ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

Índice de vegetação por diferença normalizada para caracterização da dinâmica florestal no parque estadual Quarta Colônia, estado do Rio Grande do Sul - Brasil

Caroline L. Mallmann¹; Diego de Almeida Prado²; Waterloo Pereira Filho³

¹ Engenheira Florestal – Secretaria do Meio Ambiente, Rua Roque Calage, 8 - Centro, Santa Maria – RS. Autor correspondente. E-mail: carol.mallmann@hotmail.com. ² Doutorando do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Cx postal 5021, Camobi – Santa Maria/RS – diegoprado1@gmail.com. ³ Professor doutor da Universidade Federal de Santa Maria, Av. Roraima, 1000, Cx postal 5021, Camobi – Santa Maria/RS – waterloopf@gmail.com.

Artigo submetido em 06/05/2015 e aceite em 28/12/2015.

RESUMO

O Parque Estadual Quarta Colônia – PEQC localiza-se em área de ocorrência das Florestas Estacionais subtropicais, inserida no Bioma Mata Atlântica, compreendendo fragmentos remanescentes de floresta secundária em diferentes idades. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI pode ser utilizado para distinguir e classificar florestas primárias e secundárias em diferentes estágios de regeneração, já que este apresenta uma relação direta com a biomassa. A presente pesquisa tem por objetivo caracterizar e quantificar os remanescentes florestais no PEQC através da aplicação do NDVI, afim de contribuir para a compreensão dos processos de sucessão e dinâmica da vegetação, além de identificar, localizar e quantificar as áreas degradadas. Para a realização do estudo foram utilizadas imagens do Sistema RapidEye e para o processamento digital das imagens foram empregados os softwares MultiSpec e Spring. O NDVI apresentou correlação de 98% com os estágios de desenvolvimento florestal, apresentando valores superiores a 0,8 em áreas de floresta com idade superior a 70 anos. No mapeamento a partir do NDVI, ficou confirmada a presença de um mosaico sucessional, onde as porções mais conservadas das florestas encontram-se em áreas de declividade acentuada, destacando-se o número significativo de áreas degradadas. A aplicação do NDVI se mostrou altamente eficiente para a compreensão espacial da dinâmica florestal para a tipologia de floresta analisada, auxiliando na tomada de decisão para aplicação da Lei 11.428/06. As técnicas de sensoriamento remoto da vegetação são ferramentas importantes para o planejamento e monitoramento dos processos ecológicos, contribuindo diretamente para a gestão de unidades de conservação.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto da Vegetação, Floresta Estacional Subtropical, Bioma Mata Atlântica.

Normalized difference vegetation index for characterization of forest dynamic in parque estadual Quarta Colônia, Rio Grande do Sul State - Brazil

ABSTRACT

The Parque Estadual Quarta Colônia – PEQC is located in area of occurrence of subtropical seasonal forests, inserted into Atlantic Forest biome, comprising remaining fragments of secondary forest in different ages. The Normalized Difference Vegetation Index – NDVI can be used to distinguish and classify primary forests and secondary forests in different regeneration stages, once this has a direct relationship with biomass. The present study aims to characterize and quantify the remaining forests in SPFC applying the NDVI, in order to contribute to understanding succession processes and dynamics of vegetation, in addition to identify, locate and quantify degraded areas. For realization of the study were used images from RapidEye and for digital processing of images were employed software MultiSpec and Spring. The NDVI showed a 98% correlation with the stages of forest development, with values greater than 0.8 in forest areas over the age of 70 years. The mapping from NDVI, it was confirmed the presence of a successional mosaic, where the more conserved portions of the forests are in steep slope areas, highlighting the significant number of degraded areas. The application of NDVI was highly efficient for spatial understanding of forest dynamics to the typology of forest analyzed, assisting in making decision for adoption of Law 11.428 / 06. The remote sensing techniques of vegetation are important tools for planning and monitoring of ecological processes, contributing directly to the management of conservation units.

Keywords: Remote Sensing of Vegetation, Subtropical Seasonal Forests, Atlantic Forest Biome.

Introdução

Os processos de degradação e perda de cobertura florestal, promovidos pela expansão agrícola no período colonial, seguidos da industrialização e urbanização tem afetado profundamente a Mata Atlântica, reduzida a aproximadamente 11,7 % da sua cobertura original no Brasil (Ribeiro et al., 2012), tornando o bioma uma prioridade global para conservação da biodiversidade, ou seja, um hotspot de biodiversidade (Mittermeier et al., 2005).

A Mata Atlântica foi convertida em paisagens humanas modificadas, altamente dinâmicas, composta por remanescentes florestais em processo constante de fragmentação. Estes efeitos têm sido avaliados por meio de medidas das características biofísicas em fragmentos, visando indicar a integridade da floresta sob os aspectos estrutural e funcional (Gascon et al., 2001), demandando um trabalho de campo extenso e dispendioso.

A fusão entre as técnicas do sensoriamento remoto e os indicadores biofísicos pode ser valiosa para diagnósticos e monitoramento em ecossistemas ameaçados como a Mata Atlântica, composta por uma paisagem altamente complexa incluindo fragmentos remanescentes em diversos estágios sucessionais de tipologias florestais distintas.

A vegetação é um dos componentes mais representativos dos ecossistemas, sendo que mais de 70% da superfície terrestre é coberta com vegetação (Jensen, 2009). O sensoriamento remoto, a partir do processamento visual e digital de imagens, pode extrair informações biofísicas da vegetação, podendo ser aplicadas a estudos sobre variações e dinâmicas dos ecossistemas florestais.

Para Novo (1998), os sensores remotos são dispositivos capazes de registrar a radiação eletromagnética, a qual é expressa em comprimentos de onda, dividida em regiões ou faixas dentro do espectro eletromagnético, onde cada alvo da superfície terrestre emite ou reflete radiação em um determinado comprimento de onda do espectro.

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais, reflexo de intensos estudos realizados por cientistas desde a década de 1960, os quais vem modelando e extraindo parâmetros biofísicos da vegetação com o uso de dados de sensoriamento remoto. O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), pode ser utilizado para monitorar mudança sazonais e interanuais no desenvolvimento e na atividade da vegetação. Além de reduzir formas de ruídos multiplicativos, ou seja, reduz as diferenças

de iluminação solar, sombras de nuvens, variações topográficas e algumas atenuações atmosféricas, presentes em múltiplas bandas de imagens de múltiplas datas (Jensen, 2009).

A radiação que chega a superfície terrestre ao atingir o alvo, a vegetação, tem parte absorvida pela folha, outra parte é refletida gerando um fenômeno denominado reflexão, faixa a qual se aplica o NDVI, e ainda uma terceira parte passa pelo processo de transmissão. As quantidades de energia absorvida ou refletida são variáveis entre espécies e dentro da própria espécie, pois dependem de fatores ambientais externos como clima e solo, os quais influenciam direta ou indiretamente nesta interação.

O bioma Mata Atlântica obteve no ano de 2006 um regime jurídico próprio, a Lei 11.428, a qual representou um grande avanço para a conservação, proteção e regeneração deste, tanto para as porções de remanescentes de vegetação primária, quanto para os fragmentos de sucessão secundária, nos estágios inicial, médio e avançado de regeneração.

Neste contexto, o NDVI, pode ser utilizado para distinguir e classificar florestas primárias e florestas secundárias em diferentes estágios de regeneração, uma vez que este apresenta uma relação direta com a biomassa (Ponzoni et al., 2009).

O Parque Estadual da Quarta Colônia é uma unidade de conservação de proteção integral, criada como forma de compensação ao dano ambiental decorrente da obra da Usina Hidrelétrica de Dona Francisca, situado na região do Rebordo do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul, área de ocorrência das Florestas Estacionais subtropicais.

A região representa o maior corredor ecológico do Estado, a qual abrange grandes remanescentes florestais, no entanto, a maior parte destas florestas são matas secundárias derivadas do abandono de atividades agrícolas. Em síntese a paisagem florestal é um mosaico composto por florestas de diferentes idades (Kilka, 2014). Ainda, o autor destaca que devido a crescente perturbação sobre os fragmentos florestais, associado a importância de entender os mecanismos de sucessão secundária, torna-se urgente o desenvolvimento de pesquisas que visem compreender os processos de sucessão secundária em florestas degradadas.

Neste contexto, a categoria Parque é uma área protegida que tem como objetivo básico a preservação de ecossistemas naturais admitindo-se a realização de pesquisas científicas e o desenvolvimento de atividades de Educação

Ambiental, recreação e turismo ecológico. Também prevê a adoção de medidas de recuperação dos ambientes degradados, a fim de que sejam atingidos os objetivos de conservação propostos (SNUC, 2000).

Este trabalho objetivou caracterizar os remanescentes florestais no Parque Estadual da Quarta Colônia através da aplicação do NDVI, a fim de contribuir para a compreensão dos processos de sucessão e dinâmica da vegetação, além de identificar as áreas degradadas para implantação de projetos e ações de restauração ecológica no interior da Unidade.

Material e métodos

Área de Estudo

O Parque Estadual Quarta Colônia (Figura 1) é uma unidade de conservação de proteção

integral, criada pelo Decreto Estadual nº 44.186 no ano de 2005, resultante da compensação ambiental decorrente da obra da Usina Hidrelétrica de Dona Francisca. Situa-se a margem esquerda do reservatório e sua área abrange parte dos municípios de Agudo e Ibarama, perfazendo um total de 1847 hectares. Os objetivos principais da unidade são a conservação dos remanescentes de Floresta Estacional Decidual, assim como espécimes da fauna e flora ameaçados de extinção (SEMA, 2010).

A região onde está inserida a área de estudo possui um clima tipo Cfa, segundo Koppen, com temperaturas variando entre -3° a 18° nos meses de inverno e superiores a 22° nos meses de verão. Apresenta uma precipitação média de 1.700 mm, bem distribuídas ao longo do ano (Moreno, 1961).

Figura 1: Mapa de Localização do Parque Estadual Quarta colônia.

Fonte: Adaptado de IBGE.

A área do parque (Figura 2) é constituída de encostas revestidas de Floresta Estacional Subtropical (Klein, 1972) ou também denominada Floresta Estacional Decidual (IBGE, 2012) em vários estágios sucessionais, pois muitas das áreas

eram ocupadas por cultivos agrícolas anterior ao processo de desapropriação para construção da usina, além de áreas de desmobilização do canteiro de obras, as quais encontram-se em processo de restauração (Marcuzzo, 2012).

Figura 2: Imagem Rapideye composição RGB_321, da área do Parque Estadual Quarta colônia. Tracejado em vermelho o limite da área do Parque.

Abordagem Metodológica

Para realização do presente estudo foram utilizadas imagens do Sistema RapidEye, composto por uma constelação de cinco satélites de sensoriamento remoto, idênticos e posicionados em órbita sincrônica com o Sol, capaz de coletar imagens em grandes áreas com alta capacidade de

revisita. Detalhamento do sistema RapidEye pode ser visto no Quadro.

Quadro 1 – Especificações técnicas gerais dos satélites do sistema RapidEye.

Especificações	Sistema RapidEye
Número de Satélites	5
Altitude da Órbita	630 km, órbita síncrona com o Sol
Hora de Passagem no Equador	11:00 hs (aproximadamente)
Velocidade	27.000 km/h
Largura da Imagem	77 km
Tempo de Revisita	Diariamente (off-nadir); 5,5 Dias (nadir)
Capacidade de Coleta	4,5 milhões de Km ² /dia
Tipo do Sensor	Multiespectral (pushbroom imager)
Bandas Espectrais	5 (Red, Green, Blue, Red-Edge, Near IR)
Resolução Espacial (nadir)	6,5 m
Tamanho do Pixel (ortorretificado)	5,0m
Armazenamento de Dados a Bordo	1.500 km de dados de imagens por órbita
Resolução Radiométrica	12 bits
Velocidade de Download (banda X)	80 Mbps

Fonte: Félix et al. (2009).

Os cinco satélites são equipados com sensor multispectral, capazes de capturar imagens em cinco bandas espectrais com um alcance de comprimento de onda entre 440nm a 850nm, inclui a banda Red-edge, específica para o monitoramento da atividade fotossintética da vegetação (Quadro 2).

Quadro 2 – Bandas espectrais dos satélites do sistema RapidEye.

Comprimento de Onda (µm)	Banda Espectral
440 – 510	Blue
520 – 590	Green
630 – 685	Red
690 – 730	Red-Edge
760 – 850	Near IR

Fonte: Félix et al. (2009).

As imagens utilizadas são ortorretificadas e com correção atmosférica, através do Modelo ATCOR3, com correção radiométrica e geométrica a partir DEM SRTM (Digital Elevation Model - Shuttle Radar Topography Mission).

Quadro 3 – Níveis de produtos do sistema RapidEye.

Nível	Sistema RapidEye
0	Imagens brutas, metadados e dados de calibração (efemérides). Somente para uso interno.
1	Produto Nível-Sensor - Imagens com correção radiométrica a partir dos dados de efemérides e atitude dos satélites.
2	Produto Geocorrigido - Imagens com correção radiométrica e geométrica a partir dos dados de efemérides e atitude dos satélites, sem uso de pontos de controle.
3	Produto Ortorretificado - Imagens com correção radiométrica e geométrica a partir de DEM SRTM (Nível 1 DTED) ou melhor, com uso de pontos de controle. Podem atingir exatidão de 6m (12,7m CE90), compatível com escala 1:25.000.

Fonte: Félix et al. (2009).

Para a classificação da cobertura florestal optou-se por utilizar o Índice da Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), um modelo resultante da combinação dos níveis de reflectância em imagens de satélites, que provém da Equação 1 (Rouse et al., 1974 apud Jensen, 2009) composta pelas respostas das bandas espectrais do vermelho e infravermelho.

Equação 1,

$$((\text{float}(B5)) - (\text{float}(B3))) / ((\text{float}(B5)) + (\text{float}(B3)))$$

Em que,

B5 – Banda do infravermelho

B3 – Banda do vermelho

A estimativa do NDVI foi obtida a partir do processamento digital da imagem, o qual foi realizado no software MultiSpec versão 3.4, desenvolvido pela Purdue Research Foundation, um sistema de processamento interativo de análise de dados de imagens multispectral e hiperespectral. Os valores normalizados para o NDVI variam no intervalo de -1 à +1, correspondendo aos valores de reflectância gerados a partir da razão simples entre os canais 3 (vermelho) e 5 (infravermelho próximo) do sensor RapidEye.

Já para a definição das classes de uso da terra foram utilizados dados secundários - Cronos

sequências da vegetação, conforme Kilka (2014), além de interpretação visual e validação a campo. A área do Parque permite um maior controle na análise e interpretação das informações, devido ao conhecimento prévio dos aspectos histórico que ocorrem na vegetação do local.

Entre os estudos desenvolvidos na unidade, destaca-se como fonte secundária de

dados utilizados no presente trabalho, o estudo realizado por Kilka (2014), o qual avaliou as cronossequências da vegetação ocorrentes no Parque Estadual da Quarta Colônia (PEQC), associando a idade da floresta aos seus usos pretéritos, onde destacou que os remanescentes florestais ocorrentes no PEQC, variam entre 5 e 70 anos de idade (Quadro 4).

Quadro 4 - Cronossequências da vegetação ocorrente no PEQC e sua relação com o uso pretérito da área e espécies dominantes.

Idade (anos)	Uso	Espécies Dominantes
8	Agricultura Familiar	<i>Tecoma stans</i> ; <i>Baccharis semisserata</i>
10	Agricultura Familiar	<i>Tecoma stans</i> ; <i>Scalonia bifida</i>
15	Agricultura Familiar	<i>Parapiptadenia rígida</i> , <i>Tecoma stans</i>
25	Agricultura Familiar	<i>Sebastiania brasiliensis</i> , <i>Cupania vernalis</i> , <i>Cordia americana</i> , <i>Ocotea puberula</i>
35	Agricultura Familiar	<i>Trichilia elegans</i> , <i>Allophylus edulis</i> , <i>Sebastiania comersoniana</i> , <i>Cupania vernalis</i> , <i>Cordia americana</i>
60	Agricultura Familiar	<i>Cupania vernalis</i> , <i>Ocotea puberula</i> , <i>Actinostemom concolor</i> , <i>Nectandra megapotamica</i> , <i>Casearia silvestris</i>
70	Agricultura Familiar	<i>Actinostemom concolor</i> , <i>Nectandra megapotamica</i> , <i>Cupania vernalis</i> .
90	Corte seletivo	<i>Sorocea bomplandii</i> , <i>Trichilia clausenii</i> , <i>Actinostemom concolor</i>
> 90	Floresta sem uso registrado	<i>Trichilia Clausenii</i> , <i>Phytollaca dioica</i> , <i>Cordia americana</i> .

Fonte: Kilka (2014), adaptado.

Para a interpretação dos dados e sua relação com os valores de NDVI, foi necessário reagrupar as idades em estágios sucessionais, ou em estágios básicos de desenvolvimento conforme adaptado por Frelich (2002) e analisado por Kilka (2014) em áreas de Florestas Estacionais Deciduais do Rebordo do Planalto Meridional Sul Brasileiro, apresenta-se da seguinte maneira para a área em estudo: 1) estágio de iniciação (até 10 anos) formado logo após o distúrbio com um estrato predominantemente arbustivo; 2) estágio de exclusão competitiva (15 à 35 anos) formam uma fisionomia florestal com grande diversidade e densidade de indivíduos, ou seja, não encontram-se estratificadas; 3) estágio de transição (50 à 60 anos) as florestas apresentam indivíduos de grande porte com uma estratificação vertical bem formada; 4) Estágio multitudes (>70 anos) na região as florestas de 70 a 90 anos apresentaram uma diversificação na composição das espécies, e estão relacionadas as florestas secundárias muito antigas ou a florestas maduras sem uso registrado ou apenas corte seletivo, ou seja, não passaram por processos de conversão do solo.

A Lei 11.428/06 que dispõe sobre a proteção da vegetação do Bioma Mata Atlântica, a qual definiu

os seguintes parâmetros básicos para definição dos estágios sucessionais, definidos no Rio Grande do Sul pela Resolução CONAMA 33/94². Onde as florestas primárias são aquelas de máxima expressão local, mantendo as características originais quanto à estrutura e diversidade de espécies. Já a vegetação secundária são formações decorrentes de processos naturais de sucessão, após supressão total ou parcial originado de causas antrópicas. O estágio inicial possui fisionomia arbustiva predominante, com ocorrência de espécies arbóreas esparsas e ausência de sub-bosque. O Estágio médio apresenta fisionomia variando entre o porte arbustivo e arbóreo, cobertura arbórea variando de aberta a fechada, sub-bosque bastante adensado. O estágio avançado possui fisionomia arbórea predominante, com um dossel fechado, apresentando grande amplitude diamétrica e estratificado, com um sub-bosque menos expressivo que no estágio médio.

Foram relacionados os parâmetros definidos em lei para definição dos estágios sucessionais, associados aos estágios básicos de desenvolvimento propostos por Frelich (2002), para definir as classes da cobertura florestal ocorrentes no PEQC (Quadro 5).

² A Resolução CONAMA 33/94, convalidada pela Resolução CONAMA nº 388/07 para fins do disposto na Lei 11.428, de 22 de dezembro de 2006, define estágios sucessionais das formações vegetais que ocorrem na

região da Mata Atlântica do Estado do Rio Grande do Sul, visando viabilizar critérios, normas e procedimentos para o manejo, utilização racional e conservação da vegetação natural.

Quadro 5 – Classes de cobertura florestal ocorrentes no PEQC.

Estágios Sucessionais definidos pela Lei 11.428/06	Estágios Básicos de desenvolvimento (Frelich, 2002, adaptado por Kilka, 2014)	Coordenadas Geográficas (SIRGAS2000)	Registros da Validação de campo
Estágio Inicial de regeneração de Mata Atlântica	Estágio de Iniciação	O53°16'46.39" S29°27'54.99"
Estágio médio de regeneração de Mata Atlântica	Estágio de Exclusão competitiva	O53°06'41.12" S29°27'53.42"
Estágio avançado de regeneração de Mata Atlântica	Estágio de transição	O53°16'43.70" S29°27'52.87"
Floresta Primária / Madura	Estágio multi-idades	O53°16'46.93" S29°27'50.91"

Ainda, para compor as classes de uso da terra foram identificadas e generalizadas as classes de água, solo exposto e vegetação campestre, além das áreas de sombra.

Já para confecção do mapa temático das áreas degradadas, foram agrupadas as seguintes classes: solo exposto, vegetação campestre e floresta em Estágio Inicial de regeneração. Para elaboração dos mapas temáticos foi utilizado o software Spring, versão 4.3.

As imagens utilizadas para o processamento correspondem ao período do mês de setembro de 2011, onde para cobrir a área de estudo foi necessário o mosaico de duas cenas do mesmo período. A validação de campo foi realizada em setembro de 2014, mesmo período das imagens adquiridas, a partir do caminhar nos pontos de controle selecionados, observando aspectos da fisionomia da floresta e presença de espécies indicadoras descritas por Kilka (2014). Foram utilizados 10 pontos de controle obtidos em

cada classe temática do NDVI, conforme o mapeamento gerado pelo software que foi processado as imagens.

O Mapa Síntese foi elaborado utilizando-se a álgebra de mapas, *linguagem espaço-geográfica baseada em álgebra (LEGAL)*, disponível no Spring (versão 4.3), cruzando o mapa temático da cobertura florestal (Floresta em estágio avançado e Floresta madura) com o mapa de declividade determinado pelo fatiamento, originado a partir do modelo de elevação (SRTM).

Resultados e discussão

O Mapa temático da caracterização da cobertura florestal (Figura 3), foi elaborado a partir do NDVI, resultando na espacialização das oito classes pré-definidas: Floresta em Estágio inicial, Floresta em Estágio médio, Floresta em Estágio avançado, Floresta Madura, Vegetação campestre, solo exposto e as áreas de sombra.

Figura 3 – Mapa do PEQC representando a caracterização da cobertura florestal, a partir do NDVI gerado pelo processamento da imagem Rapideye de setembro de 2011.

A Figura 4 apresenta uma fotografia com identificação do fragmento florestal das áreas de sombra numa porção do parque em análise.

Figura 4: Fotografia do fragmento florestal com identificação das áreas de sombra.

As classes de floresta mapeadas, corroboram para a descrição feita por Kilka (2014), onde o parque apresentou as florestas de 5 a 70 anos, formado por fragmentos de florestas jovens e degradadas pela invasão biológica, intercaladas com pequenas áreas de florestas mais antigas, o que promove o aumento da invasão descrita sobre os fragmentos remanescentes.

O mapa apresentado na Figura 3 destaca a existência de um mosaico sucessional da cobertura florestal, relacionado ao histórico de uso do solo e intervenções antrópicas passadas, onde o mapeamento da vegetação confirma o descrito por Marcuzzo (2012) e Kilka (2014) para a cobertura florestal do PEQC (Figura 5).

Figura 5: Vista panorâmica do mosaico sucessional existente nos fragmentos florestais remanescentes. Coordenadas da fotografia: S 29° 27'43"; W 53° 17' 8".

Em estudo realizado por Freitas et al. (2005) em fragmentos de Floresta Tropical Úmida Densa, situados em porção atlântica da Serra do Mar no Estado do Rio de Janeiro, os valores obtidos de NDVI não demonstraram correlação com as medidas de estrutura da floresta. Para florestas tropicais com alto teor de umidade o NDWI demonstra-se mais eficiente como indicador da biomassa quando comparado ao NDVI, tendo em vista que este sofre alterações devido à alta umidade desse tipo de floresta. Então, o NDVI não é indicado para avaliação de floresta tropical úmida. Assim como Ponzoni e Shimabukuro (2009), os autores recomendaram restrições quanto ao uso do NDVI em florestas densas (com alto teor de umidade), devido a problemas de saturação, sugerindo que este Índice pode ser um bom indicador da biomassa vegetal em florestas decíduas e secas, tipologia florestal analisada na presente pesquisa.

Os resultados gerados para o NDVI relacionados aos Estágios Básicos de Desenvolvimento da Floresta são observados no Quadro 6, onde o intervalo obtido para o Estágio de Iniciação, referente a Classe denominada como Floresta em Estágio Inicial, tem uma amplitude variando de 0,2 à 0,5, com um NDVI médio de 0,35 o qual apresentou um intervalo dinâmico ampliado devido as condições de baixa biomassa, corroborando para o descrito por Jensen (2009). O Estágio Inicial compreende uma fisionomia diversificada, apresentando um estrato predominante arbustivo, com ocorrência de espécies características do início da sucessão florestal como as pertencentes ao gênero *Baccharis*. Este apresenta variações com ocorrência de indivíduos arbóreos esparsos associado a vegetação campestre, caracterizado pela ocorrência significativa de espécies exóticas invasoras.

Valores de NDVI superiores a 0,8 para Florestas decíduas, este descreve que o NDVI é funcionalmente equivalente a Razão Simples (infravermelho próximo / vermelho), o qual é sensível a variações em biomassa, como as florestas (JENSEN, 2009). Ainda o intervalo dinâmico do NDVI é ampliado a favor de condições de baixa biomassa, sendo comprimido a favor de condições de alta biomassa.

Os valores de NDVI referentes ao Estágio de Exclusão Competitiva (Florestas de 15 à 35 anos), referente a classe denominada Floresta em Estágio Médio, tem uma amplitude variando entre 0,5 à 0,7, apresentando um valor médio de 0,6. Segundo Kilka (2014), nesta fase a floresta apresenta uma fisionomia florestal com copas

contínuas e poucos indivíduos emergentes, sendo os mecanismos de densidade-dependente (competição por recurso e espaço) os principais agentes de mortalidade de plantas. Tais informações explicam o comportamento do NDVI nesta faixa, apresentando um intervalo mais estreito, correspondente a uma variação menor nos aspectos estruturais da floresta, com densidade elevada de indivíduos arbóreos, representando valores de alta biomassa.

Ponzoni e Shimabukuro (2009), descreveram as influências sofridas pelos valores de reflectância dos diferentes dosséis, interferindo diretamente no cálculo dos índices de vegetação, principalmente a quantidade de sombras, muitas vezes comprometendo a relação direta esperada entre o NDVI e a biomassa. No entanto, devido a resolução espacial da imagem utilizada no presente trabalho, foi possível identificar as áreas de sombra, possibilitando assim a afirmação da relação entre os valores de NDVI e a biomassa, ou seja, os valores foram crescentes de acordo com a maturidade da floresta.

O Estágio de Transição apresentou um intervalo para os valores de NDVI entre 0,7 e 0,8, com um valor médio de 0,75. Já o Estágio de Multi-idades (Florestas Maduras) obtiveram valores superior a 0,8. Ou seja, as Florestas secundárias tardias obtiveram valores superiores a 0,7.

Quadro 6 – Relação dos estágios de desenvolvimento da cobertura florestal com dos valores de NDVI.

ID	Idade	Estagio de Desenvolvimento	Estágios Sucessionais (Lei 11.428/06)	NDV I
1	<10 anos	Estágio de iniciação	Estágio Inicial	0,2 < 0,5
2	15 a 35 anos	Estágio de exclusão competitiva	Estagio médio	0,5 < 0,7
3	50 a 60 anos	Estágio de transição	Estágio avançado	0,7 < 0,8
4	>70 anos	Estágio Multi-idades	Floresta Madura	>0,8

Conforme observado na Figura 6, O NDVI possui uma alta correlação com o estágio de

desenvolvimento florestal (aproximadamente 98%), apresentando uma linha de tendência crescente, ou seja, os valores obtidos para o NDVI aumentam com a idade da floresta, chegando a valores superiores a 0,8 em Florestas Maduras, com idade superior a 70 anos.

Figura 6: Relação do NDVI com o estágio de desenvolvimento florestal.

Quanto aos aspectos do estado de conservação da vegetação observa-se que aproximadamente 30% da área da unidade, equivalente a 557,17ha, classifica-se como área degradada, conforme representado na Figura 7, compreendendo as seguintes classes: solo exposto, vegetação campestre e floresta em Estágio Inicial. Salienta-se que estas áreas são grande foco de dispersão de espécies exóticas invasoras, portanto áreas prioritárias para projetos de restauração ecológica.

Marcuzzo (2012), em análise comparativa de duas áreas em recuperação no PEQC, com aproximadamente sete anos, ou seja, áreas classificadas no mapeamento com floresta em Estágio Inicial, destacou o predomínio de espécies pioneiras zoocóricas na regeneração natural com grande capacidade de atração para avifauna, incluindo exóticas invasoras como *Psidium guajava*, *Hovenia dulcis* e *Syzygium cumini*. A autora aponta para necessidade de manejo das áreas por meio da erradicação destas espécies, ainda considera que a eliminação de gramíneas e arbóreas exóticas invasoras um fator determinante para o sucesso da restauração de ecossistemas florestais.

Figura 7 – Mapa do PEQC representando as áreas de cobertura florestal degradadas.

Conforme dados apresentados no Quadro 7, a Floresta em Estágio Médio corresponde a aproximadamente 343,30 ha, representando 18,69% da área. Referem-se as florestas entre 15 a 35 anos de idade, ou seja, áreas que aproximadamente 30 anos atrás eram utilizadas para cultivo agrícola, as quais foram desapropriadas para construção da Usina Hidroelétrica de Dona Francisca, tendo em vista que o Parque foi criado como forma de compensação ao empreendimento.

A Floresta Em Estágio Médio apresenta uma fisionomia predominante arbórea, com uma alta densidade de indivíduos por hectare. Também, apresenta baixa diversidade de espécies, destacando-se a presença significativa de *Hovenia Dulcis* (*uva-do-japão*), espécie exótica invasora amplamente dispersa na unidade.

As áreas de Floresta em Estágio Avançado de Regeneração, possuem uma fisionomia florestal bem estratificada, com aspectos estruturais semelhantes à Floresta Madura. Ocorrem em áreas

mais declivosas, essas áreas sofreram intervenções pretéritas, onde foram parcialmente convertidas para agricultura familiar, além de exploração madeireira. Representam em torno de 31,50% da área total da unidade, aproximadamente 578,53 hectares.

Já as áreas de Floresta Madura com idade superior a 70 anos, encontram-se em terrenos de alta declividade e de baixa aptidão agrícola, onde no passado apenas passou exploração por meio do corte seletivo. Correspondem à apenas 14,13%, em torno de 259,50ha. São predominantes em áreas de declividade superior a 45%, constituindo áreas expressivas na diversidade de espécies e representativas do Ecossistema de Floresta Estacional Decidual ocorrente na região.

Quadro 7 - Quantificação das classes identificadas e analisadas.

Classes	Área (ha)	%
Água	7,00	0,38
Solo exposto	87,63	4,77
Vegetação Campestre	158,06	8,61
Floresta - Estágio Inicial	311,48	16,96
Floresta - Estágio Médio	343,30	18,69
Floresta - Estágio Avançado	578,53	31,50
Floresta Madura	259,50	14,13
Sombra	91,29	4,97
Total	1836,78	100,00

O mapa de declividade com áreas florestais acima de 50 anos (Figura 8), demonstra a relação existente entre o estado de conservação dos fragmentos remanescentes de Florestas acima de 50 anos e a declividade, a fim de comprovar a relação existente entre a conservação destes fragmentos e as áreas consideradas de baixa aptidão agrícola.

Ribeiro et al (2012), definiram classes de Baixa Aptidão Agrícola e/ ou Elevada Aptidão Florestal, a partir de dados SRTM. As áreas com até 15° correspondem a áreas de alta aptidão agrícola, já as áreas com declividade superior a 15° são áreas de baixa aptidão agrícolas e potencias para restauração florestal.

A relação existente entre a declividade e as áreas cobertas por Florestas Secundárias Tardias, ou seja, áreas ocupadas por florestas com idade superior a 50 anos é significativa, pois grande parte destes fragmentos estão em áreas com declividade

superior a 40°. Confirmando que as florestas mais antigas se encontram em áreas onde a declividade foi o fator limitante para expansão da agricultura, sofrendo intervenção antrópica vinculada a exploração madeireira pelo corte seletivo.

Somando-se as porções mais significativas cobertas por áreas de florestas secundárias tardias (Estágio Avançado e Floresta Madura), em torno de 45%, correspondente a 359ha, dos fragmentos remanescentes encontram-se em áreas de declividade superior a 40° conforme sintetizado no Quadro 8.

Quadro 8 – Relação das áreas ocupadas pelas classes de Floresta em Estágio avançado e Floresta Madura entre as faixas de declividade: 12-30%, 30-45% e 45-100%.

Classes	Área (ha)	%
Floresta > 50 anos localizada em declividade entre 12-30%	190,89	23,74
Floresta > 50 anos localizada em declividade entre 30-45%	254,34	31,63
Floresta > 50 anos localizada em declividade entre 45-100%	358,92	44,63
Total	804,15	100,00

O PEQC apresenta um mosaico sucessional característico do ecossistema de Floresta Estacional Decidual ocorrente na região do Rebordo do Planalto Meridional, composta por fragmentos remanescentes em diversos estágios sucessionais. Onde as porções mais conservadas das florestas secundárias tardias encontram-se em áreas de declividade acentuada. O uso e ocupação do solo pretérito, determinaram a dinâmica de sucessão florestal encontrada, pois muitas das áreas cobertas por florestas jovens eram ocupadas por cultivos agrícolas em uma paisagem predominantemente florestal. Ficam evidentes a influência dos bovinos e a exploração madeireira na condução, ao longo dos anos, dos processos de sucessão florestal atualmente encontrados.

Destaca-se na cobertura florestal da unidade o número significativo de áreas degradadas, as quais impactam diretamente sobre os demais remanescentes encontrados, pois são grande foco de dispersão de espécies exóticas invasoras, impedindo que os objetivos de conservação da unidade sejam alcançados.

Conclusão

A aplicação do NDVI alcançou os objetivos esperados para a caracterização espacial da dinâmica florestal da tipologia analisada, Floresta Estacional Decidual, apresentando uma alta correlação com os estágios de desenvolvimento da floresta.

A partir da utilização do NDVI foi possível confirmar o mosaico sucessional existente descrito para fragmentos florestais ocorrentes na região, um mosaico composto por florestas de diferentes idades relacionados ao uso e ocupação antrópico passado.

A aplicação do NDVI para classificação e definição da sucessão florestal auxilia na tomada de decisão para aplicação da Lei 11.428/06, pois permite uma macro análise, em contrapartida de uma análise parcial e / ou fragmentada, a qual muitas vezes subestima os resultados. Também, a análise previa do fragmento por meio do NDVI possibilita que todas as situações sejam amostradas, minimizando os custos nos levantamentos de campo.

As técnicas de sensoriamento remoto auxiliam no planejamento e monitoramento da dinâmica florestal, bem como no mapeamento, identificação e quantificação das áreas degradadas,

contribuindo para o planejamento e gestão da unidade, assim como para o desenvolvimento de projetos de restauração ecológica.

Os índices de vegetação quando associados a mapeamentos edáficos e de relevo (declividade), permitem uma melhor compreensão acerca da dinâmica florestal, como foi demonstrado pelo mapa síntese gerado entre as áreas de florestas secundárias tardias (acima de 50 anos) e a declividade.

Portanto, por meio da aplicação das técnicas de NDVI foi possível caracterizar os remanescentes florestais do Parque Estadual da Quarta Colônia auxiliando na compreensão de sua dinâmica sucessional. Ainda, foi possível identificar e quantificar as áreas degradadas existentes na área de estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à SEMA – Secretaria do Ambiente e do Desenvolvimento Sustentável, Agência Santa Maria – RS, pela oportunidade de realizar a pesquisa em convênio com a Universidade Federal de Santa Maria.

E ao INPE/CRS – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais do Centro Regional Sul pelo uso do espaço para desenvolvimento de pesquisas científicas.

Referências

- Freitas, S. R.; Mello, M. C. S.; Cruz, C. B. M., 2005. Relationships between forest structure and vegetation indices in Atlantic Rainforest. *Forest Ecology and Management* 218, 353-362.
- Frelich, L.E., 2002. Forest dynamics and disturbance regimes: Studies from Temperate Evergreen – Deciduous Forest. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gascon, C., Laurence, W. F., Lovejoy, T. E., 2001. Fragmentação florestal e biodiversidade na Amazônia Central. In: Garay, I.; Dias, B. Conservação da biodiversidade em ecossistemas tropicais: avanços conceituais e revisão de novas metodologias de avaliação e monitoramento. Petrópolis: Editora Vozes. p. 112-127.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012. Manual técnico da vegetação brasileira. Rio de Janeiro. 92p.
- Jensen, J.R., 2009. Sensoriamento remoto do ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres / John R. Jensen; tradução José Carlos Neves Epiphany et al. São José dos Campos, SP: Parênteses.
- Kilca, R. V., 2014. A sucessão secundária na floresta estacional subtropical do rio grande do sul, Brasil. Tese (Doutorado). Santa Maria, RS. UFSM.
- Klein, R., 1972. Árvores nativas da floresta subtropical do alto Uruguai. Sellowia.
- Marcuzzo, S. B., 2012. Métodos e espécies potenciais para a restauração de áreas degradadas no Parque Estadual da Quarta Colônia, RS. Tese (Doutorado). Santa Maria, RS. UFSM.
- Mittermeier, R. A., Gil R. P., Hoffman M., Pilgrim J., Brooks T., Mittermeier G. G., Lamoreux J., Fonseca G. A. B., 2005. Hotspots Revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. 2 ed. Boston, University of Chicago Press.
- Moreno, J. A., 1961. O clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da agricultura do Rio Grande do Sul.
- MULTISPEC. A Freeware Multispectral Image Data Analysis System. 2010. Tutorials: Creating Vegetation Indices Images. Disponível: <https://engineering.purdue.edu/MultiSpec/tutorials.html>. Acesso: 15 jun. 2014.
- Novo, E. M. L. M., 1998. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. 3 ed. São Paulo: Blucher.
- Ponzoni, F. J., Shimabukuru Y. E. 2009. Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos, SP: A. Silva Vieira Ed. 127p.
- Ribeiro, M., Rodrigues, R.R., Paese, A., Diederichsen, A., Costa, S., Brancalion, P.H.S., Santiami, E., Pereira, G., Guimaraes, J., Kock, R., 2012. A restauração da Mata Atlântica apoiada em Sistemas de Informações Geográficas. In: Paese, A., Uezu, U., Lorini, M.L., Cunha, A. (Org.). Conservação da biodiversidade com SIG. São Paulo: Oficina de Textos, 1, 40-54.