



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**DIAGNÓSTICO ESPACIAL DE DEGRADAÇÃO DA TERRA PELA
ANÁLISE DA RESPOSTA HIDRO-VEGETACIONAL E
INDICADORES DE PRODUTIVIDADE LÍQUIDA, COBERTURA DA
TERRA, E, CARBONO NO SOLO NOS BIOMAS DO CERRADO E
CAATINGA.**

Gabriela Alves Carreiro

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr.
Gustavo Felipe Balué Arcoverde.

URL do documento original:



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**DIAGNÓSTICO ESPACIAL DE DEGRADAÇÃO DA TERRA PELA
ANÁLISE DA RESPOSTA HIDRO-VEGETACIONAL E
INDICADORES DE PRODUTIVIDADE LÍQUIDA, COBERTURA DA
TERRA, E, CARBONO NO SOLO NOS BIOMAS DO CERRADO E
CAATINGA.**

Gabriela Alves Carreiro

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientada pelo Dr.
Gustavo Felipe Balué Arcoverde.

URL do documento original:

Resumo

O presente estudo consiste na análise espacial de degradação da terra, e tem como objetivo o desenvolvimento de um índice de identificação de áreas com baixa resposta hidro-vegetal. A degradação de um ecossistema existe a partir de uma alteração súbita de um estágio de equilíbrio e da perda de resiliência, como no caso da seca, ocasionada por mudanças climáticas e alterações no uso e cobertura da terra, que se acentua com as modificações nas práticas de cultivo, excesso de pastagem ou corte extensivo de madeira, resultando no desmatamento que equivale na perda da cobertura vegetal nativa. A compreensão de padrões de baixa resposta hidro-vegetal pode ser avaliada a partir da razão entre a produtividade líquida (PPL) e a precipitação - Índice de Eficiência do Uso da Chuva (rain use efficiency - RUE). No sensoriamento remoto, o PPL comumente é substituído por índices de vegetação. O RUE constitui um indicador de degradação, contribuindo para a elucidação das influências antropogênicas e climáticas que afetam negativamente a produtividade da terra e redução da cobertura vegetal nos biomas Caatinga e Cerrado. Os dados aplicados referem-se aos produtos MOD13Q1 EVI e CHIRPS, representados em uma série histórica dos anos 2000 a 2018, evidenciando a área que corresponde aos biomas citados anteriormente.

Palavras-Chave: degradação; RUE; resiliência; Caatinga; Cerrado.

Lista de Figuras

Figura 1: Ordem cronológica das atividades.	5
Figura 2: Valores RUE de curva padrão de tendência de degradação da terra para o Bioma Caatinga para treinamento do algoritmo SAM.	9
Figura 3: Valores RUE de curva padrão de tendência de degradação da terra para o Bioma Cerrado para treinamento do algoritmo SAM.	9
Figura 4: Mapa de tendência à Degradação no Cerrado.	11
Figura 5: Mapa de tendência à Degradação na Caatinga	12
Figura 6: Mapa de pastagens em más condições no Cerrado.	13
Figura 7: Mapa de pastagens em más condições na Caatinga	13
Figura 8: Mapa de áreas de pastagens no Cerrado.	14
Figura 9: Mapa de áreas de pastagens na Caatinga.	15
Figura 10: Mapa de distribuição espacial do indicador de degradação para os municípios do bioma Cerrado.	16
Figura 11: Distribuição espacial do indicador de degradação para os municípios do bioma Caatinga.	16

Sumário

1. Introdução.....	1
1.1 Caatinga.....	1
1.2 Cerrado	2
1.3 Resposta Hidro-Vegetacional: Resiliência	3
2. Objetivo Geral	4
3. Materiais e Métodos.....	4
3.1 Área de estudo e materiais	4
3.2 Procedimentos Metodológicos	5
3.2.1 Levantamento de dados EVI	5
3.2.2 Levantamento de dados CHIRPS.....	6
3.2.3 Reamostragem temporal e espacial dos dados CHIRPS	6
3.2.4 Geração das imagens RUE a cada 16 dias	7
3.2.5 Média anual das imagens RUE.....	7
3.2.6 Classificação das imagens RUE anuais	7
4. Resultados.....	8
4.1 Curvas Padrão de RUE	8
4.2 Classificação de tendências de processos degradativos.....	10
4.3 Comparabilidade com outros mapeamentos semelhantes de degradação	12
5 Conclusão.....	17
6 Referências	17

1. Introdução

O conceito de degradação da terra possui várias definições. Basicamente, as definições permeiam três grandes ramos: perda da capacidade biológica ou econômica produtiva da terra (JOHNSON; LEWIS, 1989), perda da capacidade de prover bens e serviços ecossistêmicos (LADA, 2013), e, alteração súbita de um regime de equilíbrio para outro regime de equilíbrio (SCHEFFER, 2009; D'ODORICO et al., 2013). Esta última definição possui uma abordagem sistêmica e exige um esforço maior de análise e avaliação. Geralmente as áreas degradadas passam para um novo regime de equilíbrio, ou passam a ter dois regimes (biestáveis) alternando-se, e com bacias de atração menores. Segundo Scheffer (2009) é difícil definir a degradação de maneira precisa e útil, o autor subdivide alguns conceitos: “capacidade de um sistema em se recuperar após perturbação” e “a velocidade com a qual o sistema se recupera após perturbação”. No entanto ele ainda enfatiza que as duas definições anteriores não capturam a melhor maneira de lidar com esse “problema”, e com isso a última definição vem da visão de resiliência, segundo Holling (1973) “a magnitude da perturbação que um sistema pode tolerar, antes de mudar para um estado diferente (domínio de estabilidade), com distintos controles sobre a estrutura e função”.

A degradação no Brasil está relacionada com as ações antrópicas, como o desmatamento, correspondendo à cerca de 67% segundo o Ministério do Meio Ambiente (2016), a baixa cobertura vegetal se mostra como um indicador para o início do processo de degradação (ARAUJO, 2010). A desertificação relaciona a degradação da terra em terras secas (zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas). Este fenômeno que está em crescimento no Brasil consiste na redução da capacidade dos ecossistemas em fornecer sustentação para o equilíbrio do mesmo. De acordo com Sampaio e Araújo (2005) o semiárido brasileiro é uma das maiores áreas do mundo suscetível ao processo de desertificação.

Considerando o aspecto sistêmico de degradação, os biomas Caatinga e Cerrado constituem estudos de caso propícios para este foco de análise. Ambos os biomas possuem ampla variação fenológica ao longo do ano, conforme a sazonalidade de chuvas. Este fato permite avaliações mais diretas sobre o estado de resiliência em que se encontram, conforme a resposta da vegetação com a condição ambiental de disponibilidade hídrica.

1.1 Caatinga

A Caatinga encontra-se no domínio das depressões interplanálticas semiáridas do Nordeste brasileiro (AB'SÁBER, 2003) sendo interrompido por algumas áreas de floresta tropical úmida e Cerrado. Possui duas estações pouco estabelecidas, uma quente e seca, respectivamente o inverno, onde a vegetação apresenta-se seca, sem folhagem e o solo exibindo as raízes, e outra quente com chuvas, verão-outono. A evapotranspiração é permanentemente alta ao decorrer do ano todo (ARAUJO, 2010; SILANS; SILVA; BARBOSA, 2006).

A vegetação nativa se desenvolve em distintos tipos de solos, profundos, arenosos, porosos (ANDRADE-LIMA, 1981) e possui um mecanismo adaptativo, que por conta das primeiras chuvas, forma-se um dossel semelhante a uma floresta baixa, capaz de atenuar os efeitos do impacto da chuva sobre o solo (ALBUQUERQUE et al., 2005). A fitofisionomia da Caatinga apresenta meios de adaptação (SILANS; SILVA; BARBOSA, 2006; SULTAN, 2003) como a resistência aos períodos de estiagem, reduzindo a perda de água por meio da transpiração,

ocasionando a perda antecipada das folhas (CHAVES et al., 2008).

O solo dessa região possui a característica de um reservatório faunístico, pela grande diversidade de organismos, que garantem o funcionamento e a sustentação de todo o bioma, portanto, os nutrientes disponíveis no solo para o crescimento das plantas derivam de complexas relações entre os microrganismos e a fauna do solo, assim observa-se a complexidade e a vulnerabilidade desses ecossistemas (BONKOWSKI; GRIFFITHS; SCRIMGEOUR, 2000; GESTEL; KRUIDENIER; BERG, 2003; JACOBS et al., 2010).

Este bioma unicamente brasileiro, correspondendo a 11% do território nacional, e vem sofrendo com o desmatamento desenfreado que chega a 46% de sua área total (MMA, 2012). Segundo Araújo (2010):

“Em decorrência do desconhecimento sobre o ecossistema Caatinga, esta vem sendo sistematicamente devastada, há muitos séculos, pela ação antrópica utilizada para pecuária extensiva, agricultura nas partes mais úmidas, retirada de lenha e madeira e outros fins de menor interesse socioeconômico”.

De acordo com Ribeiro Filho et al. (2016) o desmatamento para a produção de lenha e carvão, compromete a superfície do solo à ação direta das chuvas, e o pastoreio excessivo leva a redução de recursos, visto que a remoção da vegetação herbácea em qualquer âmbito, desempenha o favorecimento da compactação do solo e da desertificação.

A Caatinga apresenta boa capacidade de resiliência, como a explosiva expansão vegetativa, característica das espécies arbustivas, durante o período de chuva, apresentando mudanças também às espécies herbáceas que se modificam brevemente de uma coloração esbranquiçada para um verde intenso (QUEIROZ et al., 2006). Conforme Silva (2015) provavelmente essas adaptações tem contribuído para o desenvolvimento da resiliência, possibilitando a permanência destas espécies em ambientes sob elevada condição de estresse.

1.2 Cerrado

O Cerrado encontra-se no domínio dos chapadões tropicais do Brasil Central, sua área core está marcada por planaltos, possuindo áreas de transição com outros biomas (AB'SÁBER, 2003; IBGE, 1992). Detém de um clima tropical estacional, com estações muito chuvosas entre os meses de outubro a abril, alternadas com estações mais secas, possuindo um total de precipitações anuais maiores das quais ocorrem nos domínios das caatingas, efetuando assim, a existência de padrões de perenidade dos cursos d'água regionais (AB'SÁBER, 2003; MIRANDA et al., 2009).

Alguns fatores fazem com que o Cerrado seja apontado como o berço das águas, sua altitude média é elevada quando comparado ao restante do país, assim variando de 300 a 1700 metros, e é considerado o divisor das principais bacias hidrográficas do território nacional (AB'SÁBER, 1983; BOTELHO, 2010).

A vegetação possui diferentes padrões, cerrados, campos e florestas, estas diferentes fitofisionomias são explicadas pelos fatores climáticos e pelos efeitos do fogo (BARCELLOS, 2001; PEREIRA; VENTUROLI; CARVALHO, 2011). As espécies lenhosas, seriam uma flora de evolução integradas as condições geomorfoclimáticas dos trópicos, sujeita assim a forte sazonalidade. Conforme Arens (1958) a flora deste bioma, é exposta ao máximo de iluminação pelo clima, que possui um número elevado de dias de céu descoberto, e pela fitofisionomia rala que produz sombra mínima, isto se enquadra no período de inverno seco, mas é modificado durante o verão chuvoso (AB'SÁBER, 2003).

Ocupando 23% de área do território brasileiro (MMA, 2015), o Cerrado vem sofrendo com ações antrópicas durante décadas. Segundo o Ministério do Meio Ambiente (2015), através da estimativa feita pelo PMDBBS, mais de 48% da área total do bioma já foi desmatada. Segundo levantamento realizado por Sano et al. (2008) cerca de 39,5% do Cerrado apresenta algum tipo de uso da terra, assim sendo 26,5% ocupados por pastagens cultivadas, e aproximadamente 10,5% por culturas agrícolas. Existe um acelerado processo de ocupação deste bioma, com intenso desmatamento, que suscita a perda de solo por erosão, levando assim a devastação da fauna e flora (NASCIMENTO, 2001).

Notam-se as queimadas vistas a partir de processos naturais como um fator ecológico essencial para a evolução do bioma (BOND; KEELEY, 2005). Durante a estação chuvosa, há uma alta frequência de raios, e igualmente uma grande produção de biomassa, que seca à medida que o período de estiagem progride, favorecendo assim a ocorrência de fogo (BOND; KEELEY, 2005; MIRANDA et al., 2009). Porém, houve uma expansão fundiária ao longo do Cerrado, em suas porções planas de fácil mecanização (GIUSTINA, 2013), e ao explorar o que a produção agrícola possui vinculada aos fatores de queimadas, depara-se com o manejo do fogo para a limpeza de áreas, preparação de colheita, renovação de pastagens, como técnica de caça e também gerenciamento de gado (IBAMA, 2002).

A resiliência do Cerrado se apresenta através das espécies lenhosas, que geralmente detém alto potencial regenerativo natural. A regeneração ocorre por rebrota, por meio de estruturas subterrâneas, que são influenciadas por sua vez pelos fatores edáficos e pelo tempo decorrido após o desmatamento (DURIGAN et al., 1998). Por meio de levantamento, Durigan et al. (2004) observou uma área que houve cultivo florestal ao decorrer de 22 anos, e verificou que após dois anos do corte raso e abandono, ocorreu a rápida regeneração natural da vegetação lenhosa, e isso se mostra como uma peculiaridade das espécies do cerrado.

1.3 Resposta Hidro-Vegetacional: Resiliência

A resposta da vegetação em relação à disponibilidade hídrica constitui um dos elementos de análise de degradação, ou de alteração do regime de resiliência ecossistêmico, de uma região sensivelmente dependente da sazonalidade hídrica. Esta premissa faz parte de um processo de retroalimentação positivo direto entre disponibilidade de chuva, desenvolvimento vegetativo e albedo, e que embasa a teoria da expansão do deserto do Saara durante o Holoceno, por mudança climática devido à mudança da órbita da terra (FOLEY et al., 2003). Mas também constitui um dos tradicionais e principais elementos de análise de degradação em terras secas (BASTIN et al., 1993; BAI et al., 2008).

No Brasil, análises com padrões de resposta hidro-vegetal também é plausível de serem observados, sobretudo a partir da análise fenológica em ambientes áridos, semiáridos e subúmido seco. Nestes ambientes existe influência não só da pouca precipitação, mas da disponibilidade de água para a planta e capacidade de armazenamento nos períodos de estiagem. (MACHADO et al. 1997, BULHÃO & FIGUEIREDO, 2002).

Por outro lado, para análises em nível regional e, portanto, de ampla distribuição espacial, é preciso um número maior de observações tanto em nível espacial como temporal. Com o avanço do sensoriamento remoto, mais imagens têm sido disponibilizadas para o público amplo, trazendo uma melhora na relação resolução temporal e resolução espacial. Uma das alternativas de avaliação resposta hidro-vegetacional, como análise de processos degradativos, e que tem sido realizada com o uso de imagens de sensoriamento remoto é o uso do índice de Eficiência do Uso da Chuva pela Vegetação - *Rain Use Efficiency* – RUE.

O RUE é resultado da divisão da produtividade primária líquida (PPL) pela quantidade de chuva mensurada em milímetros (mm) em um certo período. Portanto, análises com RUE podem ser úteis na avaliação da atividade vegetal, por estar diretamente relacionado com as variações ocorridas na cobertura vegetal da terra, e apresentar súbita resposta às variações fenológicas (KARNIELI et al., 2002; JUSTICE et al., 1998). O RUE tem apresentado alta correlação com valores de evapotranspiração, contudo deve ser analisado de forma específica para cada tipo de bioma (ISUNDWA, MOURAD; 2019). Em estudos utilizando imagens de sensoriamento remoto, PPL é comumente substituído por índices de vegetação, afim de que possa ter maior período de análise (BAI et al., 2008; FENSHOLT; RASMUSSEN, 2011; DIOUF; LAMBIN, 2001).

O EVI (Enhanced Vegetation Index), consiste em um índice de vegetação adquirido por sensoriamento remoto, produto MOD13 do sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), resolução espacial de 250 metros. É produzido pelas bandas na faixa espectral do azul, vermelho e infravermelho próximo, minimizando o retorno da reflectância do solo e da atmosfera (JUSTICE et al., 1998; DIDAN, K., 2015). Este índice se aplica para realizar a avaliação da atividade vegetal, por estar diretamente relacionada com as variações ocorridas na cobertura da vegetal da terra, e apresenta súbita resposta as variações fenológicas (KARNIELI et al., 2002; JUSTICE et al., 1998).

Em relação à disponibilidade do histórico de precipitação a partir de imagens com ampla resolução temporal, atualmente existe a disponibilidade do dado do CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*). Trata-se de um produto que conjuga dados de satélite e estações meteorológicas, em que procurou-se diminuir falhas que são inerentes a estas duas fontes de dados. A sua resolução espacial é de 0,05°, com dados diários de precipitação desde 1981 (FUNK et al., 2015)

A razão entre o EVI dividido pela precipitação resulta em uma aproximação plausível do índice de Eficiência do Uso da Chuva (rain use efficiency - RUE), compreendendo um indicador de degradação. Desta forma, contribui para a elucidação das influências antropogênicas e climáticas que afetam negativamente a produtividade da terra e redução da cobertura vegetal. A distribuição ou no padrão das chuvas traz respostas nas estruturas da vegetação dos biomas pontuados neste trabalho (ISUDWA & MOURAD, 2018).

2. Objetivo Geral

Identificar áreas com padrões espaciais de baixa eficiência hídrica em relação ao ciclo fenológico nos biomas Cerrado e Caatinga por meio do indicador RUE, com um proxy ao processo de degradação da terra.

3. Materiais e Métodos

3.1 Área de estudo e materiais

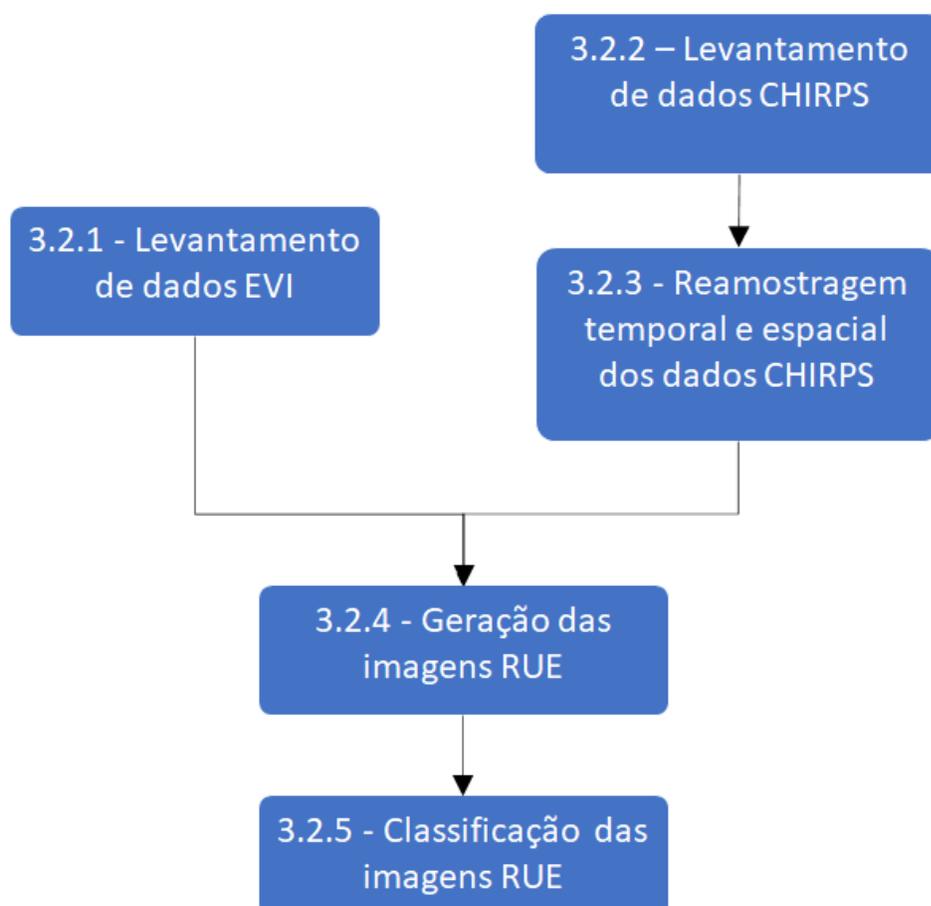
Dentre os biomas Cerrado e Caatinga, foram observadas as áreas de pastagens que se mantiveram no período de análise do estudo. Estas áreas são as que possuem uso mais extensivo no meio rural nestes biomas, e que estariam mais expostas a processos de degradação. O período de análise do estudo compreendeu desde fevereiro do ano 2000 até dezembro do ano de 2018. Os materiais para este trabalho foram: imagens de EVI (enhanced vegetation index)

provenientes do produto MOD13Q1 do sensor Modis a bordo da plataforma orbital TERRA, já as imagens de precipitação do produto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*). O dado do EVI é apresentado a cada 16 dias e possui resolução espacial de 250 metros, enquanto o valor de precipitação do CHIRPS refere-se ao total diário com resolução de 0,05° (aproximadamente 5 quilômetros).

3.2 Procedimentos Metodológicos

As etapas metodológicas seguiram conforme a ordem cronológica da figura

Figura 1: Ordem cronológica das atividades.



Elaborado por Gustavo Felipe Balué Arcoverde (2020)

3.2.1 Levantamento de dados EVI

Para as etapas de download de imagens EVI, foi utilizado o pacote MODISsp (BUSETTO; RANGHETTI; WASSER, 2020). Com isso para a aquisição das imagens foi utilizado o programa R, que utiliza alguns pacotes básicos (VERZANI & LAWRENCE, 2018; VERZANI, 2019; LAWRENCE & LANG, 2019):

- gWidgetsRGTK2, responsável por conduzir o kit de ferramentas,
- gWidgets, que fornece uma interface de programação de aplicativo, sendo independente e possibilitando a criação GUIs interativos. Estes consistem em um modelo de interface de utilização, permitindo a interação com dispositivos digitais por meio de elementos gráficos, e;
- RGTK2 que disponibiliza recursos de linguagem R para a programação de interfaces gráficas.

O pacote MODISrtp permite o download de produtos do MODIS em diferentes recortes espaciais (tiles) e temporais, além de mosaicar, reprojetar e redimensionar por período, através de um GUI. Para o presente processamento foi selecionada a categoria de Ecosystem Variables – Vegetation Indices, e o produto anteriormente citado MOD13Q1, na versão 6 da plataforma Terra, selecionando a camada original EVI 16 dias. A extensão espacial de saída foi indicada por tiles – retângulos – com 12/14 na horizontal e 9/11 na vertical, a projeção de saída foi determinada como EPSG 5880, resolução de 250m, formato de saída selecionado GTIFF. Armazenou-se as séries temporais como R rasterStack e ENVI Meta, direcionando-as para uma pasta diretório a cada período de um ano, correspondendo a 23 dados por processamento, exceto o ano 2000 que iniciou a contagem a partir de 3 de fevereiro correspondendo o primeiro dado apenas no dia 18 do mesmo mês, apresentando assim, apenas 21 dados.

3.2.2 Levantamento de dados CHIRPS

O download do produto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), a partir do pacote RCurl, foi possível o download das imagens disponíveis em FTP. Os dados foram inicialmente direcionados ao diretório, ordenados em pastas anuais de 2000 a 13 de maio de 2019, subsequente a breve organização, houve o processo de extração dos dados, pois se apresentavam em GZIP – arquivo compactado – com isso o formato da imagem é GTIFF. Foram recortadas as imagens do produto CHIRPS para a área de estudo, pois as mesmas abrangem originalmente praticamente todo o globo, latitudes 50°S e 50°N, e todas as longitudes.

A partir da ativação dos pacotes no programa R, observou-se a listagem dos dados raster, sendo eles organizados e processados anualmente, aplicando a função crop que exige uma máscara para a realização do recorte, que corresponde ao shapefile desenvolvido no programa QGIS. Utilizou-se uma máscara que abrangesse, além dos biomas da Caatinga e Cerrado, também da Mata Atlântica, Pantanal e Pampas. Dessa maneira, através deste vetor que contém os dados geoespaciais necessários, foi efetuado o recorte de 7.056 dados de precipitação diária.

3.2.3 Reamostragem temporal e espacial dos dados CHIRPS

Como citado acima, as resoluções temporais e espaciais do EVI/Modis e do CHIRPS são diferentes. Para que fosse possível a geração das imagens RUE, seria preciso que as mesmas estivessem com as mesmas resoluções espaciais e temporais. Neste sentido, as imagens do CHIRPS foram reamostradas para as resoluções do EVI. Portanto, foi necessário que se realizasse a interpolação temporal das informações diárias de chuva para 16 dias exatos aos das imagens do produto EVI/Modis. Esta interpolação foi realizada pela soma dos valores de precipitações a cada 16 dias.

Para esta interpolação temporal habilitou-se os pacotes Rgdal e Raster no processo de recorte das imagens CHIRPS. Para essa etapa de processamento, também foi utilizado o pacote Rts, realizando análises de séries temporais raster, fornecendo classes e métodos para manipulação, e o pacote Zoo sendo uma classe S3 (BIVAND et al., [s.d.]; HIJMANS, 2020; NAIMI, 2019; R-CORE ORG, [s.d.]; ZEILEIS, 2020).

Inicialmente, os dados de precipitação dos anos 2000 a 2019 correspondiam a 7.056 imagens diárias, para esse processamento agrupou-se 336 dados por pasta, onde foram efetuados 21 processamentos, resultando em 441 dados CHIRPS interpolados temporalmente a cada 16 dias, portanto seguindo a contagem do MOD13Q1 EVI. Para que isso fosse aplicado, gerou-se um vetor de datas a cada 16 dias e um índice de frequência para sinalizar o cálculo de soma nos intervalos desejados.

3.2.4 Geração das imagens RUE a cada 16 dias

Uma vez realizada a interpolação temporal dos CHIRPS, foi realizada a reamostragem espacial das imagens CHIRPS de 5 Km para 250 metros, do EVI (MOD13Q1), possibilitando a geração das imagens RUE (Equação 1). Esta operação foi realizada por processo de junção de imagens (Stack) de forma bimestral.

$$\text{Proxy RUE} = \text{EVI/CHIRPS}$$

Utilizando os pacotes Rgdal e Raster foi ativado o pacote Maptools apresentando um conjunto de ferramentas para manipular dados geográficos e o St que são classes e métodos para dados espaciais, documentando as informações de localização para dados 2D ou 3D, fornecendo funções para plotagem de dados como mapas, seleção espacial e recuperação de coordenadas (BIVAND et al., [s.d.]; HIJMANS, 2020; OPGEN-RHEIN; ZUBER; STRIMMER, 2015; BIVAND et al., 2020).

A partir da organização prévia das datas e nomes em uma planilha no Excel e em pastas diretório, alocou-se as informações de 23 dados CHIRPS e EVI, exceto o ano 2000 que constou apenas 21 dados e 5 bimestres por conta do início da contagem, sendo assim os anos 2001 a 2018 apresentaram 6 bimestres, correspondendo a mesma quantidade de proxy RUE gerado anualmente.

O processamento levou aproximadamente 63 horas, utilizando-se de 435 dados de ambos os produtos, tanto o CHIRPS com os dados de precipitação interpolados a cada 16 dias, e o MOD13Q1 EVI com produto disponibilizado no mesmo intervalo de tempo, gerando-se assim, 113 bimestres correspondendo ao proxy RUE.

3.2.5 Média anual das imagens RUE

Para que se realizasse as análises de valores médios dos dados RUE, por intermédio do plugin GRASS GIS e a função *r.series* foi necessário o desmembramento através do programa R, para que houvesse a separação das datas a cada 16 dias e assim, para que existisse a possibilidade da realização dos cálculos, portanto, foi obtido os valores médios dos conjuntos de imagens dos anos de 2000 a 2018.

3.2.6 Classificação das imagens RUE anuais

Após o processamento das imagens RUE (16 dias) para médias anuais (2000 a 2018), foram realizados os seguintes processamentos para identificação das regiões de maior tendência à degradação:

- a) Junção das imagens anuais (2000 a 2018) em só arquivo (Stack-anual);
- b) Recorte do Stack-anual para o bioma Cerrado (Stack-anual-Cerrado) e Caatinga (Stack-anual-Caatinga);
- c) Verificação de valores mínimos e máximos dos Stack-anual-Cerrado e Stack-anual-Caatinga, considerando os intervalos dos 19 anos, a fim de gerar uma curva padrão de possível tendência de degradação para cada Bioma.
- d) Aplicação das curvas de tendência à degradação (item c) para treinamento de classificação supervisionada pelo algoritmo Spectral Angle Mapper (SAM) (KRUSE et al., 1993; YAN. ROY, 2015), gerando assim uma imagem de similaridade à curva padrão de tendência de degradação para cada Bioma - Imagem de tendência de degradação por RUE. Atribuição de gradiente de cores na Imagem de tendência de degradação por RUE para facilitação de visualização das áreas com maior tendência.

4. Resultados

4.1 Curvas Padrão de RUE

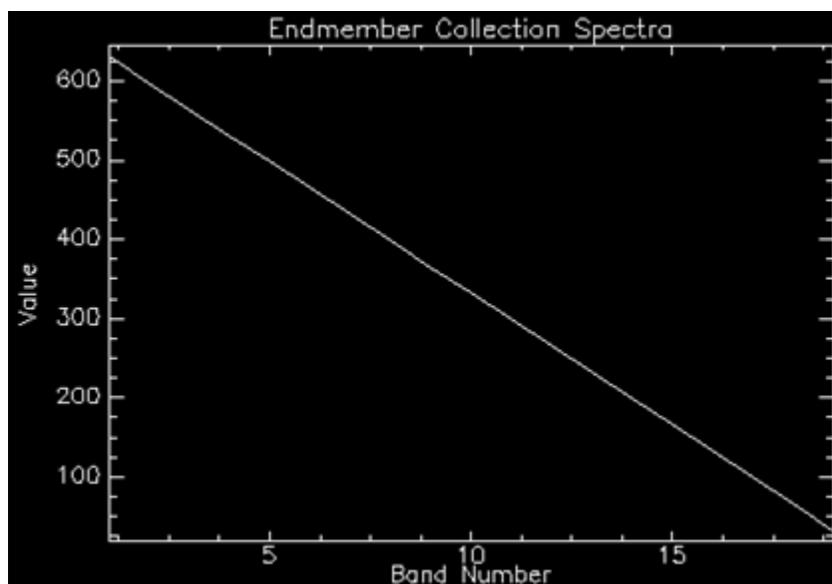
O resultado desta pesquisa pode ser analisado através do RUE, índice de eficiência do uso da chuva pela vegetação, apresenta uma tendência hipotética à degradação, para os biomas Cerrado e Caatinga, com isso, normalmente os valores de índice de vegetação são apresentados em seu formato decimal, variando de 0 a 1 e, portanto, os valores de RUE também são exibidos nesta escala.

Neste trabalho os valores obtidos e apresentados de RUE, foram adquiridos através de valores inteiros de EVI, que variam de 0 a 10.000, portanto, com o proxy RUE gerado a partir da divisão entre o índice de vegetação e a precipitação, utilizando os dados dos anos 2000 a 2018, os valores apresentado neste trabalho, estão no formato decimal.

Em relação às curvas padrão de tendência à degradação, a do bioma Caatinga obteve uma amplitude maior em relação ao do Cerrado. Esta resposta de amplitude se deve a que na Caatinga as chuvas são mais concentradas e a vegetação, que se encontra com pouca área foliar na seca, obtêm uma alta recuperação no período chuvoso. Este padrão também se encontra no Cerrado, todavia é menos acentuado que na Caatinga.

O maior e o menor valor de RUE entre períodos para a Caatinga correspondeu a 631,02 e 33,21, respectivamente. A figura 2 apresenta esta amplitude de valores máximos e mínimos, apresentados de forma decrescente, de modo a caracterizar uma curva padrão de tendência à degradação hipotética. Esta curva serviu para treinamento do algoritmo SAM para as imagens anuais de RUE da Caatinga.

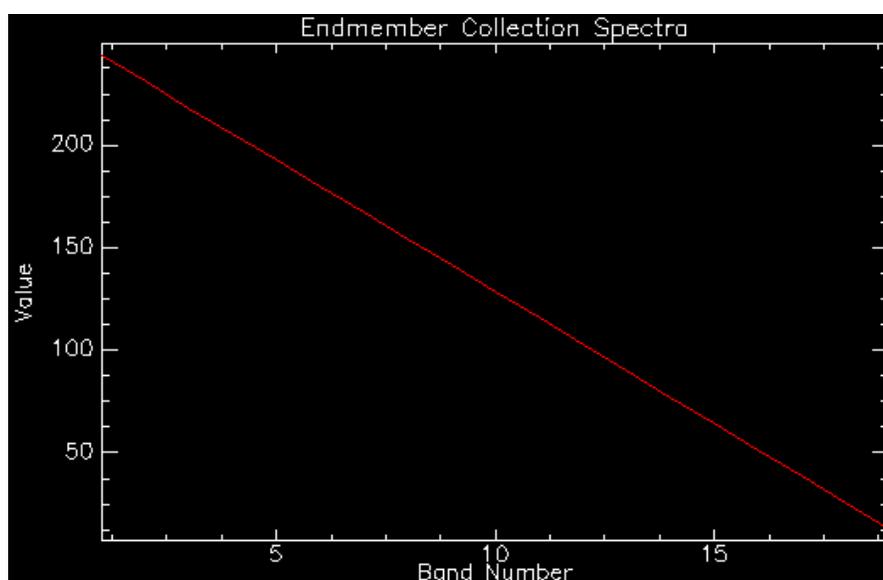
Figura 2: Valores RUE de curva padrão de tendência de degradação da terra para o Bioma Caatinga para treinamento do algoritmo SAM.



Elaborado por Gustavo Felipe Balu  Arcoverde (2020)

O maior e o menor valor de RUE entre períodos para o Cerrado correspondeu a 244,07 e 12,85, respectivamente. A figura 3 apresenta a amplitude de valores máximos e mínimos, apresentados de forma decrescente, de modo a caracterizar uma curva padrão de tendência   degrada o hipotética. Esta curva serviu para treinamento do algoritmo SAM para as imagens anuais de RUE do Cerrado.

Figura 3: Valores RUE de curva padrão de tendência de degrada o da terra para o Bioma Cerrado para treinamento do algoritmo SAM.



Elaborado por Gustavo Felipe Balu  Arcoverde (2020)

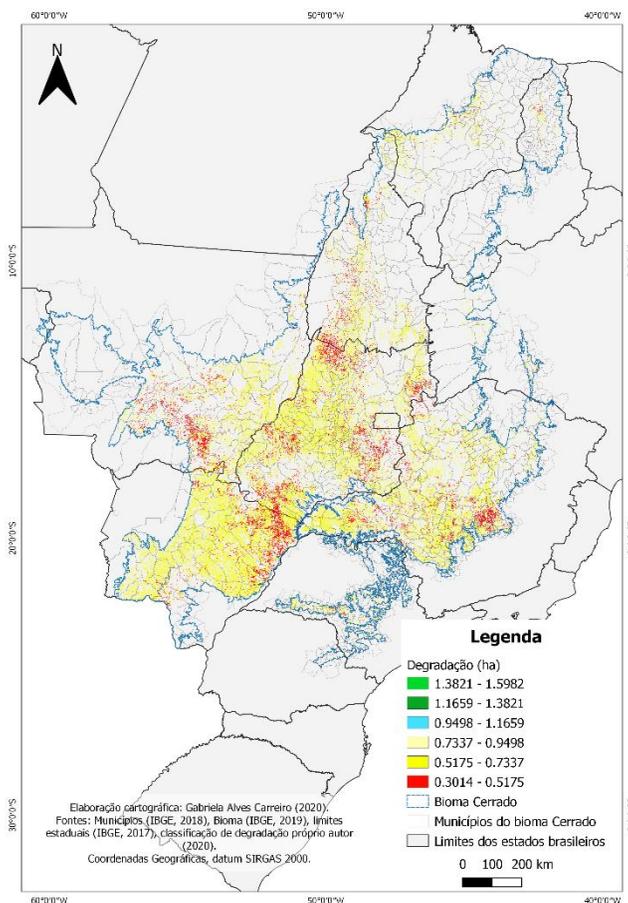
4.2 Classificação de tendências de processos degradativos

Conforme metodologia, adotou-se o algoritmo SAM para as classificações das imagens RUE anuais a partir das curvas padrão. Para tanto, utilizou-se imagens denominadas de “Regras” (Rules em inglês). Trata-se de imagens que apresentam um resultado anterior ao dado categórico, normalmente apresentado nas imagens classificadas. Dependendo do algoritmo classificatório, os mapas de Regras podem representar probabilidades, angulações etc., para cada uma das classes treinadas. No caso deste trabalho, utilizamos membros finais (curvas padrão) para um algoritmo (SAM). Desta forma, os mapas de Regras representaram o ângulo em radianos a partir da curva padrão apresentada, e quanto menor for este valor melhor representará esta curva. Sendo assim, as figuras 4 e 5 apresentam esses mapas de Regras para o Cerrado e Caatinga, respectivamente, em que foram atribuídas cores mais quentes aos seus menores valores, representando as áreas de maior tendência à degradação conforme este trabalho.

O bioma Cerrado, no mapa (figura 4) elaborado apresenta uma tendência hipotética à degradação nos estados do Mato Grosso do Sul (MS), Mato Grosso (MT), Goiás (GO), Minas Gerais (MG), São Paulo (SP), Tocantins (TO), Piauí (PI) e Maranhão (MA)

- MS: exibe a tendência nas porções Centro-Norte e Leste nas proximidades com o estado do Goiás;
- MT: apresenta esse aspecto nos municípios próximos ao Pantanal e a Amazônia;
- GO: exibe de forma menos concentrada, porém em mais regiões, como o Sudoeste do estado, área próxima ao estado do MS, ao Oeste, municípios próximos ao estado de MT, ao Norte, nas proximidades do estado de TO, a Nordeste, na vizinhança da mesma região do estado de MG, e por fim nas regiões Sudeste e ao entorno do Distrito Federal;
- MG: exibe essa tendência na região Central, nas proximidades do Alto São Francisco e Campos das Vertentes, e Triângulo Mineiro;
- SP: apresenta de modo pontual entre as regiões Centro-Oeste e Médio Paranapanema.
- TO: apresenta pequena tendência ao longo do território, com leve área em maior evidência na região Norte, na divisa com a Amazônia e na região Sul, na divisa com o estado do GO;
- PI: apresenta a tendência entre as regiões Norte e Centro-Norte do estado.
- MA: dentre os estados citados, foi o que apresentou menor tendência ao longo de seu território, com pequenos fragmentos na área próxima a Amazônia.

Figura 4: Mapa de tendência à Degradação no Cerrado - (tons mais avermelhados significam maior tendência à degradação)



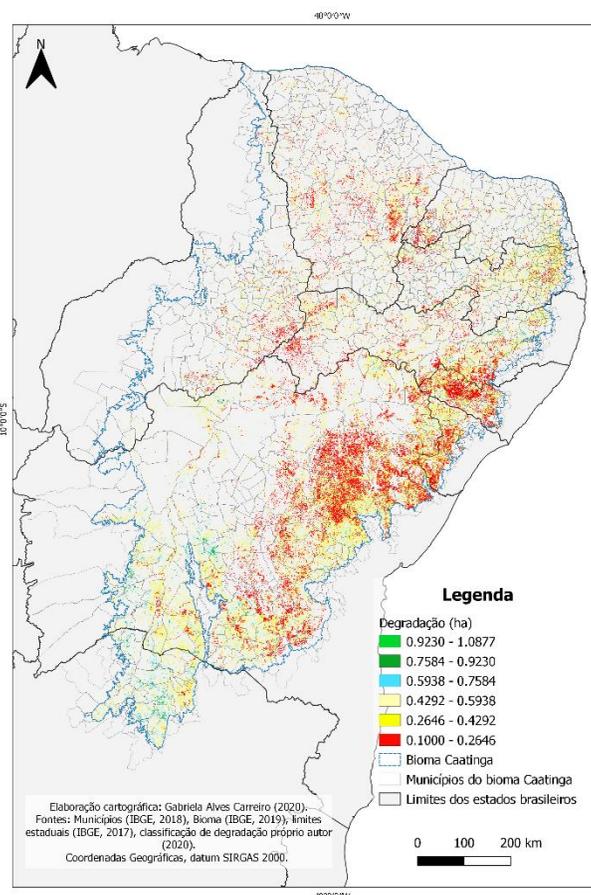
Elaborado: Gabriela Alves Carreiro (2020)

Por meio do mapa (figura 5) elaborado para o bioma Caatinga uma tendência hipotética à degradação, trazem evidências nos municípios localizados no agreste e no sertão, com mais evidência para os estados da Bahia (BA), Sergipe (SE) e Alagoas (AL), contudo, os demais estados como Pernambuco (PE), Paraíba (PB), Rio Grande do Norte (RN), Ceará (CE) e Piauí (PI) também apresentaram, com isso:

- BA: exibe tendência na região Sudeste, com maior evidência no Centro-Leste e Centro-Norte, na região Norte nas proximidades com o estado do PE e Nordeste ao entorno dos estados de AL e SE.
- SE: apresenta tendência na região Centro-Sul, nos municípios próximos ao estado da BA e Agreste Central.
- AL: apresenta tendência de maneira concentrada e com bastante evidência no Sertão e no Agreste Alagoano.
- PE: exibe tendência na região do São Francisco e Sertão, nas proximidades do estado do PI, e no Agreste pernambucano próximo ao estado de AL.
- PB: apresenta tendência com maior evidência no Alto Sertão, nos municípios próximos ao estado do RN e CE, na região da Borborema também se manifesta, e no Brejo Serrano de modo pouco pontual.
- RN: apresenta maior tendência na região do Alto Oeste do estado, nas proximidades do estado do CE.
- CE: exibe tendência mais acentuada nas regiões Centro-Sul e Jaguaribe, nas proximidades dos municípios dos estados da PB e RN.

- PI: na porção do estado que está localizada no domínio da Caatinga a tendência se apresenta na região Sudoeste, e na região Sudeste, próximo ao estado do PE.

Figura 5: Mapa de tendência à Degradação na Caatinga - (tons mais avermelhados significam maior tendência à degradação)

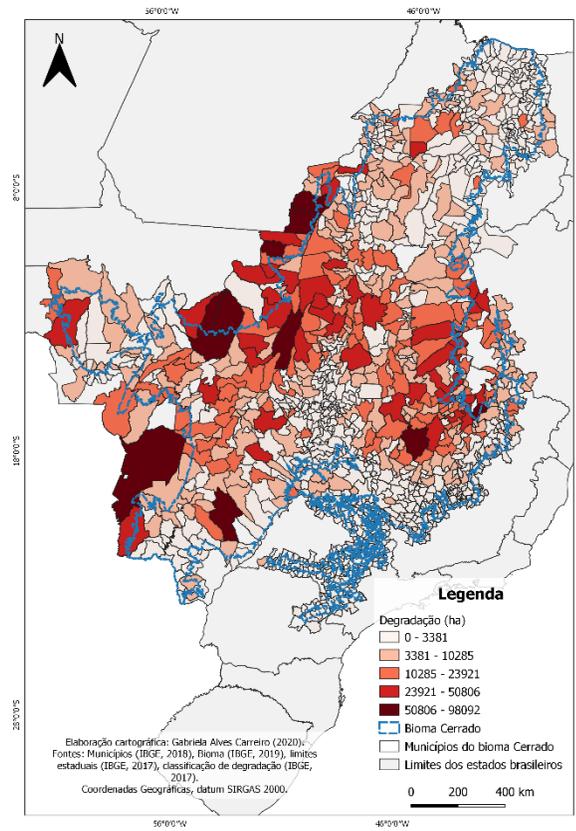


Elaborado: Gabriela Alves Carreiro (2020)

4.3 Comparabilidade com outros mapeamentos semelhantes de degradação

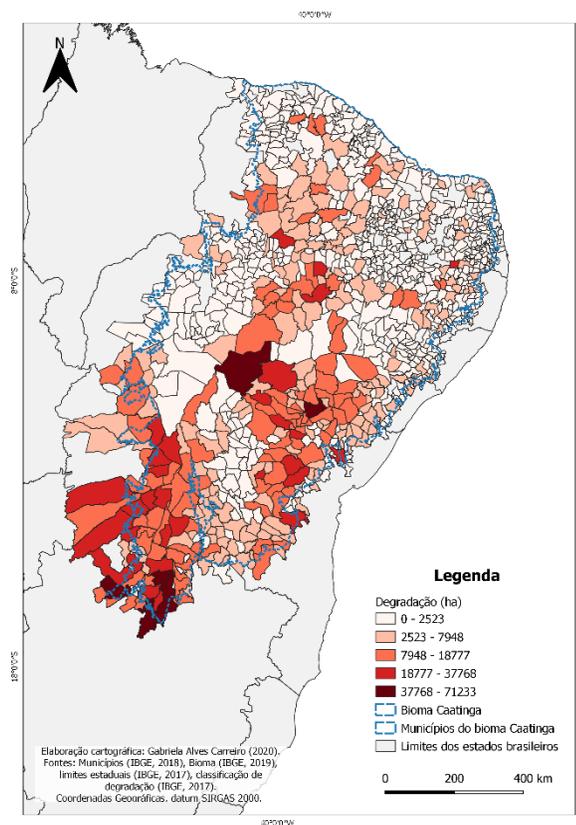
Como ponto de comparação aos dados apresentados através de mapas de tendência à degradação hipotética para os biomas Cerrado e Caatinga (figura 4 e 5), foram utilizados mapas de pastagem plantadas em más condições do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE – (Figura 6 e 7):

Figura 6: Mapa de pastagens em más condições no Cerrado.



Fonte: IBGE (2017)

Figura 7: Mapa de pastagens em más condições na Caatinga



Fonte: IBGE (2017)

No bioma Cerrado, segundo o mapa do IBGE a região que mais apresentou degradação foi nas proximidades e nas áreas de transição com a Amazônia e

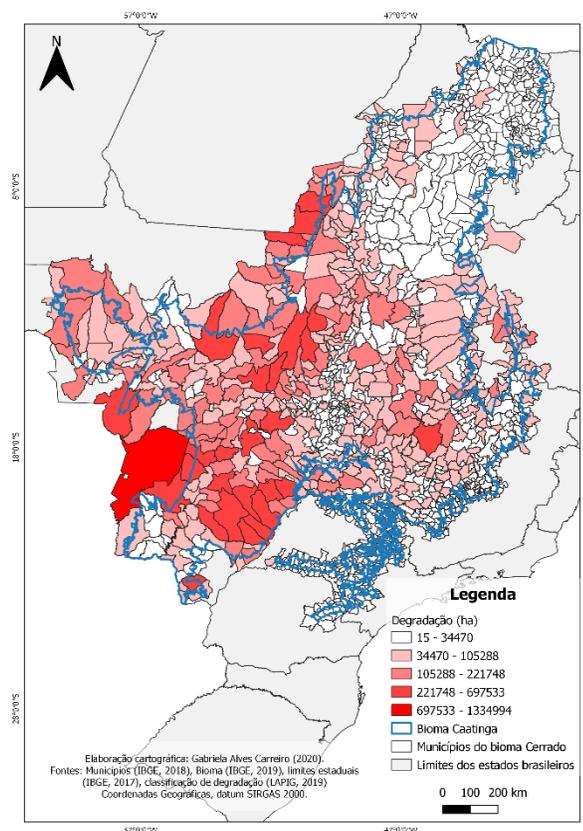
Caatinga, portanto, em relação ao mapa gerado como tendência à degradação hipotética para o bioma em análise, a tendência não se apresentou com tanta evidência assim nas regiões citadas, porém existe relação com as áreas apontadas de cada estado, pois áreas classificadas com alto índice de degradação por hectare pelo IBGE, também foram apontadas na figura 3, um exemplo é a distribuição pelo estado do Goiás.

No bioma Caatinga, segundo o mapa do IBGE as regiões que mais apresentaram pastagens em más condições – degradadas – foram nas regiões do Agreste e Sertão, os estados com maior evidência de degradação é a Bahia, na mesma região apontada pelo mapa gerado como tendência à degradação hipotética (figura 5), Sergipe, Pernambuco, Ceará e Piauí também evidenciaram esse índice.

Segundo o IBGE (2017), os resultados apresentados são preliminares, com isso estão sujeitos à alteração.

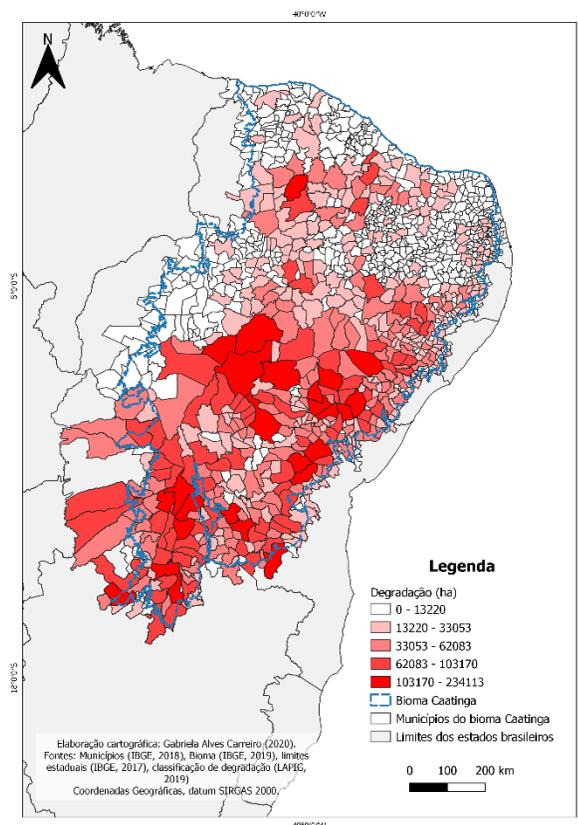
Para uma segunda comparação com dados gerados através deste trabalho, foram utilizados mapas de áreas de pastagem do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento – LAPIG – (figura 8 e 9):

Figura 8: Mapa de áreas de pastagens no Cerrado.



Fonte: LAPIG (2019)

Figura 9: Mapa de áreas de pastagens na Caatinga.



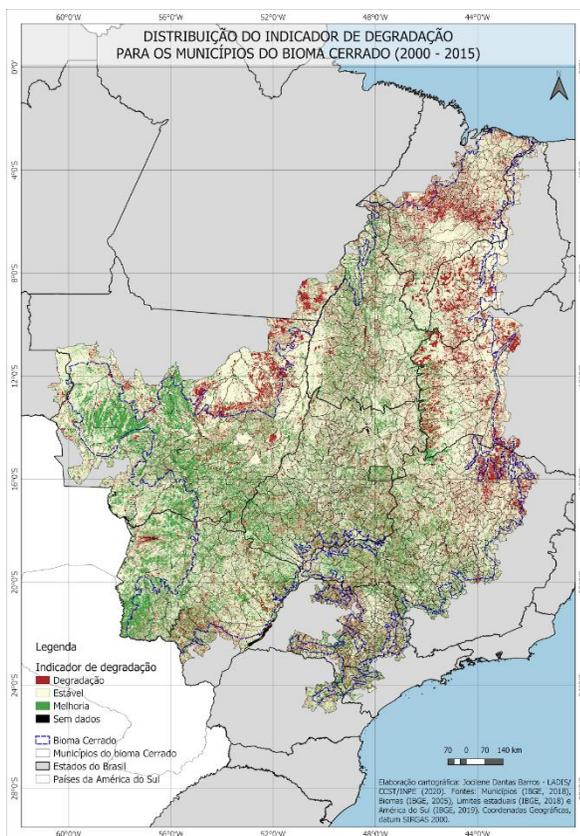
Fonte: LAPIG (2019)

De acordo com o mapa gerado pelo LAPIG para o bioma Cerrado (figura 8), apresenta-se uma maior tendência a degradação nas áreas próximas a Amazônia, os estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e Tocantins, também apresentam índices de degradação, com isso, em relação a figura 3, os pontos apresentados para cada região são similares.

Já o bioma Caatinga, no mapa gerado pelo LAPIG, mais uma vez pontua a região do Agreste e Sertão como mais degradado, o estado da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Ceará e a porção do Alto Oeste do Rio Grande do Norte, também são classificadas com maior tendência à degradação hipotética na figura 5.

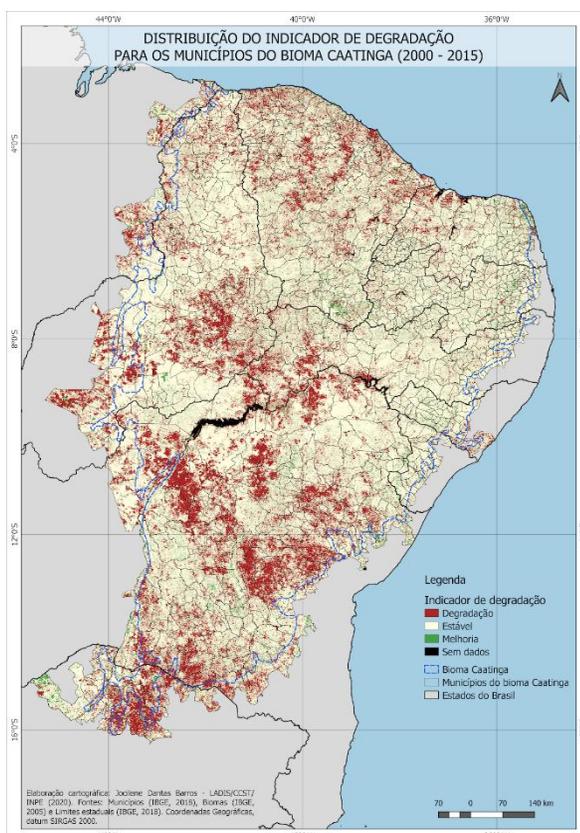
Por fim, a última comparação a ser realizada, é de acordo com os mapas de indicador de degradação gerados pela pesquisadora bolsista PCI Jocilene Barros, do laboratório de Análise e Desenvolvimento de Indicadores para a Sustentabilidade (LADIS), do CCST/INPE.

Figura 10: Mapa de distribuição espacial do indicador de degradação para os municípios do bioma Cerrado.



Elaborado: Jocilene Barros (2020)

Figura 11: Distribuição espacial do indicador de degradação para os municípios do bioma Caatinga.



Elaborado: Jocilene Barros (2020)

O bioma Cerrado na figura 10 apresenta maior índice de degradação nas áreas próximas a Amazônia e Caatinga, como também na figura 6, portanto em

relação a figura 4, não há relação nas áreas apontadas no mapa de tendência à degradação hipotética.

O bioma Caatinga, na figura 11 pontua maior índice de degradação nas regiões Centro e Sul, com maior evidência os estados da Bahia, Pernambuco e Piauí, já a figura 4, também apresenta a mesma tendência ao Centro. Criando uma relação entre as duas figuras (11 e 5), existe em algumas áreas a mesma tendência à degradação hipotética, como por exemplo, na região Centro-Leste e Centro-Norte do estado da Bahia.

5 Conclusão

Os mapas gerados a partir da análise espacial e temporal, dos dados dos anos de 2000 a 2018, que resultaram no RUE, apresentam através deste índice uma maior resiliência na Caatinga, por conta da amplitude apresentada na curva padrão de tendência à degradação, com isso o Cerrado está mais suscetível a mudança para um novo domínio de estabilidade, caracterizando as condições ambientais que apontam processos de degradação.

6 Referências

AB'SABER, A. N. O domínio dos cerrados: introdução ao conhecimento. **Revista do Serviço Público**, v. 40, n. 4, p. 41–56, 1983.

AB'SABER, A. N. **OS DOMÍNIOS DE NATUREZA NO BRASIL: POTENCIALIDADES PAISAGÍSTICAS**. 7. ed. São Paulo: ATELIÊ EDITORIAL, 2003.

ALBUQUERQUE, A. W. DE et al. Determinação de fatores da equação universal de perda de solo em Sumé, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 153–160, 2005.

ANDRADE-LIMA, D. The Caatinga Dominion. **REVISTA BRASILEIRA DE BOTANICA**, v. 4, p. 149–153, 1981.

ARAUJO, K. D. Análise da vegetação e organismos edáficos em áreas de caatinga sob pastejo e aspectos socioeconômicos e ambientais de São João do Cariri - PB. 2010.

ARENS, K. **O Cerrado como vegetação oligotrófica**, 1958. Disponível em: <<https://www.revistas.usp.br/bolfflchsb/article/view/58409/61405>>

BARCELLOS, T. G. Efeitos Do Fogo Sobre a Fauna E a Flora No Cerrado. p. 31, 2001.

BHANDARI, J.; PAN, X.; BIJAYA, G. C. D. Spatial and seasonal variation in rain use efficiency in semiarid grasslands of Inner Mongolia. **Advances in Meteorology**, v. 2015, n. 1, 2015.

BIVAND, R. et al. **RGdal**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=rgdal>>.

BIVAND, R. et al. **Maptools**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=maptools>>.

BOND, W. J.; KEELEY, J. E. Fire as a global “herbivore”: The ecology and evolution of flammable ecosystems. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 7, p. 387–394, 2005.

- BONKOWSKI, M.; GRIFFITHS, B.; SCRIMGEOUR, C. Substrate heterogeneity and microfauna in soil organic “hotspots” as determinants of nitrogen capture and growth of ryegrass. **Applied Soil Ecology**, v. 14, n. 1, p. 37–53, 2000.
- BORCHERT, R. (S): R. B. P. BY : E. S. OF A. S. A. S. W. S. D. P. A. D. O. T. D. FOREST. Soil and Stem Water Storage Determine Phenology and Distribution of Tropical Dry Forest Trees. **Ecological Society of Americ**, v. 75, n. 5, p. 1437–1449, 2014.
- BORCHERT, R.; RIVERA, G. Photoperiodic control of seasonal development and dormancy in tropical stem-succulent trees. **Tree Physiology**, v. 21, n. 4, p. 213–221, 2001.
- BOTELHO, R.; IBGE. **Território e meio ambienteAtlas nacional do Brasil Milton Santos**, 2010. Disponível em:
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv47603_cap4_pt8.pdf>
- BULHÃO, C. F.; FIGUEIREDO, P. S. Fenologia de leguminosas arbóreas em uma área de cerrado marginal no nordeste do Maranhão. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 25, n. 3, p. 361–369, 2002.
- BUSETTO, L.; RANGHETTI, L.; WASSER, L. **MODISrsp**. Disponível em:
<<https://cran.r-project.org/package=MODISrsp>>.
- CHAVES, I. DE B. et al. Uma classificação morfo-estrutural para descrição da biomassa da vegetação da Caatinga. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 06, n. 2, p. 225–228, 2008.
- CHOUDHARY MP, CHAUHAN GS, K. Y. Environmental Degradation : Causes , Impacts and Mitigation. **ResearchGate**, n. February, p. 1–4, 2015.
- D’ODORICO, P. et al. Global desertification: Drivers and feedbacks. **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 326–344, 2013.
- DARDEL, C. et al. Rain-use-efficiency: What it tells us about the conflicting sahel greening and sahelian paradox. **Remote Sensing**, v. 6, n. 4, p. 3446–3474, 2014.
- DAS NEVES, E. L.; FUNCH, L. S.; VIANA, B. F. Comportamento fenológico de três espécies de *Jatropha* (Euphorbiaceae) da Caatinga, semi-árido do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 33, n. 1, p. 155–166, 2010.
- DECKMYN, A. **Maps**. Disponível em:
<<https://www.rdocumentation.org/packages/maps>>.
- DEGRADATION, L.; IN, A. **LADA. Land degradation assessment in drylands**. [s.l: s.n.].
- DIDAN, K.; NASA. **MOD13Q1 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V006**. Disponível em:
<<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13q1v006/>>.
- DURIGAN, G. et al. Indução do processo de regeneração da vegetação de cerrado em área de pastagem, Assis, SP. **Acta Botanica Brasilica**, v. 12, n. 3, p. 421–429, 1998.
- DURIGAN, G. et al. Regeneração natural da vegetação de Cerrado sob florestas plantadas com espécies nativas e exóticas. **Pesquisas em conservação e recuperação ambiental no Oeste Paulista: resultados da cooperação Brasil/Japão**, p. 349–362, 2004.
- GESTEL, C. A. M.; KRUIDENIER, M.; BERG, M. P. Suitability of wheat straw decomposition, cotton strip degradation and bait-lamina feeding tests to determine soil invertebrate activity. **Biology and Fertility of Soils**, v. 37, n. 2, p. 115–123, 2003.
- GIUSTINA, C. C. DELLA. Degradação e conservação do cerrado: uma história

ambiental do estado de Goiás. **Tese de Doutorado Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Sustentável (PPG-CDS) da Universidade de Brasília (UnB) Centro de Desenvolvimento Sustentável (CDS)**, 2013.

GRIZ, L. M. S.; MACHADO, I. C. S. Fruiting phenology and seed dispersal syndromes in caatinga, a tropical dry forest in the northeast of Brazil. **Journal of Tropical Ecology**, v. 17, n. 2, p. 303–321, 2001.

HIJMANS, R. **raster**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/raster/versions/3.1-5/topics/raster>>.

HOLLING, C. S. Resilience and Stability of Ecological Systems. **Annu.Rev.Ecol.Syst.**, v. 4, p. 1–23, 1973.

IBAMA. GEO BRASIL 2002: Perspectivas do Meio Ambiente no Brasil. **Edições IBAMA Brasília 2002**, p. 475, 2002.

IBGE. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira nº 1**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ISUNDWA, K. F.; MOURAD, K. A. The potential for water stewardship partnership in Kenya. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 12, 2019.

JACOBS, L. E. et al. Diversidade da Fauna Edáfica em Campo Nativo , Cultura de Cobertura Milho + Feijão de Porco sob Plantio Direto e Solo Descoberto. p. 3–6, 2007.

JUSTICE, C. O. et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.

KARNIELI, A. et al. Temporal dynamics of soil and vegetation spectral responses in a semi-arid environment. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 19, p. 4073–4087, 2002.

KRUSE, F. A. et al. The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, n. 2–3, p. 145–163, 1993.

LADA. **LADA. Land degradation assessment in drylands**. [s.l: s.n.].

LANG, D. T.; CRAN, T. **RCurl**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=RCurl>>.

LAWRENCE, M.; LANG, D. T. **RGtk2**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/RGtk2/index.html>>.

LENZA, E.; KLINK, C. A. Comportamento fenológico de espécies lenhosas em um cerrado sentido restrito de Brasília, DF. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 29, n. 4, p. 627–638, 2006.

LYRA, S. P. Biestabilidade em Modelos Ecológicos. 2019.

MACHADO, I. C. S.; BARROS, L. M.; SAMPAIO, E. V. S. B. Phenology of caatinga species at Serra Talhada, PE, Northeastern Brazil. **Biotropica**, v. 29, n. 1, p. 57–68, 1997.

MCILROY, D. **Mapproj**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/mapproj/index.html>>.

MIRANDA, H. S. et al. Fires in the cerrado, the Brazilian savanna. **Tropical Fire Ecology**, v. 2, p. 427–450, 2009.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Caatinga**. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biomas/caatinga>>.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **PPCerrado - Plano de ação para prevenção e controle do desmameamento e das queimadas no Cerrado - 2a fase (2014-2015)**. [s.l: s.n.].

NAIMI, B. **RTs**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=rts>>.

NASCIMENTO, I. V. Cerrado: o fogo como agente ecológico. **Territorium**, n. 8, p. 25–35, 2001.

OLIVEIRA, A. D. A. S. DE; SABINO, S. P.; REQUERENTE, I. Avaliação de Impactos Ambientais 1 . Informações Preliminares. 2020.

ONU. **Glossary of environment statistics**, 1997.

OPGEN-RHEIN, R.; ZUBER, V.; STRIMMER, K. **st**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=st>>.

PEBESMA, E. et al. **Sp**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=sp>>.

PEREIRA, B. A. DA S.; VENTUROLI, F.; CARVALHO, F. A. Florestas Estacionais No Cerrado: Uma Visão Geral. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 446–455, 2011.

QUEIROZ, J. A. et al. Análise da estrutura fitossociológica da Serra do Monte, Boqueirão, Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 6, n. 1, p. 251–259, 2006.

R-CORE ORG. **ts**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/stats/versions/3.6.2/topics/ts>>.

RIBEIRO FILHO, M. R.; BARROS, G. M.; RIBEIRO, M. R. Manejo, uso e conservação dos solos do Bioma Caatinga. **Anais do I Simpósio do Bioma Caatinga**, p. 23–33, 2016.

SAMPAIO, E. V. D. S. B.; ARAUJO, M. DO S. B.; SAMPAIO, Y. S. B. Propensão À Desertificação No Semi-Árido Brasileiro. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 22, n. 2, p. 59–76, 2005.

SANO, E. E. et al. Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 153–156, 2008.

SCHEFFER, M. **Critical Transitions in Nature and Society**. 1. ed. [s.l.] Princeton University Press, 2009.

SILANS, A. P.; SILVA, F. M.; BARBOSA, F. D. A. D. R. Determinação in loco da difusividade térmica num solo da região de caatinga (PB). **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, n. 1, p. 41–48, 2006.

SILVA, C. C. DE A. Caracteres de resiliência e usos antrópicos em espécies vegetais da caatinga. 2015.

SULTAN, S. E. Phenotypic plasticity in plants: A case study in ecological development. **Evolution and Development**, v. 5, n. 1, p. 25–33, 2003.

VERZANI, J. **gWidgets**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/gWidgets>>.

VERZANI, J.; LAWRENCE, M. **gWidgetsRGtk2**. Disponível em: <<https://www.rdocumentation.org/packages/gWidgetsRGtk2>>.

YAN, L.; ROY, D. P. Automated crop field extraction from multi-temporal Web Enabled Landsat Data. **Remote Sensing of Environment**, v. 144, n. March, p. 42–64, 2014.

ZEILEIS, A. **Zoo**. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/package=zoo>>.