dispersed plants. *Biological Reviews*. 80:413-443.
- GITELSON A.A.; KAUFMAN Y.J.; STARK R.; RUNDQUIST D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*. 80:76-87.
- GITELSON A.A.; GRITZ Y.; MERZLYAK M.N. 2003. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*. 160:271-282.
- GIULIETTI A.M.; MENEZES N.L.; PIRANI J.R.; MEGURO M.; WANDERLEY M.G.L. 1987. Flora da Serra do Cipó: caracterização e lista das espécies. *Boletim Botânica*. 9:1-151.

- GULMON S.L.; CHIARIELLO N.R.; MOONEY H.A.; CHU C.C. 1983. Phenology and resource use in three co-occurring grassland annuals. *Oecologia*. 58:33-42.
- HENRY M.; PONS J.M.; COSSON J.F. 2007. Foraging behaviour of a frugivorous bat helps bridge landscape connectivity and ecological processes in a fragmented rainforest. *Journal of animal ecology*. 76:801-813.
- IDE R.; OGUMA H. 2010. Use of digital cameras for phenological observations. *Ecological Informatics*. 5:339-347.
- INOUE T.; NAGAI S.; SAITOH T.M.; MURAOKA H.; NASAHARA K.N.; KOIZUMI H. 2014. Detection of the different characteristics of year-to-year variation in foliage phenology among deciduous broad-leaved tree species by using daily continuous canopy surface images. *Ecological Informatics*. 22:58-68.
- JAEGER J.A.G. 2000. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. *Landscape Ecology*. 15:150-130.
- KEENAN T.F.; DARBY B.; FELTS E.; SONNENTAG O.; FRIEDL M.A.; HUFKENS K.; O'KEEFE J.; KLOSTERMAN S.; MUNGER J.W.; TOOMEY M.; RICHARDSON A.D. 2014. Tracking forest phenology and seasonal physiology using digital repeat photography: a critical assessment. *Ecological Applications*. 24:1478-1489.
- KÖPPEN W. 1931. *Grundriss der Klimakunde*. Gruyter, Berlin.
- LAMBIN E.F.; TURNER B.L.; GEIST H.J.; AGBOLA S.B.; ANGELSEN A.; BRUCE J.W.; COOMES O.T.; DIRZO R.; FISCHER G.; FOLKE C.; GEORGE P.S.; HOMEWOOD K.; IMBERNON J.; LEEMANS R.; LI X.; MORAN E.F.; MORTIMORE M.; RAMAKRISHNAN P.S.; RICHARDS J.F.; SKANES H.; STEFFEN W.; STONE G.D.; SVEDIN U.; VELDKAMP T.A.; VOGEL C.; XU J. 2001 . The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*. 11:261:269.
- LE STRADIC S.; SILVEIRA F.A.O.; BUISSON E.; CAZELLES K. ; CARVALHO V.; FERNANDES G.W. 2015. Diversity of germination strategies and seed dormancy in herbaceous species of *campo rupestre* grasslands. *Austral Ecology*. <http://dx.doi.org/10.1111/aec.12221>.
- LIANG L.; SCHWARTZ M.D. 2009. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. *Landscape Ecology*. 24:465-472.
- LIANG L.; SCHWARTZ M.D; FEI S. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. *Remote Sensing of Environment*. 115:143-157.

- MADEIRA J.A. & FERNANDES G.W. 1999. Reproductive phenology of sympatric taxa of Chamaecrista (Leguminosae) in Serra do Cipo, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*. 15:463-479.
- MARTENSEN A.C.; RIBEIRO M.C.; BANKS-LEITE C.; PRADO P.I.; METZGER J.P. 2012. Associations of Forest Cover, Fragment Area, and Connectivity with Neotropical Understory Bird Species Richness and Abundance. *Conservation Biology*. p.1-12.
- MEGURO M.; PIRANI J.R.; MELLO-SILVA R.; GIULIETTI A.M. 1996. Caracterização florística e estrutural de matas ripárias e capões de altitude da Serra do Cipó, Minas Gerais. *Bolm. Botânica*. 15:13-29.
- METZGER J.P.; MARTENSEN A.C.; DIXO M.; BERNACCI L.C.; RIBEIRO M.C.; TEIXEIRA A.M.G.; PARDINI R. 2009. Time-lag in biological responses to landscape changes in a highly dynamic Atlantic forest region. *Biological Conservation*. 142:1166-1177.
- MIGLIAVACCA M.; GALVAGNO M.; CREMONESE E.; ROSSINI M.; MERONI M.; SONNENTAG O.; COGLIATI S.; MANCA G.; DIOTRI F.; Busetto L.; CESCATTI A.; COLOMBO R.; FAVA F.; DI CELLA U.M.; PARI E.; SINISCALCO C.; RICHARDSON A.D. 2011. Agricultural and Forest Meteorology. 151:1325-1337.
- MORELLATO P.C.; LEITÃO-FILHO H.F. 1996. Reproductive phenology of climbers in a Southeastern Brazilian Forest. *Biotropica*. 28:180-191.
- MORISSETTE J.T.; RICHARDSON A.D.; KNAPP A.K.; FISHER J.I.; GRAHAN E.A.; ABATZOGLOU J.; WILSON B.E.; BRESHEARS D.D.; HENEBRY G.M.; HANES J.M.; LIANG L. 2009. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environmental*. 7:253-260.
- PIKE T.W. 2010. Using digital cameras to investigate animal colouration: estimating sensor sensitivity functions. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 65:849-858.
- POLGAR C.A. & PRIMACK R.B. 2011. Leaf-out phenology of temperate woody plants: from trees to ecosystems. *New Phytologist*. 191:926-941.
- PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 127 p.
- RAPINI A.; RIBEIRO P.L.; PIRANI J.R. 2008. A flora dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. *Megadiversidade*. 4:15-23.

- RATHCKE B. & LACEY E.P. 1985. Phenological patterns of terrestrial plants. *Annual Reviews of Ecology and Systematics*. 16:179-214.
- REICH P.B. 1995. Phenology of tropical forests: patterns, causes, and consequences. *Canadian journal of Botany*. 73:164-174.
- RIBEIRO M.C.; METZGER J.P.; MARTENSEN A.C.; PONZONI F.J.; HIROTA M.M. 2009. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*. 142:1141-1153.
- RICHARDSON A.D.; JENKINS J.P.; BRASWELL B.H.; HOLLINGER D.Y.; OLLINGER S.V.; SMITH M-L. 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*. 152:323-334.
- RICHARDSON A.D.; BRASWELL B.H.; HOLLINGER D.Y.; JENKINS J.P.; OLLINGER S.V. 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecol. Appl.* 19: 1417-1428.
- ROCHA, N.M.B., CARSTENSEN, DW, FERNANDEZ, GW, MORELLATO, LPC 2016. Phenology patterns across a rupestrian grassland altitudinal gradient. In: *Ecology and conservation of mountain-top grasslands in Brazil* (GW Fernandes Ed.). Springer, New York. (In press)
- SAKAMOTO T.; YOKOZAWA M.; TORITANI H.; SHIBAYAMA M.; ISHITSUKA N.; OHNO H. 2005, A crop phenology detection method using time-series MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 96:366-374.
- SANTOS R.F.; CARLESSO R. 1998. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2:287-294.
- SCHELLHORN N.A.; GAGIC V.; BOMMARCO R. 2015. Time will tell: resource continuity bolsters ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2015.06.007>.
- SHARMA M.V.; SHAANKER R.U.; LEATHER S.R.; VASUDEVA R.; SHIVANNA K.R. 2011. Floral resources, pollinators and fruiting in a threatened tropical deciduous tree. *Journal of Plant Ecology*. 4:259-267.
- SILVEIRA F.A.O.; NEGREIROS D.; BARBOSA N.P.U.; BUISSON E.; CARMO F.F.; CARSTENSEN D.W.; CONCEIÇÃO A.A.; CORNELISSEN T.G.; ECHTERNACHT L.; FERNANDES G.W.; GARCIA W.S.; GUERRA T.J.; JACOBI C.M.; LEMOS-FILHO J.P.; LE STRADIC S.; MORELLATO L.P.C.; NEVES F.S.; OLIVEIRA R.S.; SCHAEFER C.E.; VIANA P.L.; LAMBERS H. 2015. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant Soil*. DOI 10.1007/s11104-015-2637-8.
- SILVÉRIO D.V.; LENZA E. 2010. Fenologia de espécies lenhosas em um cerrado típico no Parque Municipal de Bacaba, Nova Xavantina, Mato Grosso, Brasil. *Biota Neotropica*. 10:205-216.

- SIMS D.A. & GAMON J.A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structure and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*. 81:337-354.
- SONNENTAG O.; HUFKENS K.; TESHERA-STERNE C.; YOUNG A.M. ; FRIEDL M. ; BRASWELL B.H.; MILLIMAN T.; O'KEEFE J.O.; RICHARDSON A.D. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*. 152:159-177.
- STUDER S.; STÖCKLI R.; APPENZELLER C.; VIDAILE P.L. 2007. A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International Journal of Biometeorology*. 51:405-414.
- TURNER M.G.; O'NEIL R.V.; GARDNER R.H.; MILNE B.T. 1989. Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*. 3:153-162.
- TURNER W.; SPECTOR S.; GARDINER N.; FLADELAND M.; STERLING E.; STEININGER M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*. 18:306-314.
- UEZU A.; METZGER J.P.; VIELLIARD J.M.E. 2005. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation*. 123:507-519.
- VERBESSELT J.; HYNDMAN R.; ZEILEIS A.; CULVENOR D. 2010, Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*. 114:2970-2980.
- XIAO X.; HAGEN S.; ZHANG Q.; KELLER M.; MOORE III B. 2006. Detecting leaf phenology of seasonally moist tropical forests in South America with multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*. 103:465-473.
- ZHAO J.; ZHANG Y.; TAN Z.; SONG Q.; LIANG N.; YU L., ZHAO J. 2012. Using digital cameras for comparative phenological monitoring in an evergreen broad-leaved forest and a seasonal rain forest. *Ecological Informatics*. 10:65-72.

Da fenocâmera ao drone: uma nova perspectiva de observação dos padrões fenológicos e sua relação com a paisagem.

1. Introdução

O processo de fragmentação florestal ocasionado pelas ações antrópicas, assim como os ambientes naturalmente fragmentados que formam mosaicos, apresentam oportunidades para o aprofundamento do conhecimento das dinâmicas espaciais (por exemplo, mudanças na cobertura vegetal), independente da escala que esteja sendo abordada (Forman, 1995; Fahrig, 2003; Metzger et al. 2009, Ribeiro et al. 2009, Martensen et al. 2012). Porém, somente nas últimas décadas os estudos voltados à conectividade da paisagem passaram a focar também na conectividade funcional entre os ambientes, a qual leva em conta não só a estrutura física do ambiente, mas também a capacidade de dispersão dos organismos entre as manchas de habitat. A paisagem deve apresentar uma conectividade funcional para garantir o fluxo dos indivíduos ou propágulos e consequentemente permitir a manutenção dos processos ecológicos (Taylor et al. 1993; D'Eon et al. 2002; Bélisle, 2005; Baguette & Dyck, 2007; Fahrig et al., 2011), e avaliando-se este grau de funcionalidade da paisagem podemos entender melhor o estado de conservação em que a paisagem se encontra.

A variação nas épocas de atividade fenológica de determinados grupos vegetais (e.g. época de produção de folhas novas, flores e frutos) podem influenciar diretamente na conectividade funcional da paisagem, por estarem relacionados à oferta de recursos e consequentemente à ecologia comportamental de uso dos mesmos pelos demais organismos (Crawley 1983, Sharma 2010), sendo importante para uma melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas.

Paralelamente à necessidade de maior entendimento a respeito desses processos, o refinamento e o avanço das técnicas de sensoriamento remoto como, por exemplo, o crescimento de pesquisas utilizando Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs, ou RPAS em inglês), permitem que atualmente possamos detectar padrões e dinâmicas naturais que até pouco tempo não eram detectados, por possibilitarem observações em fina escala espacial e temporal (Koh & Wich, 2012; Anderson & Gaston, 2013). Assim, o desenvolvimento de novos métodos para investigar como mudanças nas atividades fenológicas podem alterar na conectividade funcional em paisagens altamente heterogêneas são de alta relevância para aprofundar o conhecimento sobre estes ambientes e subsidiar futuras estratégias de conservação e preservação dos mesmos. Ecossistemas como os campos rupestres, que constituem grande porção da Serra do Cipó, Minas Gerais, oferecem um grande desafio para este tipo de estudo.

1.1. A fenologia em multi escalas

A observação de eventos cíclicos dos organismos e sua relação com o ambiente, conhecida como fenologia, pode ser considerada como uma das técnicas mais antigas de acompanhamento do ambiente que circunda o homem, com registros datando de poucas dezenas até milhares de anos (Lieth 1974, Schwartz 2003). A necessidade de se conhecer as diferentes fases que compõe o ciclo de vida vegetal teve como principal impulso o desenvolvimento da agricultura e com isso a exigência de conhecimento a respeito do ciclo reprodutivo das espécies em relação ao seu meio (Lieth 1974, Schwartz 2013). Atualmente, são relevantes o conhecimento dos sistemas naturais (Reich 1995, Morellato et al. 2000), o impacto destes processos cíclicos sobre a saúde humana (Huynen et al. 2003) e principalmente como estes sistemas estão respondendo às mudanças globais no clima (Menzel et al. 2006).

A fenologia, portanto, tem se tornado cada vez mais alvo de pesquisas devido à sua aplicação para o entendimento da sensibilidade das espécies às mudanças climáticas, o que a torna excelente indicador das respostas dos organismos às alterações no clima global (Cleland et al., 2006, 2007; Menzel et al., 2006). As plantas, em especial, podem apresentar tempos de respostas distintos em relação às variações que ocorrem no ambiente, desde respostas instantâneas, ocasionadas principalmente por fenômenos físicos e meteorológicos pontuais, como chuva e disponibilidade de luz (Hsiao & Acevedo, 1974; Chapin III et al., 1987), até respostas percebidas apenas ao longo de centenas ou milhares de anos, identificadas por meio de datações (como a observação dos anéis de crescimento no campo da Dendrocronologia; ver Fritts, H.C. 1976; Speer, J. H. 2010) ou modelagens, quando consideramos o clima em escalas regional e global, em que a flora se adapta às novas condições do ambiente.

A frequência em que observamos os eventos está relacionada à resolução temporal, sendo que quanto mais frequentemente observamos um determinado evento, maior será sua resolução para um dado período. Quando consideramos as fases que constituem os ciclos das plantas, como o brotamento (*leaf-out*), floração, frutificação e senescência foliar (*leaf-fall*), é necessária uma alta frequência de observações para estas serem detectadas, de modo que podemos deixar de registrar informações ou momentos singulares caso não tenhamos condições de notar estes eventos na frequência adequada (Morellato et al. 2010).

Assim, a frequência, e consequentemente a resolução temporal, em que obtemos as informações fenológicas, tornam-se variáveis de grande importância e dependerão quase que exclusivamente da pergunta a ser respondida e dos recursos disponíveis para escolha da escala temporal mais apropriada.

Entretanto, o modo como os ciclos naturais das plantas são observados vem sofrendo influência cada vez maior dos avanços na ciência, em especial na área do sensoriamento remoto, que têm ocasionado mudanças na capacidade de obtenção de dados, particularmente em relação à escala espaço-temporal. A utilização das tecnologias de aquisição de informações sem a necessidade presencial do pesquisador, como a extração de séries temporais de satélites, ampliou o horizonte dos campos de estudos ambientais, quando consideramos o potencial associado a essas tecnologias (Turner et al., 2003). Apesar do acompanhamento fenológico convencional em campo permitir um maior detalhamento dos indivíduos *per se*, com

possibilidade de visualização das menores estruturas presentes na planta, esta técnica está limitada à escala espacial em que podemos coletar as informações, uma vez que depende do número de pessoas envolvidas, e da escala temporal, que está relacionada à frequência de visitas aquela determinada área de estudo, da capacidade dos observadores de se deslocarem ao local e consequentemente dos recursos disponíveis para tal atividade (ver Studer et al., 2007; Liang & Schwartz, 2009; Liang et al., 2011).

O estudo de como esses eventos fenológicos variam em escala temporal nas plantas, exercendo força sobre os grupos animais diretamente e indiretamente relacionados, são de enorme importância para a compreensão das dinâmicas espaciais a médio e longo prazo. O desenvolvimento de técnicas remotas, como câmeras digitais instaladas em torres de observação ou fenocâmeras (Richardson et al., 2007; Richardson et al., 2009; Alberton et al., 2014) possibilitam a obtenção de dados em escalas temporais muito finas de dias ou até horas ao longo do dia. Por outro lado, os sistemas orbitais (Jeong et al., 2011), possibilitam a aquisição de dados em diferentes escalas espaciais, das mais finas ao nível do solo, às mais amplas em níveis regionais e globais. Portanto, a capacidade de adquirir dados com crescente frequência, refinando a escala temporal, como no caso das fotografias diárias com câmeras digitais, ou fenocâmeras, possibilita a resposta de questões a respeito dos gatilhos ambientais das diferentes fenofases, respostas às variações sutis do ambiente e entendimento dos processos ecossistêmicos (Morissette et al., 2009; Richardson et al., 2013). A combinação dos dados em diferentes escalas nos permite fazer extrapolações de padrões em escala mais fina (por exemplo das fenocâmeras) para escalas regionais (usando a integração de séries de imagens com os dados dos padrões observados pelas fenocâmeras).

Diversos estudos destacam o papel do ambiente sobre as variações nas fenofases das plantas nas regiões tropicais, sugerindo um maior período de produção de flores, folhas e frutos, devido principalmente às diferenças entre as estações secas e chuvosas (Morellato & Leitão-Filho 1990, 1996; Van Schaik et al. 1993, Morellato et al. 2013). Essas variações ao longo do ano podem ser observadas em uma escala temporal ainda mais fina, mostrando que uma mesma espécie pode apresentar distinções em suas fenofases devido às diferentes condições micro-ambientais a que estão submetidas (e.g. Menzel et al. 2001, Athayde & Morellato et al., 2014). Por este motivo, é pertinente a busca em entender as variações fenológicas numa escala espacial mais ampla e temporal mais fina, especialmente em paisagens naturalmente heterogêneas (Fahrig et al., 2011).

1.2. Conectividade da Paisagem e Paisagem Fenológica

Como consequência das influências humanas sobre o ambiente, a fragmentação da paisagem e a perda de habitat são hoje consideradas como as maiores causas da redução da biodiversidade e do número de espécies (Jaeger, 2000; Fahrig, 2003). Alterações na composição, como quantidade de habitat, diversidade de ambientes, número de fragmentos, e alterações na configuração, como o arranjo espacial das manchas de habitats, podem influenciar na conectividade dos diferentes ambientes (Forman, 1995), sendo esta um importante fator determinante da manutenção local e regional das espécies (Taylor et al., 1993), além de

influenciar diversos processos ecológicos, como frugivoria (Turner, 1989; Henry et al. 2007), dispersão (Baguette & Dyck, 2007) e polinização (Krewenka et al., 2011). Em paisagens mais florestais, a perda de habitat e a fragmentação ocasionam o aumento do grau de isolamento entre as manchas, dificultando o deslocamento de diversos organismos pela paisagem (Fahrig, 2003). Entretanto, ambientes naturalmente heterogêneos, como os mosaicos de paisagem naturais, também afetam processos ecológicos e micro evolutivos ao imporem certo grau de isolamento entre os diferentes componentes estruturais da paisagem. Por componentes estruturais da paisagem podemos citar os diferentes tipos de ambientes, como afloramentos rochosos em meio a campos e florestas. Todavia, a grande maioria dos estudos que buscam compreender os efeitos da paisagem sobre a conectividade tem sido feita principalmente para ambientes florestais (Metzger et al. 2009, Ribeiro et al. 2009, Martensen et al. 2012), sendo raramente realizados estudos em paisagens naturalmente heterogêneas e ou naturalmente fragmentadas.

A conectividade tem se mostrado importante para explicar diferentes aspectos da biodiversidade, e tem sido explorada principalmente para aves (Uezu et al 2005, Martensen et al. 2008, 2012), anuros (Dixo et al. 2009, 2010) entre outros grupos, mas estudos buscando compreender os efeitos da conectividade sobre vegetação são casos mais raros na literatura. A conectividade apresenta dois componentes principais: o estrutural e o funcional (Medina & Vieira, 2007; Tischendorf & Fahrig, 2000). A conectividade estrutural está relacionada à organização espacial física das manchas de habitat, podendo ou não estar ligadas por meio de estruturas físicas (por exemplo corredores de vegetação, ver Medina & Vieira, 2007; Tischendorf & Fahrig, 2000). Dessa forma, a conectividade estrutural pode ser compreendida com uma análise em que não se considera nenhum aspecto ecológico ou biológico. Já a conectividade funcional considera principalmente aspectos relacionados à biologia ou ecologia das espécies, características dos processos ecológicos de interesse. Portanto, podemos dizer que um dos elementos chave para a conectividade funcional é a capacidade de deslocamento da espécie por sobre as diferentes resistências oferecidas pelo espaço (Taylor et al. 1993; D'Eon et al. 2002). Deste modo, para que haja conexão funcional, pelo menos uma das duas condições deve ocorrer: (1) a existência de uma ligação estrutural ou (2) a capacidade de os organismos se deslocarem entre unidades discretas, percebendo a paisagem como funcionalmente conectada (Medina & Vieira, 2007).

A heterogeneidade espacial aparece como um aspecto importante na determinação dos índices de conectividade funcional da paisagem. Mudanças temporais na qualidade da matriz, decorrentes tanto de variações naturais (ao longo das épocas do ano ou alterações climáticas) quanto daquelas ocasionadas pela ação humana (mudanças do uso do solo), podem afetar significativamente as taxas de deslocamento a partir do momento em que modificam o grau de heterogeneidade da paisagem, passando a impedir ou facilitar o fluxo dos organismos (Gustafson & Gardner, 1996; Pinto et al. 2009, Rayfield et al. 2010).

Assim, quando temos o interesse de entender o mosaico espacial em sua forma natural ou após mudanças no uso do solo, bem como os processos ecológicos vigentes, devemos utilizar de ferramentas que nos permitam visualizar e quantificar estes aspectos. Da mesma maneira podemos avaliar a influência desses mosaicos no comportamento de diferentes grupos de organismos, seja pelo arranjo das manchas de habitat no

espaço, pela presença ou não de barreiras físicas ou funcionais ou de corredores que facilitam o deslocamento (Fahrig, 2003). Para isso existem métricas de paisagem, formas de medições da estrutura física que nos fornecem informações diretas e indiretas a respeito do funcionamento da mesma (Lausch & Herzog, 2002; Peng et al. 2010). Entretanto, essas métricas usualmente não consideram o contexto espacial e temporal de forma integrada.

1.3. Os Veículos Aéreos Não Tripulados como uma nova ferramenta nos estudos ecológicos

O desenvolvimento tecnológico relacionado ao sensoriamento remoto apresentou enormes avanços nas últimas décadas (Turner et al., 2003; Wiens et al., 2009). O aperfeiçoamento instrumental, unido à acessibilidade pelas instituições de pesquisa, abriu um grande leque de oportunidades para estudos cada vez mais profundos sobre os diversos sistemas terrestres. A capacidade de detecção de eventos em larga escala espacial e temporal, permite à ciência atual acompanhar fenômenos ecológicos importantes relacionados à vegetação, motivo pelo qual uma grande quantidade de estudos foi feita tendo como suporte as técnicas de sensoriamento remoto (e.g. Spanner et al. 1990, Gitelson et al. 1996, Reed et al. 1994, Ponzoni & Shimabukuro, 2007; Verbesselt et al., 2010).

Recentemente, o surgimento de uma nova tecnologia de sensoriamento remoto próximo, o imageamento terrestre a partir de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*), vem reduzindo os custos da coleta de dados e facilita a obtenção de informações em escalas temporais e espaciais mais finas, tanto em relação aos sistemas aéreos tripulados assim como os orbitais (satélites), possibilitando autonomia e liberdade de escolha mais condizentes com os interesses de cada estudo (Koh & Wich, 2012; Anderson & Gaston, 2013). Denominados genericamente de *drones* (zangão em inglês, devido à semelhança com o som emitido por eles, gerado pelos motores do equipamento), são inúmeras as plataformas aéreas que permitem o transporte de instrumentos, em especial os sensores, capazes de capturar imagens e informações úteis, entre outros, ao estudo da vegetação (Anderson & Gaston, 2013). O mais comum são as fotografias tradicionais combinando os três canais de cores RGB, ou sensores que combinam diferentes bandas do espectro eletromagnético, permitindo a determinação de índices úteis ao estudo da vegetação, como o NDVI (que é a diferença entre a reflectância do canal infravermelho próximo e o canal vermelho, utilizado para análises da cobertura vegetal em diversas escalas). Cada uma destas plataformas ou sistemas deve ser avaliada antes de sua implementação, uma vez que apresentam características particulares de operação, custo e capacidade de obtenção de dados. (Koh & Wich, 2012; Watts et al., 2012; Anderson & Gaston, 2013; Paneque-Gálvez et al., 2014).

Nos últimos anos vem sendo observado um rápido crescimento na utilização de sistemas aéreos não tripulados em diversas áreas (Asner et al., 2011; Koh & Wich, 2012; Paneque-Gálvez et al., 2014; Schiffman, 2014). Porém, ao contrário do uso comercial desses sistemas, os campos envolvendo pesquisas ecológicas se mostram ainda em início de desenvolvimento, muitas vezes apenas aproveitando-se na das

inovações geradas em função de fins comerciais. Por outro lado, a miniaturização dos instrumentos, entre plataformas e sensores, além da redução de custos a eles relacionados, proporcionou maior acessibilidade a esta tecnologia até pouco tempo inacessível, estando muitas vezes sob o domínio exclusivamente militar (Newcome, 2004; Schellhorn et al., 2015).

Adicionalmente, o desenvolvimento de novas ferramentas computacionais voltadas ao processamento de imagens e outros tipos de informações geradas pelo sensoriamento remoto abrem novas possibilidades para entendermos como funcionam a dinâmica temporal e espacial de paisagens naturalmente fragmentadas ou em mosaico e sua importância para as inter-relações entre as espécies.

1.4. Objetivo

Neste estudo propomos uma nova forma de se acessar a heterogeneidade espacial e temporal de uma paisagem a partir de imagens digitais sequenciais coletadas por meio de um RPAS, e discutir suas possíveis implicações ecológicas. Para tanto, partimos das seguintes premissas: (1) podemos identificar a distribuição e proporção das fisionomias em uma vegetação heterogênea através da imagem digital do RPAS (2) Podemos avaliar variações na resposta fenológica das fisionomias identificadas e pré-selecionadas na imagem, e (3) combinando as duas técnicas acima podemos obter uma aproximação da dinâmica espaço-temporal da fenologia na paisagem e discutir as implicações ecológicas quanto à conectividade da paisagem e suas consequências, por exemplo, na oferta de recursos, de habitat e sincronia reprodutiva.

Os objetivos deste estudo estão relacionados aos resultados obtidos no Capítulo 1, onde estudamos a fenologia foliar de quatro fitofisionomias dos campos rupestres utilizando imagens repetidas tomadas por câmeras digitais (fenocâmeras). Dessas imagens foram extraídas as porcentagens médias dos canais de cor RGB para regiões específicas da paisagem (Regiões de Interesse ou ROIs) que correspondem às fitofisionomias campo úmido, campo arenoso, campo pedregoso e aforamento rochoso, para entender os padrões fenológicos nesse mosaico natural, altamente heterogêneo (Figura 1, capítulo 1).

2. Material e método

2.1. Área de estudo

A área selecionada para a realização das missões de voo está localizada na Serra do Cipó, situada ao sul da Cadeia do Espinhaço, no Estado de Minas Gerais. Em uma paisagem constituída por campo rupestre localmente denominada Quadrante 16 (abreviada como Q16), tendo-se como centroide a coordenada 19°17'36" S e 43°35'11" W, e a uma altitude de 1300m em relação ao nível do mar.

A área coberta pela região fotografada é constituída por quatro tipologias básicas, predominantes em campos rupestres (Silveira et al., 2015), sendo: **campo arenoso** que, com solos arenosos e mais profundos, apresentam alto nível de drenagem e reduzido teor de nutrientes (Benites et al., 2003), sendo irrigados predominantemente pela água da chuva, fazendo com que seja constituído por espécies gramíneas (em especial da família Poaceae, Cyperaceae e Xyridaceae) e também representantes da família Eriocaulaceae; **campo úmido**, circundado por pequenos cursos d'água temporários, se assemelha ao campo arenoso em relação aos altos níveis de drenagem e nutrientes, porém o maior teor de umidade no solo influencia o grupo de espécies encontradas no local; **campo pedregoso**, cuja particularidade desta fisionomia é caracterizada pelo afloramento quartzítico que também garantem uma singularidade de espécies diferentes das outras formações campestres, tais como das famílias Cyperaceae e Velloziaceae, além das Poaceas comuns também aos outros campos e; **Afloramentos rochosos (afloramentos 1 e 2)**, que marcam a fisionomia denominada de campos rupestres e apresentam matações ou áreas onde a rocha aflora com solo escasso e raso e maior teor de matéria orgânica, que suportam o desenvolvimento de espécies características ou exclusivas deste ambiente, com representantes das famílias Velloziaceae, Cactaceae, Bromeliaceae, Cyperaceae e Xyridaceae (Figura 8).

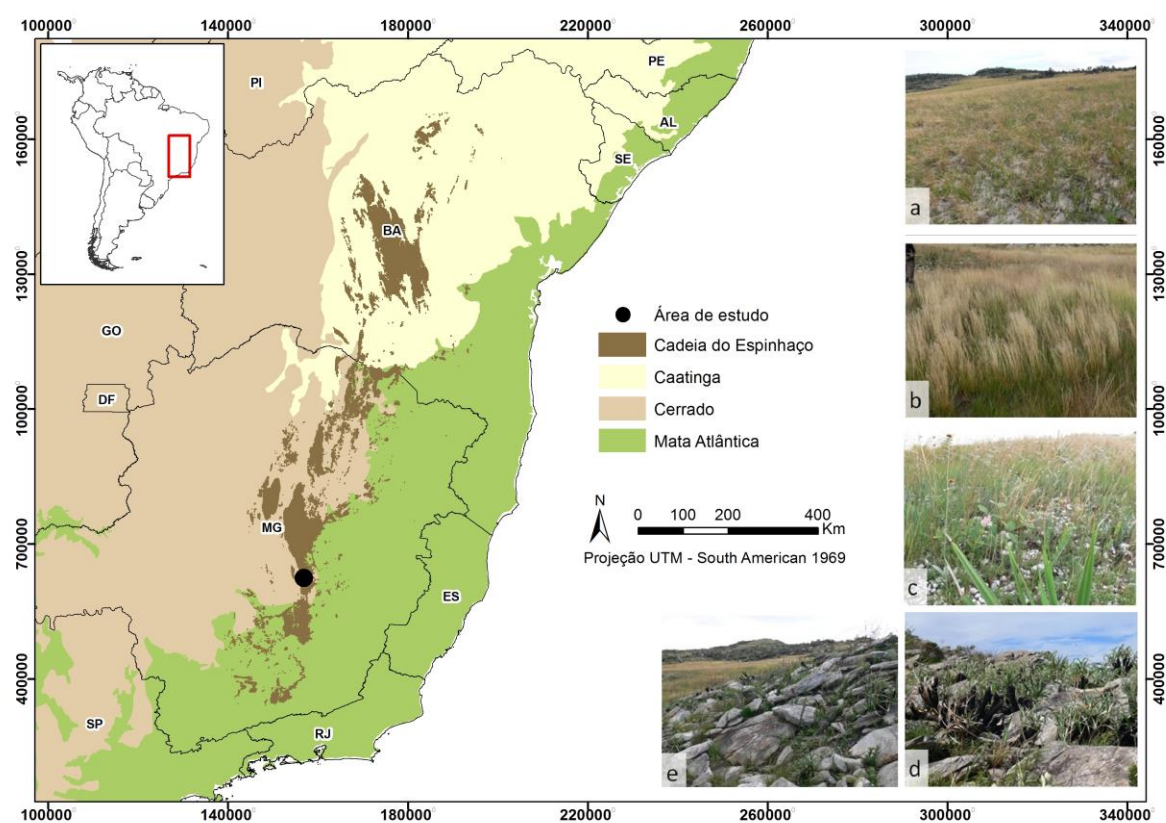


Figura 8: Fisionomias presentes na área de campos rupestres selecionadas para o presente estudo: (a) Campo arenoso, (b) Campo úmido, (c) Campo pedregoso, (d) afloramento 1 e, (e) afloramento 2, demonstrando a grande diversidade de tipologias e cobertura vegetal na Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil.

2.2. A plataforma aérea e planejamento da missão

Para obtenção das fotografias utilizamos uma câmera digital Canon, modelo Power Shot S100, com 12.1 Megapixel de resolução e distância focal de 5.2mm, embarcada em RPAS elétrico modelo GPlane, desenvolvido pela empresa 3D Robotics, e controlado remotamente por meio de uma estação base. As missões de vôo foram realizadas em quatro dias, ao longo de quatro meses, agosto, outubro, novembro e dezembro de 2015.

Para o planejamento das missões utilizamos um programa livre desenvolvido para RPAS, o *Mission Planer* (ver maiores detalhes em <http://planner.ardupilot.com/>), onde são especificados os parâmetros para cada vôo, como a extensão da área fotografada, a resolução espacial (tamanho do píxel) e altura de vôo em relação ao solo e porcentagem de sobreposição entre as fotografias. A partir dos parâmetros estabelecidos, o programa gera um trajeto que é coberto pela aeronave, sobre o qual serão obtidas as fotografias (Figura 9).

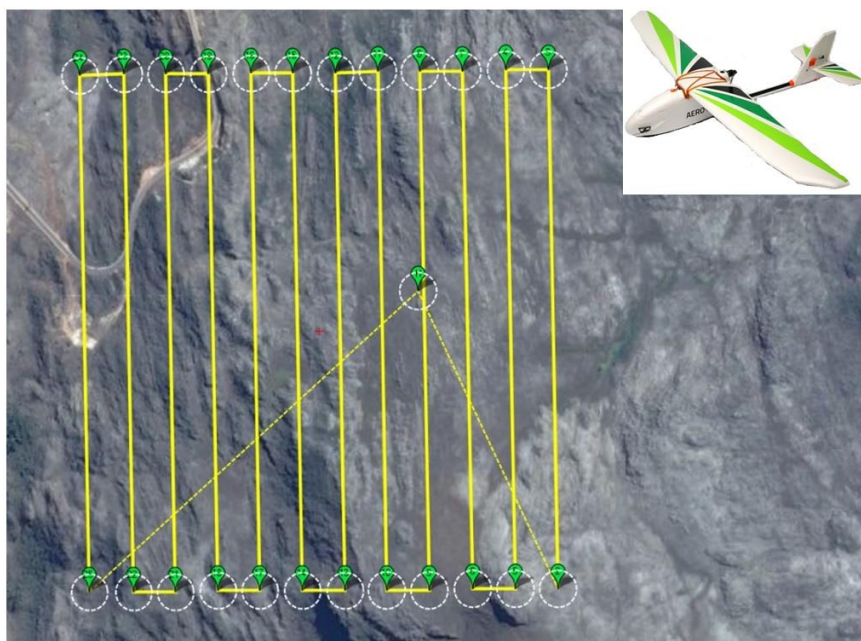


Figura 9: Plano de vôo de uma área a ser fotografada pelo RPAS, Serra do Cipó, MG, Sudeste do Brasil. No canto superior direito, o modelo GPlane utilizado para o imageamento.

Buscamos efetuar as missões dentro da janela de horários centrais do dia (entre as 12h e 14h), para minimizar o efeito de ângulo do Sol, evitando quanto possível a formação de sombras, assim como os dias selecionados para realização dos vôos apresentaram céu com pouca cobertura de nuvens. As missões foram delimitadas pelas coordenadas UTM (Zona 23) $x/y=647461/7866218$; $648261/7866218$; $647461/7865418$; $648261/7865418$. Ao todo foram imageados 640.000 m^2 (ou 64 ha), e a altura de vôo definida para 200m acima do ponto inicial da missão.

2.3. Processamento e análise das imagens

Todo o processamento das imagens foi realizado no programa Pix4Dmapper (<https://pix4d.com>). A partir das imagens obtidas pelo RPAS geramos mosaicos (composição de imagens vizinhas formando uma imagem única), que em seguida passaram por processo de ortoreificação, no qual a imagem sofre uma correção, para minimizar os efeitos da topografia. A geração dos ortomosaicos é composta de uma série de etapas. Inicialmente é feito o processamento em que o software extrai automaticamente *keypoints* para calcular a localização real e demais parâmetros das imagens. Em seguida ocorre a geração e adensamento da nuvem de pontos em que cada ponto contém informações espaciais (posicionamento X, Y e Z) e de cores (RGB) gerando-se assim uma nuvem de pontos tridimensional que é utilizada para modelar o terreno e gerar o ortomosaico. A partir da nuvem de pontos cria-se uma superfície tridimensional texturizada composta por triângulos (*Mesh*) que também é utilizada na geração do modelo de superfície e do ortomosaico. Então, a partir da nuvem de pontos e da superfície texturizada é gerado o modelo digital de superfície (DSM) e o ortomosaico através da utilização de técnicas de interpolação.

Para acessar as informações da vegetação captada nas imagens, utilizamos uma técnica baseada na extração da proporção do canal verde de cada pixel, refletido pelas estruturas vegetais (Ponzoni & Shimabukuro 2007). Para tal procedimento, usamos o software PhenoVIS, desenvolvido em colaboração com a Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Instituto de Computação UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, São Paulo (Schnorr et al., 2016). Este software toma como base o índice RGB Chromatic Coordinate (RGBcc), capaz de separar as proporções dos três canais de cores (vermelho, verde e azul) a partir de uma transformação não linear do número digital (DN) da fotografia (para detalhes dos índices, ver Sonnentag et al., 2012), porém utilizando a interpretação de cada pixel. Para a técnica aqui apresentada, apenas o canal verde foi utilizado como base de interpretação, por possibilitar inferências diretas a respeito das mudanças ocorridas na vegetação em uma série temporal de dados.

A equação referente ao índice Gcc é, portanto:

$$G_{cc} = G / [R + G + B]$$

Sendo G a proporção relativa do canal verde, R a proporção relativa do canal vermelho, e B a proporção relativa do canal azul.

Uma vez que a proporção dos três canais é normalizada, a soma dos mesmos pode variar de 0 a 1. Desse modo, quando as proporções são idênticas e a soma é igual a 0, a cor resultante é a preta; enquanto as proporções idênticas que somadas resultam em 1 (ou 0,333 para cada canal), a cor resultante é a branca. As demais cores serão variações nas proporções de contribuição de cada um dos canais.

Devido ao fato do software PhenoViewer estar em processo de desenvolvimento durante a realização deste estudo (por equipe do Instituto de Computação UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas, São

Paulo), não foi possível extrair amostras das proporções dos canais RGB das imagens adquiridas por meio do RPAS. Assim, usamos como base de análise os valores obtidos em processamentos anteriores, aplicados à torre fenológica (ver capítulo 1), para as quais encontramos valores dentro da faixa entre 0.33 e 0.38 de contribuição do canal verde para as quatro fisionomias básicas dos campos rupestres, descritas no item 2.1 (Figura 8). Para cada valor de contribuição do canal verde dos pixels, entre 0.33 e 0.38, foi atribuída aos mesmos uma cor estabelecida em uma paleta pré-definida (figura 10).



Figura 10: Paleta de cores atribuídas aos valores de contribuição do canal verde de cada pixel presente na imagem. A porcentagem de contribuição de verde compreendeu o intervalo entre 0.33 e 0.38.

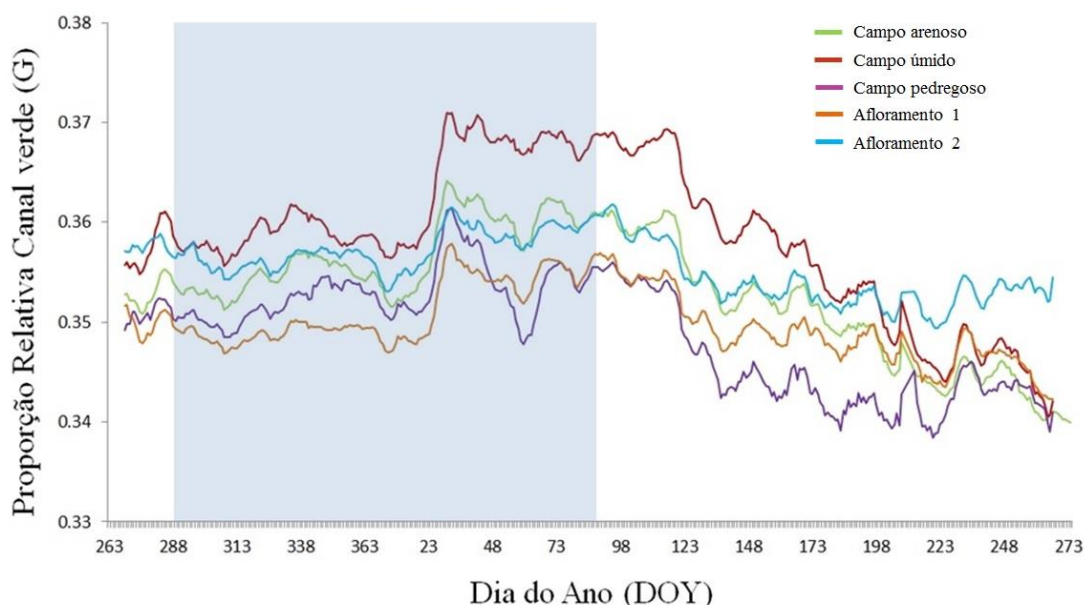


Figura 11: Proporção relativa do canal verde para as quatro fisionomias principais encontradas na área de campos rupestres, o campo arenoso, campo úmido, campo pedregoso e afloramento rochoso, com variação aproximada entre 0.33 e 0.38. O retângulo em azul representa a estação chuvosa para o período estudado, de Outubro de 2013 a Março de 2014, como definido em Madeira & Fernandes (1999). No eixo x, o tempo representado em Dias Julianos (DOY – Day Of Year), notação comumente utilizada em estudos envolvendo eventos cíclicos.

3. Resultados

Após o processamento e associação da paleta de cores às imagens obtidas pelo RPAS, o resultado foi uma substituição dos pixels contendo as informações dos três canais de cor (RGB), pelos pixels compostos

apenas pela informação de contribuição do canal de cor verde, resultantes da extração por meio do índice Gcc. Para comparação das proporções de pixels refletindo as diferentes faixas de porcentagens para as diferentes datas, foi criado um histograma (Figura 12), no qual é possível identificar variações quanto à contribuição do canal verde pela paisagem. As mudanças em relação à quantidade de pixels são interpretadas a partir da espessura das faixas referentes à paleta de cores. Dessa forma, observa-se que do mês de agosto ao mês de outubro houve uma elevação quanto ao número de pixels contribuindo na faixa de 0.378 a 0.38 (correspondendo aos tons roxos da paleta); também podemos notar uma redução da quantidade de pixels contribuindo na faixa correspondente entre 0.33 e 0.34 (tons marrons na paleta).

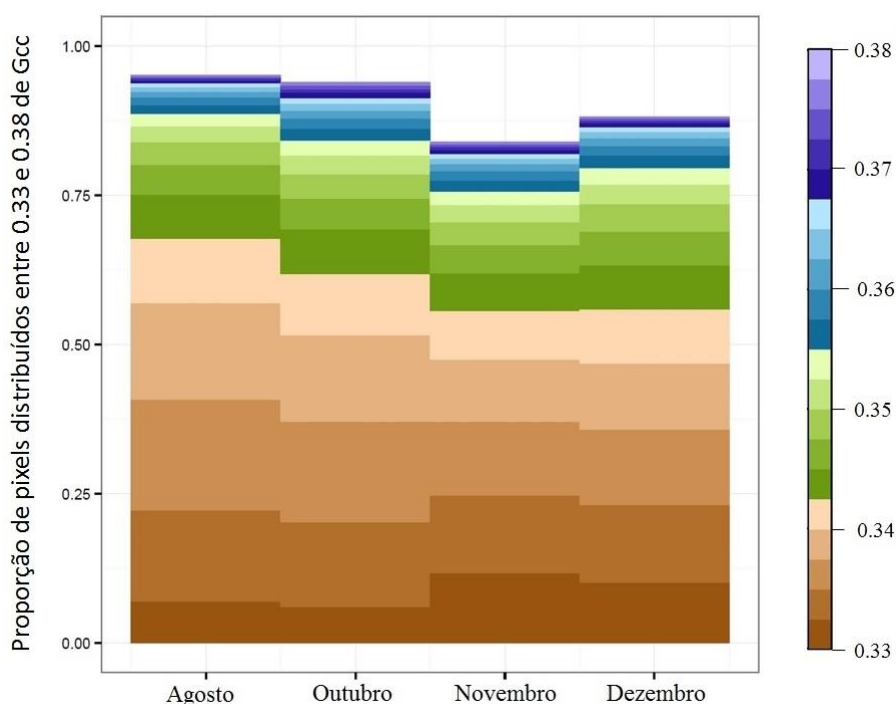
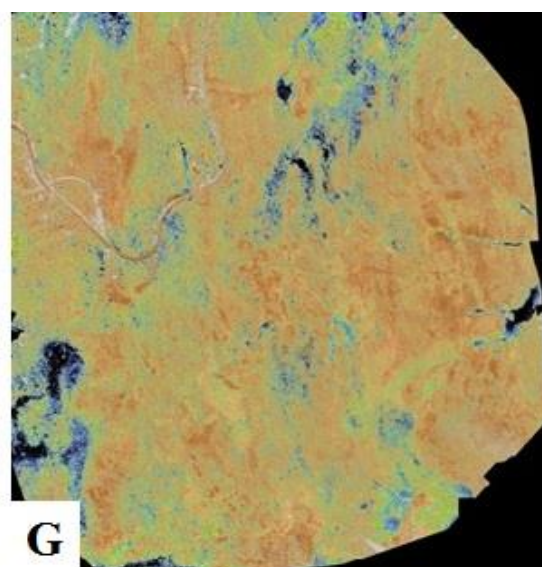
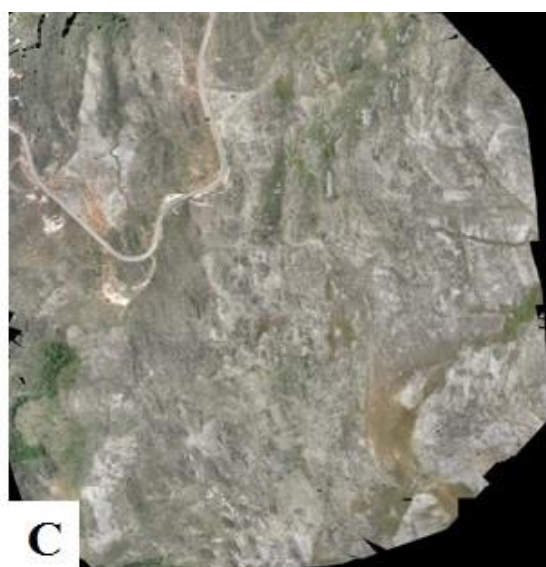
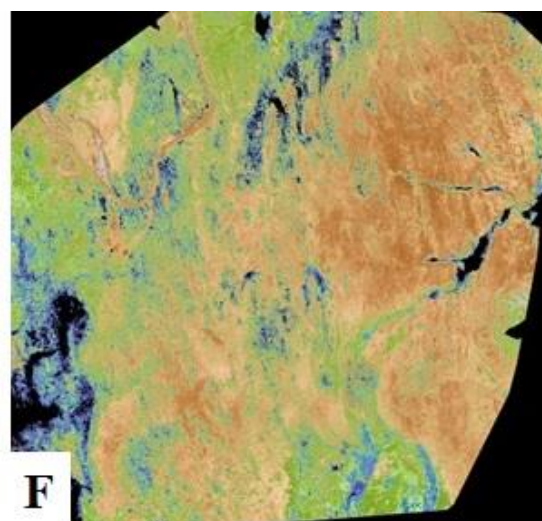
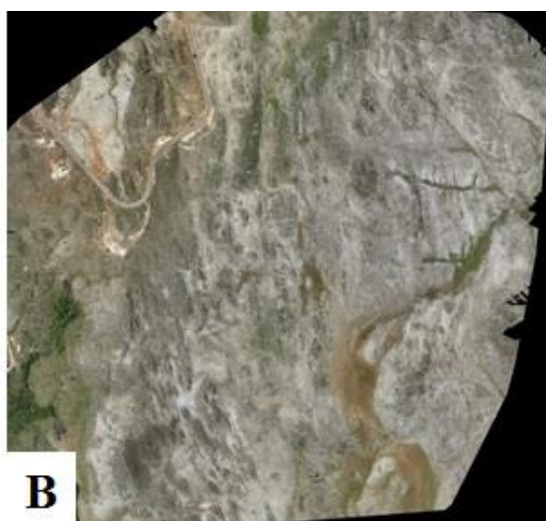
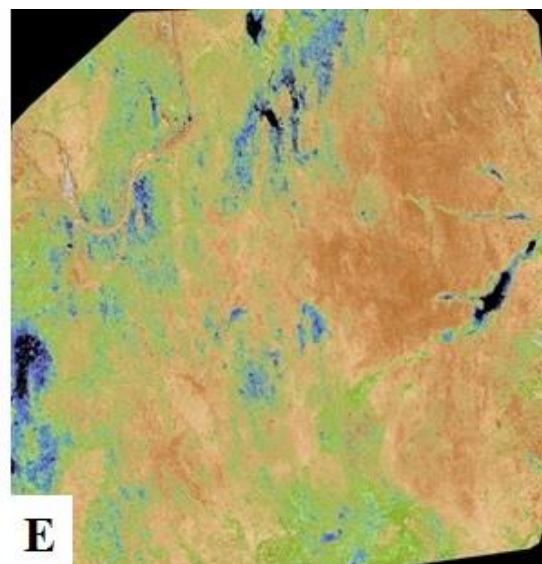
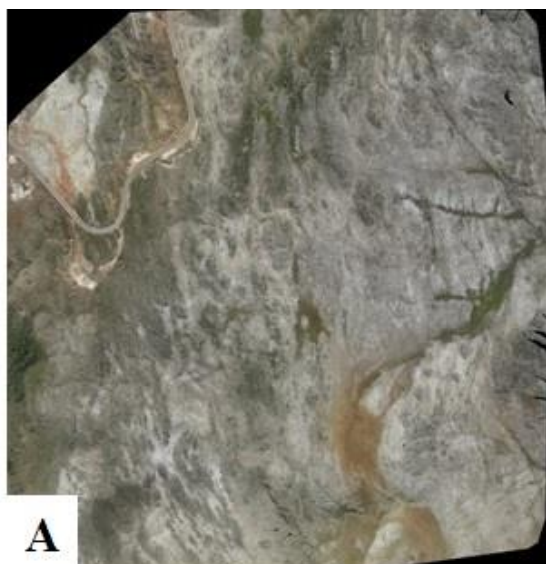


Figura 12: Variação da proporção de pixels em diferentes faixas de contribuição do canal verde para as quatro datas de imagens.

A variação observada no histograma pode ser confirmada pelas imagens processadas, considerando inicialmente a predominância dos tons marrons (até aproximadamente 0.34 de proporção de verde) no primeiro processamento referente ao mês de agosto (Figura 13E), sendo substituída gradativamente por tons verdes (entre 0.34 e 0.355 de proporção de verde) nos processamentos subsequentes (outubro, novembro e dezembro, nas Figuras 13F a 13H, respectivamente).



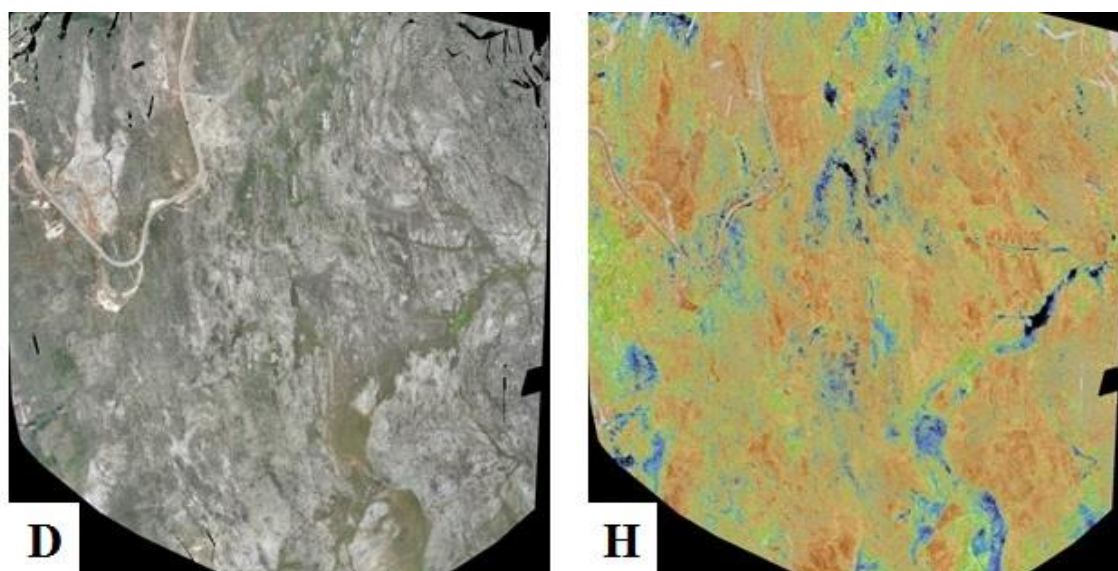


Figura 13: À esquerda as imagens obtidas por meio do RPAS (Aeronave Remotamente pilotada), apresentando alta resolução espacial (aproximadamente sete centímetros) após os processos de criação dos mosaicos para quatro meses (A) agosto, (B) outubro, (C) novembro e (D) dezembro de 2015). Na coluna direita, aos meses respectivos (E a H) foram atribuídas cores pré-estabelecidas em uma paleta para as porcentagens de contribuição do canal verde variando de 0.33 a 0.38.

4. Discussão

Este estudo preliminar evidenciou os benefícios proporcionados pela utilização de RPAS como ferramenta de aquisição de informações em alta resolução espacial e temporal, associados a técnicas de processamento de imagens, que permitiram a observação de mudanças sutis no ambiente. A nossa proposta mostrou a possibilidade de análise da paisagem baseada não somente na presença ou ausência de habitats e na distribuição dos mesmos, mas também no seu estado funcional, representados pelos momentos fenológicos de cada comunidade. Dessa forma, podemos perceber a conectividade da paisagem no espaço e no tempo e a sua funcionalidade, por exemplo, como podem ser oferecidos os recursos aos diferentes organismos - seja recurso alimentar, abrigo ou para fins reprodutivos (ver Crawley 1983, Sharma 2010, Schellhorn et al., 2015, Morellato et al., 2016). Portanto, apresentamos a possibilidade inovadora de interpretarmos o ambiente e suas interações, relacionando técnicas de sensoriamento remoto próximo com observação temporal de ambientes naturalmente heterogêneos.

A partir das imagens obtidas pelo RPAS, pudemos identificar variações em diferentes comunidades em relação à sua expressão na paisagem, baseada na reflexão do canal verde, podendo estar relacionado às variações abióticas no ambiente, tais como pluviometria e temperatura, as quais são sentidas de forma rápida pela vegetação (Santos & Carlesso, 1998; Sims & Gamon 2002). As mudanças observadas no mosaico natural de campo rupestre podem, se avaliadas em um período mais prolongado, ser responsáveis por

alterações nos comportamentos de organismos atuantes nesta escala espacial, uma vez que esta dinâmica deve promover alterações na estrutura da paisagem, com influências sobre a conectividade entre as diferentes fitofisionomias (Gustafson & Gardner, 1996). A relação entre as comunidades vegetais locais e os fatores abióticos como temperatura, precipitação e solos faz dos campos rupestres ambiente altamente peculiar, com distintas respostas da vegetação de acordo com as espécies presentes nas comunidades (Silveira et al., 2015; Le Stradic et al., 2014a, 2014b), estando susceptível às mudanças em determinado momento.

Apesar das grandes vantagens comprovadas pela utilização de RPAS, o planejamento das missões, os métodos e o processamento devem ser minuciosos, uma vez que têm como base uma unidade altamente susceptível às variações diversas, o pixel. Considerando a grande quantidade de pixels em uma imagem de alta resolução, devemos buscar padronizar o quanto possível as variáveis que podem influenciar no resultado de sua expressão, desde a hora em que as fotografias são obtidas até o número de pixels analisados.

Ainda que observado o crescimento das aplicações de RPAS em pesquisas ambientais, pouco foi verificado desses sistemas sendo utilizados para observação de plantas, e menos ainda sob uma perspectiva temporal. Desse modo este estudo, ainda que preliminar, é inédito e o propõe uma forma de estudar o ambiente em espaço e tempo, deixando de considerá-lo como estático e também assumindo que as variações no ambiente não são respondidas de forma equitativa pelas comunidades ali presentes. Como observado por Turner (1989), os modelos são necessários para estudo das mudanças nas paisagens, pois frequentemente os experimentos não podem ser realizados na escala espacial e temporal ideal. Com os rápidos avanços na área dos veículos aéreos não tripulados e também de extração de informações da paisagem por meio de imagens digitais, entretanto, vemos que cada vez mais esta afirmação poderá ser questionada.

5. Referências

ALBERTON B.; ALMEIDA J.; HELM R.; TORRES R.S.; MENZEL A.; MORELLATO L.P.C. 2014. Using phenological cameras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation. *Ecological Informatics*. 19:62-70.

ANDERSON K.; GASTON K.J. 2013. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*. DOI:10.1890/120150.

ASNER G.P.; HUGHES R.F.; MASCARO J.; UOWOLO A.L.; KNAPP D.E.; JACOBSON J.; KENNEDY-BOWDOIN T.; CLARK J.K. 2011. High-resolution carbon mapping on the million-hectare Island of Hawaii. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 9:424-439.

- ATHAYDE E.A.; MORELLATO L.P.C. 2014. Anthropogenic edges, isolation and the flowering time and fruit set of *Anadenanthera peregrina*, a cerrado savanna tree. *International Journal of Biometeorology*. 58:443-454.
- BAGUETTE M.; DYCK H.V. 2007. Landscape connectivity and animal behavior: functional grain as a key determinant for dispersal. *Landscape Ecology*. 22:1117-1129.
- BENITES V.M.; CAIAFA A.N.; MENDONÇA E.S.; SCHAEFER C.E.; KER J.C. 2003. Solos e vegetação nos complexos rupestres de altitude da Mantiqueira e do Espinhaço. *Floresta e Ambiente*. 10:76-85.
- BÉLISLE M. 2005. Measuring landscape connectivity: the challenge of behavioral landscape ecology. *Ecology*. 8:1988-1995.
- CHAPIN III F.S.; BLOOM A.J.; FIELD C.B.; WARING R.H. 1987. Plant Responses to Multiple Environmental Factors. *BioScience*. 37:49-57.
- CLELAND E.E.; CHIARIELLO N.R.; LOARIE S.R.; MOONEY H.A.; FIELD C.B. 2006. Diverse responses of phenology to global changes in a grassland ecosystem. *PNAS*. 103:13740-13744.
- CLELAND E.E.; CHUINE I.; MENZEL A.; MOONEY H.A.; SCHWARTZ M.D. 2007. Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*. 22:357-365.
- CRAWLEY M.J. 1983. *Herbivory. The dynamics of animal-plant interactions* Oxford: Blackwell Sci. 437 pp.
- FAHRIG L. 2003. Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 34:487-515.
- FAHRIG L.; BAUDRY J.; BROTONS L.; BUREL F.G.; CRIST T.O.; FULLER R.J.; SIRAMI C.; SIRIWARDENA G.M.; MARTIN J.L. 2011. Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters*. 14:101-112.
- FORMAN R.T.T. 1995. Some general principles of landscape and regional ecology. *Landscape Ecology*. 10:133-142.
- FRITTS, H. C. **Tree ring and climate**. London: Academic Press, 1976. 567 pp.

- GITELSON A.A.; KAUFMAN Y.J.; MERZLYAK M.N. 1996. Remote Sensing of Environment. 58:289-298.
- GUSTAFSON E.J.; GARDNER R.H. 1996. The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization. Ecology. 77:94-107.
- HSIAO T.C.; ACEVEDO E. 1974. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. Agricultural Meteorology. 14:59-84.
- JEONG S.J.; HO C.H.; GIM H.J.; BROWN M.E. 2011. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the Northern Hemisphere for the period 1982–2008. Global Change Biology. 17:2385-2399.
- KOH L.P.; WICH S.A. 2012. Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation. Conservation Letter. 5:121-132.
- KÖPPEN W. 1931. Grundriss der Klimakunde. Gruyter, Berlin.
- KREWENKA K.M.; HOLZSCHUH A.; TSCHARNTKE T.; DORMANN C. F. 2011. Landscape elements as potential barriers and corridors for bees, wasps and parasitoids. Biological Conservation. 144:1816-1825.
- LE STRADIC S.; BUISSON E.; FERNANDES G.W. 2014a. Restoration of Neotropical grasslands degraded by quarrying using hay transfer. Applied Vegetation Science. 17:482-492.
- LE STRADIC S.; BUISSON E.; NEGREIROS D.; CAMPAGNE P.; FERNANDES G.W. 2014b. The role of native woody species in the restoration of campos rupestres in quarries. Applied Vegetation Science. 17:109-120.
- LIANG L.; SCHWARTZ M.D. 2009. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. Landscape Ecology. 24:465-472.
- LIANG L.; SCHWARTZ M.D.; FEI S. 2011. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. Remote Sensing of Environment. 115:143-157.
- LIETH H. 1974. Purposes of a Phenology Book. In: Lieth H. Phenology and Seasonality Modeling. Springer. v.8. pp. 3-19.

- MADEIRA J.A. & FERNANDES G.W. 1999. Reproductive phenology of sympatric taxa of Chamaecrista (Leguminosae) in Serra do Cipo, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*. 15:463-479.
- MARTENSEN A.C.; RIBEIRO M.C.; BANKS-LEITE C.; PRADO P.I.; METZGER J.P. 2012. Associations of Forest Cover, Fragment Area, and Connectivity with Neotropical Understory Bird Species Richness and Abundance. *Conservation Biology*. p.1-12.
- METZGER J.P.; MARTENSEN A.C.; DIXO M.; BERNACCI L.C.; RIBEIRO M.C.; TEIXEIRA A.M.G.; PARDINI R. 2009. Time-lag in biological responses to landscape changes in a highly dynamic Atlantic forest region. *Biological Conservation*. 142:1166-1177.
- MORELLATO L.P.C.; TALORA D.C.; TAKAHASI A.; BENCKE C.C.; ROMERA E.C. 2000. Phenology of Atlantic Rain Forest trees: a comparative study. *Biotropica*. 32:811-823.
- MORELLATO P.C.; LEITÃO-FILHO H.F. 1996. Reproductive phenology of climbers in a Southeastern Brazilian Forest. *Biotropica*. 28:180-191
- MORELLATO, L. P. C.; CAMARGO, M. G. G.; D'EÇA NEVES, F. F.; LUIZE, B. G.; MANTOVANI, A.; HUDSON, I. L. 2010. The influence of sampling method, sample size, and frequency of observations on plant phenological patterns and interpretation in tropical forest trees. In: Hudson, I. L.; Keatley, M. (Org.). *Phenological Research: Methods for Environmental and Climate Change Analysis*. 1ed.: Springer, p. 99-121.
- MORELLATO L.P.C.; CAMARGO M.G.G.; GRESSLER E. 2013. A review of plant phenology in South and central America. In: *Phenology: An integrative environment science*. Springer, pp. 91-113.
- MORELLATO L.P.C.; ALBERTON B.; ALVARADO S.T.; BORGES B.D.; BUISSON E.; CAMARGO M.G.G.; CANCIAN L.F.; CARSTENSEN D.W.; ESCOBAR D.F.E.; LEITE P.T.P.; MENDOZA I.; ROCHA N.M.W.B.; SILVA T.S.F.; SOARES N.C.; STAGGEMEIER V.G.; STREHER A.S.; VARGAS B.C.; PERES C.A. 2016. Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation*.
- MENZEL A.; ESTRELLA N.; FABIAN P. 2001. Spatial and temporal variability of the phenological seasons in Germany from 1951 to 1996. *Global Change Biology*. 7:657-666.
- MENZEL A.; SPARKS T.H.; ESTRELLA N.; KOCH E.; AASA A.; AHAS R.; ALM-KUBLER K.; BISSOLLI P.; BRASAVSKÁ 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

Ø.; PEÑUELAS J.; PIRINEN P.; REMIŠOVÁ 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*. 12:1–8.

MORISSETTE J.T.; RICHARDSON A.D.; KNAPP A.K.; FISHER J.I.; GRAHAN E.A.; ABATZOGLOU J.; WILSON B.E.; BRESHEARS D.D.; HENEERY G.M.; HANES J.M.; LIANG L. 2009. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 7:253-260.

NEWCOME, L.R. 2004. Unmanned aviation: a brief history of unmanned aerial vehicles. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1st Ed. ISBN 1-56347-644-4.

PANEQUE-GÁLVEZ J.; MCCALL M.K.; NAPOLETANO B.M.; WICH S.A.; KOH L.P. 2014. Small drones for community-based forest monitoring: an assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forests*. 5:1481-1507.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 127 p.

RAPINI A.; RIBEIRO P.L.; PIRANI J.R. 2008. A flora dos campos rupestres da Cadeia do Espinhaço. *Megadiversidade*. 4:15-23.

REICH P.B. 1995. Phenology of tropical forests: patterns, causes, and consequences. *Canadian journal of Botany*. 73:164-174.

REED B.C.; BROWN J.F.; VANDERZEE D.; LOVELAND T.R.; MERCHANT J.W.; OKLEN D.O. 1994. Measuring phenological variability from satellite imagery. *Journal of Vegetation Science*. 5:703-714.

RIBEIRO M.C.; METZGER J.P.; MARTENSEN A.C.; PONZONI F.J.; HIROTA M.M. 2009. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. *Biological Conservation*. 142:1141-1153.

RICHARDSON A.D.; JENKINS J.P.; BRASWELL B.H.; HOLLINGER D.Y.; OLLINGER S.V.; SMITH M-L. 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia*. 152:323-334.

- RICHARDSON A.D.; BRASWELL B.H.; HOLLINGER D.Y.; JENKINS J.P.; OLLINGER S.V. 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecol. Appl.* 19: 1417-1428.
- RICHARDSON A.D.; KEENAN T.F.; MIGLIAVACCA M.; RYU Y.; SONNENTAG O.; TOOMEY M. 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*. 169:156-173.
- SANTOS R.F.; CARLESSO R. 1998. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 2:287-294.
- SCHELLHORN N.A.; GAGIC V.; BOMMARCO R. 2015. Time will tell: resource continuity bolsters ecosystem services. *Trends in Ecology and Evolution*. 30:524-530.
- LEITE, R.A.; SCHNORR L.; ALMEIDA J.R.; TORRES R.S.; ALBERTON B.; MORELLATO L.P.C.; COMBA J. 2016. PhenoVis – Visual Phenological Analysis of Forest Ecosystems Information Sciences. *Em revisão*.
- SCHWARTZ M.D. 2003. Phenology: An Integrative Environmental Science. In: Schwartz M.D. (Ed.). Springer. 332 pp.
- SHARMA M.V.; SHAANKER R.U.; LEATHER S.R.; VASUDEVA R.; SHIVANNA K.R. 2011. Floral resources, pollinators and fruiting in a threatened tropical deciduous tree. *Journal of Plant Ecology*. 4:259-267.
- SIMS D.A. & GAMON J.A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structure and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*. 81:337-354.
- SILVEIRA F.A.O.; NEGREIROS D.; BARBOSA N.P.U.; BUISSON E.; CARMO F.F.; CARSTENSEN D.W.; CONCEIÇÃO A.A.; CORNELISSEN T.G.; ECHTERNACHT L.; FERNANDES G.W.; GARCIA W.S.; GUERRA T.J.; JACOBI C.M.; LEMOS-FILHO J.P.; LE STRADIC S.; MORELLATO L.P.C.; NEVES F.S.; OLIVEIRA R.S.; SCHAEFER C.E.; VIANA P.L.; LAMBERS H. 2015. Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant Soil*. DOI 10.1007/s11104-015-2637-8.
- SONNENTAG O.; HUFKENS K.; TESHARA-STERNE C.; YOUNG A.M. ; FRIEDL M. ; BRASWELL B.H.; MILLIMAN T.; O'KEEFE J.O.; RICHARDSON A.D. 2012. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. 152:159-177.

SPANNER M.A.; PIERCE L.L.; PETERSON D.L.; RUNNING S.W. 1990. The influence of canopy closure, understory vegetation and background reflectance. *International Journal of Remote Sensing*. 11:95-111.

SPEER, J.H., 2010. *Fundamentals of Tree-Ring Research*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona.

TAYLOR P.D.; FAHRIG L.; HENEIN K.; MERRIAM G. 1993. Connectivity is a vital element of landscape structure. *Oikos*. 68:571-573.

TISCHENDORF L.; FAHRIG L. 2000. On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*. 90:7-19.

TURNER M.G. 1989. Landscape Ecology: the effect of pattern and process. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 20:171-197.

TURNER W.; SPECTOR S.; GARDINER N.; FLADELAND M.; STERLING E.; STEININGER M. 2003. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*. 18:306-314.

UEZU A.; METZGER J.P.; VIELLIARD J.M.E. 2005. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. *Biological Conservation*. 123:507-519.

VAN SCHAIK C.P.; TERBORGH J.W.; WRIGHT S.J. 1993. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 24:353-377.

VERBESSELT J.; HYNDMAN R.; ZEILEIS A.; CULVENOR D. 2010, Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*. 114:2970-2980.

WATTS A.C.; AMBROSIA V.G.; HINKLEY E.A. 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*. 4:1671-1692.

WIENS J.; SUTTER R.; ANDERSON M.; BLANCHARD J.; BARNETT A.; AGUILAR-AMUCHASTEGUI N.; AVERY C.; LAINE S. 2009. Selecting and conserving lands for biodiversity: The role of remote sensing. *Remote Sensing of Environment*. 113:1370-1381.

6. Conclusão final

A combinação de duas diferentes técnicas para estudo da fenologia das comunidades vegetais, as fenocâmeras e as imagens obtidas por meio de drones, surgem como uma complementação importante aos estudos tradicionais de acompanhamento dos ciclos naturais das plantas. A alta frequência de obtenção de dados aliada à qualidade das imagens, elevou o potencial das análises a respeito de como diferentes fitofisionomias estão respondendo às variáveis ambientais, podendo estas respostas serem detectadas por meio das mudanças entre as proporções de cores refletidas pelas plantas.

Por sua vez, a utilização de veículos aéreos capazes de captar fotografias da paisagem em alta resolução espaço-temporal, quando associados ao crescente desenvolvimento de programas voltados ao processamento destas imagens, apresentou nova oportunidade de ampliarmos as possibilidades em responder a perguntas mais complexas envolvendo processos ecológicos, a partir do momento em que passamos a observar a paisagem sob uma dimensão temporal cada vez mais finas.

A grande demanda técnica existente, como possibilidade de realizar atividades com sistemas aéreos não tripulados em grandes áreas ou locais povoados, assim como programas eficazes com grande capacidade de processar o excepcional volume de dados gerados, têm se mostrado como fatores limitantes em estudos como estes, em que uma grande quantidade de informações é obtida em curto período de tempo. A supressão destas demandas certamente permitirá o avanço de forma mais rápida tanto para os campos voltados à pesquisa quanto outros que também utilizam destas tecnologias.

O uso destas técnicas combinadas, portanto, se mostra de grande utilidade às novas pesquisas envolvendo as respostas das diferentes formas de vegetação, em especial quando são levados em conta aspectos relacionados às alterações do clima nos últimos anos, bem como na tomada de decisões que envolvam o entendimento da paisagem ao mesmo tempo numa escala geográfica mais ampla, mas também capaz de detectar padrões de variações em elevado detalhamento espaço-temporal.