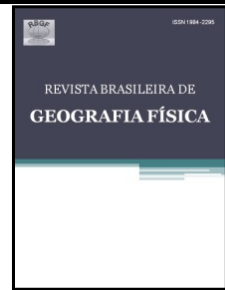




ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Análise do conteúdo de umidade foliar de fitofisionomias do Cerrado com uso de imagens do *multispectral instrument* do satélite Sentinel 2

Leidiane de Paula Rezende<sup>1\*</sup>, Ricardo Vicente Ferreira<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Geografia, Uberaba, Minas Gerais, Brasil - \*leidianedepaula@outlook.com.

<sup>2</sup>Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Programa de Pós-Graduação Ciência e Tecnologia Ambiental, Uberaba, Minas Gerais, Brasil - ricardo.ferreira@uftm.edu.br.

Artigo recebido em 17/12/2019 e aceito em 12/08/2020

### RESUMO

Em episódios de queimadas, o conteúdo de umidade da matéria vegetal viva ou morta é um elemento fundamental na caracterização da carga de combustível do fogo. Imagens de satélite e levantamentos de campo podem auxiliar na estimativa do conteúdo de umidade do combustível - Fuel Moisture Content (FMC) - em diferentes ambientes. O FMC é medido com base no peso úmido sobre o peso seco de amostras de vegetação. Neste estudo foi estimado o FMC de 24 amostras coletadas entre maio e outubro de 2019 em duas fitofisionomias do Cerrado: Cerrado Típico e Campo Limpo, no município de Sacramento/MG. Os resultados foram correlacionados com a reflectância das faixas espectrais do MSI (MultiSpectral Instrument) do Sentinel 2. Dados de umidade do solo, temperatura, precipitação e umidade do ar foram utilizados em teste de regressão múltipla para verificar possíveis impactos sobre resultados do FMC analisado. A banda espectral SWIR 1 teve melhor correlação ( $R^2= 0,33$ ) com amostra do Campo Limpo, a reflectância aumenta à medida que a umidade da planta decai, convertendo-se em folhas mortas. No Cerrado Típico o FMC aumentou no período analisado, mantendo-se com folhas vivas. Os vegetais vivos recorrem à umidade do solo, mantendo-se verdes na estiagem. Os vegetais mortos são afetados por variações atmosféricas e são mais propensos às queimadas. No Campo Limpo, o risco de fogo é eminente, e a análise da reflectância do Infravermelho de ondas curtas (SWIR) é uma estratégia para a predição do risco de ocorrência de queimadas neste ambiente.

Palavras-chave: risco de queimadas; conteúdo umidade do combustível; reflectância

## Leaf moisture content analysis of Cerrado phytophysionomies using Sentinel 2 satellite multispectral instrument images

### ABSTRACT

Moisture content of living or dead plant material is a fundamental element in the characterization of the fire's fuel load in wildfire episodes. Satellite imagery and field surveys can help to estimate Fuel Moisture Content (FMC) in different environments. FMC is computed as wet weight over dry weight of vegetation samples. In this study, 24 FMC samples of Brazilian Savana vegetation were collected between May and October 2019 in two phytotypes: Cerrado Típico and Campo Limpo, in the municipality of Sacramento / MG. We applied a statistic correlation to reflectance of the Sentinel-2 MSI spectral bands (MultiSpectral Instrument). Data on soil moisture, temperature, precipitation and air humidity were tested in a Multiple Linear Regression to verify possible impacts of these elements on FMC results. SWIR 1 band had a better correlation ( $R^2 = 0.33$ ) with Campo Limpo samples, the reflectance increases as the plant's humidity decreases, turning to dead leaves. In Cerrado Típico, FMC increased during the period, keeping leaves alive. Dead leaves are affected by atmospheric variations and are more prone to burning. The risk of fire is imminent in Campo Limpo and reflectance analysis of short wave infrared (SWIR) is a strategy to predict risk of fires in this environment.

Keywords: wildfire risk; fuel moisture content; reflectance

### Introdução

A exploração de terras para a produção de alimentos e acesso à recursos naturais tem

resultado em fortes pressões sobre o uso do solo e mudanças climáticas (IPCC, 2019).

O relatório sobre Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil aponta que nas maiores participações de emissões brutas de Dióxido de Carbono equivalente por setor, 38% correspondem ao Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas, 27% à Energia, e 25% à Agropecuária no ano de 2015 (MCTIC, 2017).

Como última fronteira agrícola do planeta (Zaterka Giroldo, 2016), o Cerrado brasileiro perdeu mais da metade dos 2 milhões de km<sup>2</sup> originais nos últimos 55 anos, tornando-se o celeiro do Brasil com mais de 20 milhões de ha de terras cultiváveis e 56 milhões de ha de pastagens cultivadas, pondo fim a espécies endêmicas devido sua fragmentação (Latrubesse et al., 2019). E ainda segundo os autores, a proporção da área protegida do Cerrado nas bacias hidrográficas é insignificante (0,8 - 4% em 10 das 11 bacias), bem abaixo da taxa nacional de 28,44% da área de conservação no Brasil.

Devido à extrema fragmentação, muitas das unidades de conservação em áreas do Cerrado, não garantem a manutenção ou a representatividade desse ecossistema. A vegetação é um componente primário do ciclo hidrológico, e os altos níveis de desmatamento e conversão da vegetação natural em atividades agropecuárias desencadeiam mudanças hidrológicas, geomorfológicas e bioquímicas em pequenos e grandes rios e mudanças significativas na temperatura da superfície da terra (Latrubesse et al., 2019).

O Cerrado é um bioma que evoluiu com o fogo e suas espécies, em maioria, dependem dele para proliferar. Por milhares de anos o Cerrado tem adaptado suas espécies endêmicas, seja pela suberização de troncos ou pela capacidade de rebrota através de copa, rizomas, caule e raiz e de germinação de sementes estimulada pela queima, e resistido às ações de fenômenos naturais, principalmente do fogo (Zaterka Giroldo, 2016). Entretanto, o uso indiscriminado do fogo tem provocado desequilíbrios no Bioma Cerrado, promovendo a fragmentação e degradação das formações que compõem sua biodiversidade (Lotufo et al., 2020)

Avaliações recentes baseadas em satélites de observação da Terra estimam que cerca de 4 milhões de km<sup>2</sup> são queimados globalmente todos os anos, dessa forma, a grande variedade de efeitos do fogo sugere a necessidade de avaliações abrangentes da vulnerabilidade de fatores sociais e ecológicos pelo fogo ao longo do tempo (Chuvieco et al, 2019).

De acordo Argibay et al. (2020), a produtividade e umidade da biomassa para a

queima em eventos de incêndios na vegetação varia de acordo os ciclos climatológicos anuais. Ano com precipitações acima da média incorre em poucas áreas queimadas e maior formação de biomassa, em contrapartida, ano com precipitações abaixo da média favorece formação de combustível seco para queima e resulta em grandes áreas queimadas. Tal constatação sinaliza que um aspecto importante está na perda de umidade pela vegetação, pois é um dos elementos potencializa a formação combustível e, conseqüentemente, a maior ocorrência de queimadas.

Descrever os combustíveis (vegetais) e quantificá-los é importante para entender o comportamento do fogo, além de fornecer informações para as atividades relacionadas a gestão de incêndios, incluindo, queima prescrita, dificuldade de supressão, avaliação do perigo e tratamento de combustível (Serger et al., 2018).

Neste sentido, a metodologia empírica de Chuvieco et al. (2003) resulta em uma importante aplicação para a avaliação da formação de material combustível vegetal. A metodologia integra uma análise baseada na estimativa do *Fuel Moisture Content* (FMC), que é a medida do conteúdo de umidade do combustível vegetal, ou seja, da proporção da massa de água contida na vegetação em relação a massa seca. Estudos como de Chuvieco et al (2003) incluem uma série de fatores relacionados à ignição, propagação e vulnerabilidade de combustíveis, que também são analisados em outros estudos (Viegas et al. 2001; Ceccato et al. 2002; Chuvieco et al. 2010, 2014; Yebra et al. 2008, 2013, 2018; Caccamo et al. 2012; Argañaraz et al. 2018; Luo et al. 2019).

O FMC tem influência na inflamabilidade do combustível e na dinâmica do fogo. A inflamabilidade dos combustíveis tende a diminuir em níveis altos o FMC, uma vez que é necessária mais energia para evaporar as taxas de água presentes no material vegetal antes da queima (Argañaraz et al., 2018), já a baixa umidade da vegetação apresenta maior propensão a incêndios (Yebra et al. 2008).

O Sensoriamento Remoto (SR) é uma geotecnologia fundamental para o estudo do FMC, e não apenas contribui para estimativa do FMC como mostra a distribuição espacial e temporal dos combustíveis com maior escassez de água. (Chuvieco et al., 2003). Geralmente, os estudos por SR adotam uma metodologia empírica baseada em ajuste estatístico entre o índice de reflectância da vegetação com o FMC medido em campo. O objetivo é contribuir e melhorar os atuais métodos de estimativa de risco de incêndio, para se aplicar em grandes áreas. O monitoramento por satélite para riscos de incêndio iniciou-se com Burgan et

al. (1993), e foi sendo aprimorado por outras abordagens empíricas e de análise.

Este estudo é um ensaio que avalia as estimativas do FMC de duas fitofisionomias do Cerrado: Cerrado Típico e Campo Limpo (macega, nome popularmente atribuído na região) de acordo com os índices de reflectância por faixas espectrais do satélite Sentinel-2. A análise empírica dos dados permite calibrar faixas espectrais com o FMC, já que suas variações alteram a reflectância e na temperatura do combustível. Sendo assim, atribuídos aos resultados, é uma metodologia que pode ser aplicada em grandes áreas da região do Cerrado, estimando a quantidade de combustível e com isso, riscos de incêndios.

### Área de estudo

A coleta dos dados foi realizada em uma área rural do município de Sacramento/MG, localizada na microrregião do Triângulo Mineiro (Figura 1). A área se encontra inserida no domínio fitogeográfico do Cerrado. De acordo com Ribeiro e Walter (1998), o termo Cerrado é utilizado para designar o conjunto de formações florestais, savânicas e campestres. A floresta representa as áreas com predominância de espécies arbóreas com formação de dossel que pode ser contínuo ou

descontínuo. O termo savana refere-se às áreas com árvores e arbustos espalhados sobre um estrato herbáceo, sem a formação de dossel contínuo. Já o termo campo designa áreas com predomínio de espécies herbáceas e arbustivas, sem presença de árvores na paisagem. Dentre tais formações é possível ainda elencar fitofisionomias do Cerrado segundo a classificação de Ribeiro e Walter (1998).

Os critérios adotados para diferenciar os tipos fitofisionômicos são baseados primeiramente na fisionomia (forma), e posteriormente consideram-se aspectos do ambiente (fatores edáficos) e da composição florística. Adotando o critério de separação quanto ao tipo de fitofisionomia da área de estudo, os dois ambientes onde foram coletadas as amostras foram classificados como Cerrado Típico e Campo Limpo. O Cerrado Típico quanto ao seu subtipo se classifica dentre as formações savânicas cuja fitofisionomia se restringe ao Cerrado Sentido Restrito (Embrapa, 2019).

O Cerrado Sentido Restrito caracteriza-se pela presença de árvores baixas, inclinadas, tortuosas, com ramificações irregulares e retorcidas, e geralmente com evidências de queimadas. Os arbustos e subarbustos encontram-se espalhados, com algumas espécies apresentando

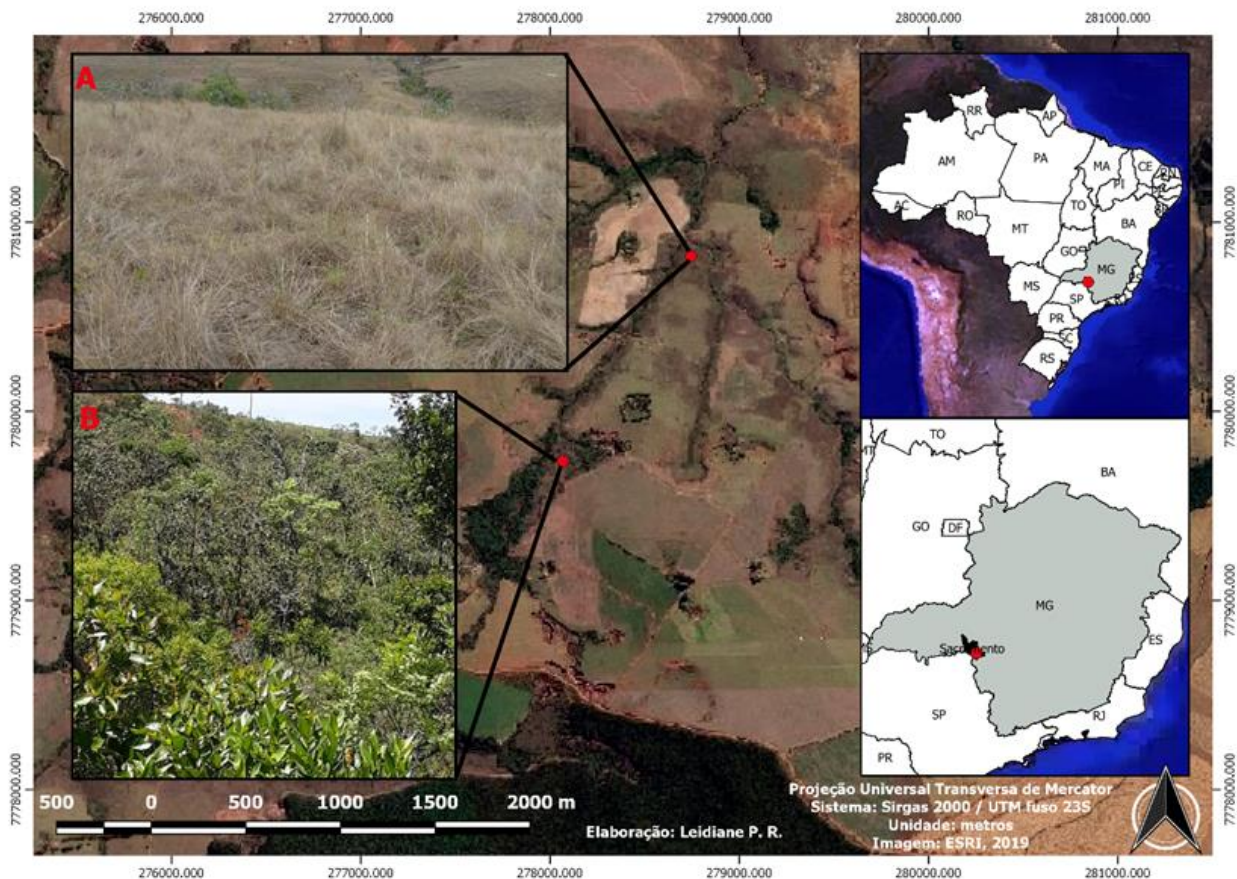


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo evidenciando as fitofisionomias amostrais coletadas. A: Campo Limpo; B: Cerrado Típico. Elaboração: os autores

órgãos subterrâneos perenes (xilopódios), que permitem a rebrota após queima ou corte.

De acordo com a literatura, as plantas arbóreas não sofrem restrição hídrica durante a estação seca e se adaptam a esta condição (xeromorfismo). O Cerrado Típico possui cobertura arbórea de 20% a 50% e altura média de três a seis metros. Trata-se de uma forma comum e intermediária entre o Cerrado Denso e o Cerrado Ralo (Ribeiro e Walter, 1998).

O Campo Limpo é caracterizado pelo predomínio de gramíneas, com raros arbustos e ausência completa de árvores, podendo ser encontrado em diversas posições topográficas, com diferentes variações no grau de umidade, profundidade e fertilidade do solo. Esse tipo de fitofisionomia apresenta variações determinadas pela umidade do solo e topografia. Na presença de um lençol freático profundo ocorre o Campo Limpo Seco, mas se o lençol freático for alto, ocorre o Campo Limpo Úmido, cada qual com sua composição florística típica, de acordo com a classificação de Ribeiro e Walter (1998). Na área de estudo, verifica-se o predomínio do Campo Limpo Seco.

## Materiais e métodos

Para a análise em Sensoriamento Remoto foram utilizadas imagens do sensor S2-MSI do satélite SENTINEL-2 nas bandas 08 (NIR – Infravermelho Próximo), 11 e 12 (SWIR 1 e 2 – Infravermelho de Ondas Curtas, respectivamente). O processamento digital das imagens foi feito com base no uso dos *softwares* Qgis v3.8 e Arcgis v10.6, instalados em microcomputadores do Laboratório de Cartografia e Geoprocessamento da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (CARTOGEO/UFTM). As imagens foram obtidas através do acesso ao navegador *EO Browser do Sentinel Hub* operado pela *Sinergise* com contribuições da *European Space Agency* (ESA).

O S2-MSI gera imagens da superfície terrestre com resolução espacial de 10m, com revisita a cada 5 dias, gerando 13 bandas espectrais, sendo: 4 bandas com resolução de 10m no campo do infravermelho próximo, 6 bandas com resolução de 20m no “red edge” e no infravermelho de ondas curtas (SWIRs) e 3 bandas com resolução de 60 m para correções atmosféricas. Após correção atmosférica das imagens, foi elaborado um banco de dados com valores da mediana do índice de reflectância da vegetação das três bandas, delimitando-se um polígono envolvente em escala de 6x6 *pixels* com base nos pontos das coordenadas onde foi feita a amostragem.

As abordagens multiespectrais por Sensoriamento Remoto são dependentes das propriedades de absorção da água das folhas nos comprimentos de onda no NIR ou SWIR, e as informações de conteúdo de água das plantas derivadas de observações multiespectrais são representativas da parte superior do dossel (Rao et al, 2020).

Ao longo dos anos, com base em observações de diferentes sistemas de sensores de satélite, incluindo medições nos comprimentos de onda do SWIR, foram propostos vários índices de vegetações levando em conta as características de absorção de água no SWIR, e NIR, que é sensível a mudanças na estrutura interna das folhas. Entre os índices mais referidos estão o Índice de Água com Diferenças Normalizadas (NDWI), Índice do Infravermelho por Diferença Normalizada (NDII), Índice de Água com Proporção Simples (SRWI), Índice de Estresse por Umidade (MSI) e Índice de umidade global da vegetação (GVMI) (Momadou et al, 2013).

Para este estudo, foram obtidos também dados de precipitação e do conteúdo de umidade do solo para análise como possíveis fatores impactantes do FMC. Os dados de precipitação foram adquiridos através do sistema operacional *Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks* (PERSIANN), desenvolvido pelo *Center for Hydrometeorology & Remote Sensing* (CHRS) da Universidade da Califórnia. Nesse portal constam arquivos de dados dos sistemas PERSIANN, PERSIANN-CCS, e PERSIANN-CDR de resolução temporal diária (Sorooshian et al., 2000).

Os sistemas operacionais PERSIANN usam procedimentos de classificação/aproximação de redes neurais para calcular uma estimativa da taxa de precipitação em cada pixel de 0,25° x 0,25° (cerca de 25x 25 Km<sup>2</sup>) da imagem de temperatura de brilho infravermelho de ondas longas, fornecida por satélites geoestacionários. Para este estudo foram utilizados dados do produto PERSIANN-CDR que, em análises preliminares, mostraram concordância geral e boa correlação referentes à estimativa de precipitação semi-global comparados com dados de base de solo e de satélites de alta resolução (Guo et al., 2016, Katiraie-Boroujerdy et al., 2016, Ashouri et al., 2019).

Dados de umidade de solo foram adquiridos através da ferramenta on-line GIOVANNI, que exibe e analisa dados geofísicos. Para ter acesso aos dados é preciso obter *login* no *EarthData – NASA*. Essa ferramenta é mantida e desenvolvida pelo *NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services* (GES-DISC). Os dados adquiridos são produzidos pelo *Global Land*

*Data Assimilation System* (GLDAS) (Rodell et al., 2004). A resolução espacial é de 25 x 25 km<sup>2</sup> com resolução temporal de 3 horas (produto GLDAS\_NOAH025\_3H\_2.0). O sistema gera dados modelados da superfície terrestre a partir de técnicas de modelagem e assimilação de produtos de satélite e dados observados em superfície (Rampazo, 2019). Após a aquisição dos dados, foram convertidos para a média de escala diária.

A metodologia adotada do estudo empírico de Chuvieco et al. (2003) tem como procedimento atividade de campo e laboratório, e mede o peso úmido sobre o peso seco da vegetação, dado pela seguinte equação:

$$FMC = ((P_u - P_s)/P_s) * 100$$

sendo  $P_u$  o peso úmido e  $P_s$  o peso seco da amostra.

Nos estudos de Chuvieco et al (2003) as amostras eram coletadas a cada 8 dias acompanhando as revisitas do satélite, por volta das 12 e 16hrs, horário em que segundo os autores, o FMC se encontrava mais baixo e as condições de risco de incêndios são maiores, no entanto, o tempo de amostragem de campo não correspondia ao tempo de passagem do satélite, que era entre 10 e 12hrs. Outros autores trabalhando em áreas climáticas semelhantes, constataram que não há diferenças significativas no FMC por volta das 10hrs da manhã em relação aos outros horários de maior risco. Para esta pesquisa, a amostragem foi feita nos horários de revisitas do satélite no eixo local a cada cinco dias, por volta das 10:30 e 11hrs da manhã, no período de seca da região e mais propenso a incêndios (maio – outubro). Foi delimitada uma área de 30x30m para amostragem, sendo coletada 100 gramas de material foliar de cada fitofisionomia.

Coletou-se 24 amostras do Cerrado Típico (folhas de copas de árvores e arbustos variadas) e do Campo Limpo (capim com raízes) ao longo de 30 de maio a 27 de outubro de 2019. As amostras foram pesadas em campo com balança de precisão de 1 g, e em seguida levadas para laboratório e submetidas na estufa sob o tempo de 48hrs em torno de 60 e 70° C. Por fim, o material foi pesado novamente para estimar o conteúdo de umidade foliar. Durante a amostragem, foram adquiridos também em campo, dados de temperatura e umidade relativa do ar com uso de termohigrômetro.

A análise dos dados obtidos na pesquisa se deu com aplicação de dois testes estatísticos: [1] para verificar as bandas espectrais do S2-MSI em relação ao FMC observados nos dois pontos de coleta, a análise foi feita por correlação linear e do

coeficiente de correlação de *Pearson* (R); [2] para verificar a relação das variáveis conteúdo de umidade do solo, temperatura, precipitação e umidade do ar, a análise se deu por regressão múltipla, de modo a verificar possíveis fatores impactantes nos níveis de FMC das duas fitofisionomias. A análise de regressão múltipla é um importante modelo para analisar dados empíricos e sua possível relação com outras variáveis.

## Resultados e discussão

Os valores de FMC ficaram acima de 100% para o Cerrado Típico e se manteve abaixo desse valor para o Campo Limpo, atingindo o valor mínimo de 20% (Figura 2). A literatura demonstra que áreas potenciais de risco de incêndio, são aquelas com FMC abaixo de 90%. Os valores inferiores ao referido limite estão associados à grandes incêndios, enquanto que estando o FMC acima de 100%, os riscos de incêndios são menores, e quando ocorrem, são de baixa proporções ou isolados. Cumpre frisar que os estudos realizados se deram em ambientes distintos, nos quais interferem a latitude e outros fatores físicos (Chuvieco et al., 2010; Argañaraz et al. 2018), portanto, para o Cerrado, é necessário um estudo mais aprofundado nesse sentido.

O Campo Limpo apresentou-se mais propenso a incêndios, uma vez que durante o período de seca, o FMC esteve abaixo de 100%. Já a vegetação arbórea do Cerrado Típico, é o tipo de vegetação adaptada para o período de seca, tanto é que seu índice de verde não sofre grandes alterações, e nesse estudo, o FMC não diminuiu ao longo do período seco, mas apresentou tendência crescente, como pode ser analisado no gráfico da Figura 2.

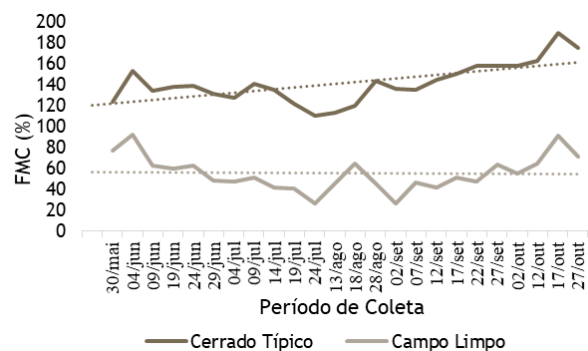


Figura 2. Valores de FMC (%) do Campo Limpo e Cerrado Típico (30 de maio a 27 de outubro de 2019).

Considerando os dados do FMC com os índices de reflectância da vegetação das bandas

selecionadas (NIR e SWIR 1 e 2 – Figura 3 e 4), os resultados da correlação linear pelo coeficiente de correlação de *Pearson*, mostrou que as reflectâncias no SWIR 1 e 2 foram inversamente correlacionados ao FMC do Campo Limpo. Porém, houve uma correlação muito fraca ( $r^2 < -5$ ) e não se correlacionou com o Cerrado Típico. Já a reflectância NIR foi directamente correlacionada ao FMC das duas formações, com melhor correspondência para área do Cerrado Típico, porém sua correlação também foi fraca ( $r^2 < 5$ ).

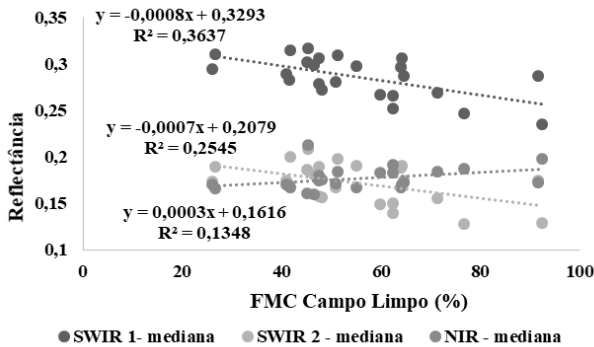


Figura 3. Gráfico da correlação do índice de reflectância pela SWIR 1 e 2 e NIR, com o FMC do Campo Limpo.

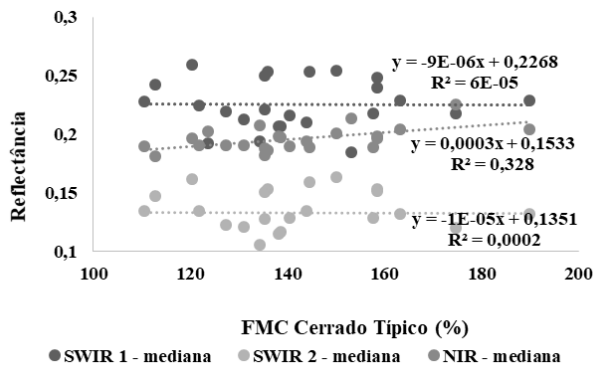


Figura 4. Gráfico da correlação do índice de reflectância pela SWIR 1 e 2 e NIR, com o FMC do Cerrado Típico.

A questão principal levantada pelos autores, reside em saber se as variações na reflectância ou temperatura da planta causadas pela mudança do conteúdo de água podem ser explicadas por outros fatores, como por exemplo, índice de área foliar, geometria da copa, ângulos de observação, condições atmosféricas, e características físico-químicas do solo (Chuvieco et al., 2004; Yebra et al., 2013; Adab et al., 2016). Neste estudo, tais fatores podem ter influenciado na reflectância dos ambientes, o que explica a baixa correlação pelas faixas NIR e SWIR.

Outra influência é dada pela diferenciação de combustíveis vivos e mortos para

estimativa do FMC, sendo características considerados importantes em relação a combustão e risco de fogo (White et al., 2014; Schmidt et al., 2017; White, 2018). De acordo com White (2018), os componentes de vegetais vivos são divididos em lenhosos e herbáceos, sendo que os primeiros incluem galhos, folhagem e arbustos, de características amplamente florestais, e os segundos são costumeiramente compostos por gramíneas e outras vegetações rasteiras. Dos herbáceos, alguns são dados como componentes vegetais mortos (seco). Dada essa diferenciação, pela área de estudo, o Cerrado Típico pode ser considerado um combustível vivo, enquanto que o Campo Limpo, é predominantemente herbáceo, com combustível morto, dada a época de seca.

A correlação do SWIR 1 com o FMC do Campo Limpo foi mais forte. É de se esperar que à medida que o FMC de uma vegetação diminui, seu índice de reflectância aumente. FMC de combustíveis vivos são mais difíceis de estimar por que recorrem a umidade armazenada no solo (Viegas et al., 2001), fator que se aplica ao Cerrado Típico.

A proposta inicial deste estudo, tratava dessa estimativa empírica, entre a relação quantitativa do FMC com índice de reflectância, afim de calibrar as faixas espectrais SWIR e NIR para avaliar risco de incêndio no Cerrado, no entanto, os resultados dessa correlação não foram tão contundentes e pareceu relevante considerar dados de variáveis ambientais e meteorológicas, uma vez que podem refletir nos resultados. Nesse sentido, foram considerados dados de umidade de solo (para os 4 níveis de profundidade, 0-10, 10-40, 40-100, 100-200 cm), precipitação, umidade do ar e temperatura, os quais foram aplicados a análise Multivariada de Regressão Múltipla, cujo propósito é medir, explicar e prever o grau de relacionamento entre variáveis e os impactos de uma sobre a outra.

A correlação linear múltipla do FMC do Cerrado Típico com os 4 níveis de profundidade de conteúdo de umidade do solo resultou em um  $R^2$  - ajustado de 41%, cujo nível de significância foi 0,01. Neste estudo, foi considerado como resultado significativo para a avaliação do valor de  $p$ . Dentre os quatro níveis de profundidade de solo (zona raiz, subsolos, e limite subterrâneo), o valor- $p$  (chance de erros) mostra que o nível mais correlacionado se encontra na zona de 40-100 cm no subsolo.

No que se refere aos valores de temperatura, umidade de ar e precipitação em relação ao FMC do Cerrado Típico, a análise de regressão resultou em um  $R^2$ -ajustado de 36% e nível de significância 0,01. No entanto a chance de erro a nível de impacto ao FMC para essas

variáveis, é elevado, cujo menor valor está relacionado a temperatura, com 19% (considerando a chance de erro < 5%).

No Campo Limpo, os valores da análise Multivariada de Regressão Múltipla mostraram que, neste ambiente, o FMC não foi explicado pelas variáveis precipitação, conteúdo de umidade de solo e temperatura. Na análise FMC e conteúdo de umidade de solo, a estatística de regressão é de 30%, menor que no Cerrado Típico, o que explica que a umidade do solo não é fator impactante nesse ambiente. As demais variáveis, precipitação, temperatura e umidade do ar, no valor de regressão sob R<sup>2</sup>-ajustado caem para -5%, além do mais, o valor do nível de significância se mostrou alto, o que anula qualquer correspondência dessas variáveis ao FMC, sendo que dentre as três, a de menor valor-*p* é a umidade do ar, mas com apenas 2% no R<sup>2</sup>-ajustado da correlação desta variável com o FMC do Campo Limpo.

Verificou-se se que a umidade de solo é uma variável impactante em relação ao ambiente de Cerrado Típico. Nos estudos de Qi et al. (2012), essa lógica é explicada subentendendo que a água é transportada continuamente entre solo-planta-atmosfera. Desta forma, a água da planta diminui se a condutividade hidráulica entre o solo e a raiz decresce, e vice-versa. Na fitofisionomia do Cerrado Típico, as estimativas do FMC estão relacionadas a banda NIR, que está associada ao índice de verde da planta, ou seja, pelo vigor da vegetação, o que indica que o teor de clorofila deste ambiente tem recorrido a umidade do solo, pois correlaciona positivamente a ele. E é justamente na zona de subsolo 40-100 cm que se encontra as raízes dos substratos arbóreos do Cerrado Típico, que por sua fisionomia, não apresenta raízes muito profundas.

Autores como Krueger et al. (2015), e Lifang et al. (2019) consideraram fatores como a temperatura, umidade relativa do ar e umidade superficial do solo como indicadores de umidade do combustível para estimar a inflamabilidade e, com o tempo, o risco de incêndio. Krueger et al. (2015) por exemplo, propõe que a umidade do solo seja utilizada como substituto da umidade do combustível vivo, pois entende que umidade de solo e combustível vivo são fisicamente interligados.

A relação entre seca e umidade do combustível é a baixa precipitação ou alta evapotranspiração, que vão sempre resultar em níveis baixos de FMC e, conseqüentemente, áreas de maior risco de incêndios (Qi et al., 2012). Nota-se que, nas duas fitofisionomias, a precipitação não é fator determinante, dado o período de seca, mas que, no entanto, ela ainda assim altera a porcentagem do FMC. No Cerrado Típico, o FMC observado aumenta à medida que a temperatura, precipitação e umidade do solo se alteram (Figura 5). A evapotranspiração ou apresenta-se baixa, ou de fato não influencia no resultado do FMC. Por outro lado, ainda que a evapotranspiração seja elevada, tem-se a hipótese de que não interfere no FMC, dado que a vegetação desse ambiente tem recorrido a umidade de solo em zona mais profunda.

Qi et al. (2012) apontam que a variação sazonal de FMC é controlada pela precipitação, umidade do solo, evapotranspiração e fisiologia da planta, portanto, serão os fatores ligados a propriedade do solo, a precipitação e os fluxos de evapotranspiração ao longo de uma escala temporal que irão controlar o conteúdo de umidade de solo, e deste para a vegetação.

As variáveis meteorológicas determinam a umidade do combustível morto (Adab et al.,

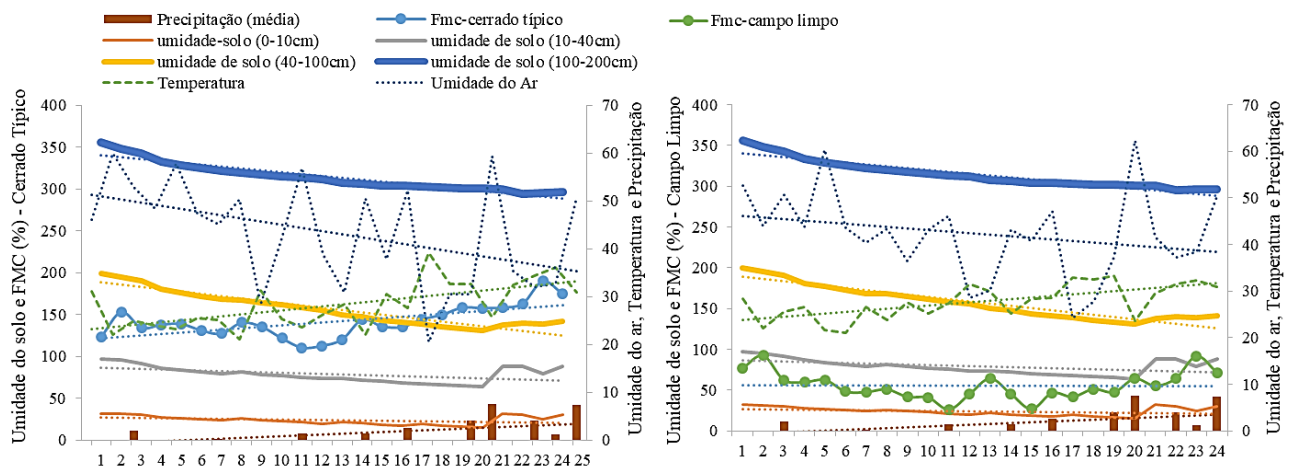


Figura 5. FMC do Cerrado Típico (esquerda) e do Campo Limpo (direita) com as variáveis ambientais adicionais: conteúdo de umidade de solo; precipitação (média); temperatura e umidade do ar.

2016), já a umidade do solo é fator determinante para combustível vivo (Krueger et al., 2015). Caccamo et al. (2012) afirmam que, em paisagens com forte propensão à produção de matéria morta, o risco potencial de ocorrência de queimadas é alto. Desta forma, a fitofisionomia do Campo Limpo, é área eminente de risco de fogo no período seco.

Considerando que a área se caracteriza como Campo Limpo Seco, cujo lençol freático é mais profundo, e que por ser período de baixa precipitação, dado o aumento de temperatura ao longo da coleta, e conseqüentemente baixa umidade do ar, e levando em conta também a fisionomia da planta - vegetal fino, baixo e de raízes curtas ao nível da zona raiz do solo - a umidade do solo, nesse caso, não influencia diretamente. Nesse caso, o FMC do Campo Limpo melhor se correlaciona a umidade do ar porque ela é fator mais recorrente e sua relação com essa e as outras variáveis meteorológicas é instantânea, aumenta ou perde umidade para o ambiente externo rapidamente, já que para essa época do ano, umidade de solo e precipitação é quase inexistente. Dada o período de sazonalidade, esses fatores podem sim influenciar no FMC dessa área em outra época do ano.

Além do mais, alguns autores apontam que as vegetações herbáceas são sensíveis à umidade do solo, à topografia e às condições climáticas do que vegetação lenhosa, que podem apresentar altos índices de umidade interna, enquanto a materiais mortos tendem a acompanhar as variações de umidade do ar de forma mais intensa, se for esta, fator mais recorrente (Yebra et al., 2008; Momadou et al., 2013).

Além da quantidade de combustível vegetal caracterizada pela sua dimensão, estado vegetativo, ou seja, vivo ou morto, e umidade, outros fatores externos também influenciam no comportamento dos incêndios florestais. O relevo é um desses fatores, dado suas características como declive, exposição das vertentes, e altitude. Outro fator é a direção e a velocidade do vento (Lourenço et al., 2019). Tais fatores não foram considerados neste estudo.

Yebra et al. (2013) e Argañaraz et al. (2018), afirmam que os diferentes limiares de FMC observados em relação à atividade de incêndio estão relacionados a uma combinação de variáveis que atuam em diferentes escalas, dado que as propriedades estruturais e químicas também afetam a inflamabilidade no nível da planta, e as cargas de combustível morto e a umidade afetam a inflamabilidade no nível do suporte. De certa forma, estas variáveis juntamente com as condições climáticas e a topografia, interagem de modo a afetar a relação entre FMC e a ocorrência

de queimadas em diferentes ecossistemas, tornando-se uma propriedade emergente na escala da paisagem.

## Conclusões

Este ensaio conclui que há uma relação inversa entre o FMC da vegetação rasteira, representado neste estudo pelo Campo Limpo (fitofisionomia do Cerrado) e a reflectância da Banda espectral do Infravermelho de ondas curtas (SWIR), sendo um fato significativo para a predição do risco de ocorrência de queimadas neste ambiente. A análise do FMC com base nos distintos procedimentos metodológicos adotados neste estudo permitiu a constatação de outros aspectos:

- Apesar da concordância com os resultados obtidos de outros estudos, admite-se que as respostas espectrais das bandas no SWIR e no NIR ainda não evidenciam o comportamento do FMC, sendo que a melhor leitura espectral do FMC foi dada pela banda SWIR.
- A necessidade da composição de um banco de dados mais amplo do ponto de vista temporal (3 a 5 anos) para maior detalhamento das respostas espectrais das bandas SWIR e NIR.
- A avaliação de carga de combustíveis e o prognóstico de risco de incêndios para o Cerrado por meio da aplicação de técnicas de SR carece de mais tempo de pesquisa.
- Os dados de FMC obtidos em campo indicam que no ambiente do campo limpo, o risco de fogo é eminente. Portanto, os cuidados devem ser redobrados em relação às práticas de manejo dessa fitofisionomia do Cerrado, tendo em vista que ela é determinante paisagístico em todo o bioma.
- As variáveis umidade de solo, umidade do ar, temperatura e precipitação são determinantes no comportamento do FMC, tanto de vegetais vivos como mortos, influenciando também no comportamento do fogo.
- Vegetais vivos recorrem à umidade do solo e vegetais mortos sofrem influência de variáveis atmosféricas. Nota-se que para a fitofisionomia do Cerrado Típico, a umidade do solo mostra-se como um fator influenciador
- Além das variáveis consideradas neste estudo, admite-se que outras também deverão ser incorporadas, tais como a radiação solar e velocidade e direção do vento. Esse pressuposto deve ser



considerado especialmente na análise de comportamento de vegetais finos campestres.

- Para estudos posteriores, pressupõe-se que a discriminação espectral das duas bandas NIR para leitura e monitoramento vegetal e SWIR para estimativas de conteúdo de água foliar, resultem dentre outras formas de análise, em estimativas do FMC de vegetações arbóreas para o Cerrado.

### Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de Iniciação Científica concedida.

### Referências

- Adab, H., Kasturi Devi Kanniah, K. D., Beringer, J.; 2016. Estimating and Up-Scaling Fuel Moisture and Leaf Dry Matter Content of a Temperate Humid Forest Using Multi Resolution Remote Sensing Data. *Remote Sens.* 8(11), 961. Disponível: <https://doi.org/10.3390/rs8110961>. Acesso: 19 de jul. 2020.
- Argañaraz, J.P., Landi, M.A., Scavuzzo, C.M., Bellis, L.M., 2018. Determining fuel moisture thresholds to assess wildfire hazard: A contribution to an operational early warning system. *PLoS ONE* 13(10), 0204889. Disponível: <https://doi.org/10.1371/journal.pone>. Acesso: nov. 2019
- Argibay, D. S.; Sparacino, J.; Espindola, G. M., 2020. A long-term assessment of fire regimes in a Brazilian ecotone between seasonally dry tropical forests and savannah. *Ecological Indicators* 113, 106151. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106151>. Acesso: 18 de jul. 2020.
- Ashouri, H., Gehne, M., 2018. The Climate Data Guide: PERSIANN-CDR: Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks—Climate Data Record. Disponível: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/persiann-cdr-precipitation-estimation-remotely-sensed-information-using-artificial>. Acesso: nov. 2019.
- Burgan, R.E., Hartford, R.A., 1993. Monitoring vegetation greenness with satellite data. *Gen. Tech. Rep. INT-GTR-297*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station. 13 p. DOI: <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-297>.
- Caccamo, G., Chisholm, L., Bradstock, R., Puotinen, M., Phippen, B., 2012. Monitoring live fuel moisture content of heathland, shrubland and sclerophyll forest in south-eastern Australia using MODIS data. *International Journal of Wildland Fire*. 21. 257-269. DOI:10.1071/WF11024.
- Ceccato, P., Gobron, N., Flasse, S., Pinty, B., Tarantola, S., 2002. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1: Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment*. 82. 188-197. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00037-8.
- CHRS. Center for Hydrometeorology & Remote Sensing, 2019. Disponível: <http://chrsdata.eng.uci.edu>. Acesso: 24 out. 2019.
- Chuvieco, E., Riaño, D., Aguado, I., Cocero, D., 2002. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: Applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS.* 23. 2145-2162. DOI: 10.1080/01431160110069818.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Cocero, D., Riaño, D., 2003. Design of an empirical index to estimate fuel moisture content from NOAA-AVHRR images in forest fire danger studies. *International Journal of Remote Sensing - INT J REMOTE SENS.* 24. 1621-1637. DOI:10.1080/01431160210144660b.
- Chuvieco, E., Cocero, D., Aguado, I., Palacios, A., Prado, E., 2004. Improving burning efficiency estimates through satellite assessment of fuel moisture content. *Journal Of Geophysical Research* 109, D14s07, Doi:10.1029/2003jd003467.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M., Vilar, L., Martínez-Vega, J., Martín, S., Ibarra, P., Riva, J., Baeza, M., Silva, F., Martínez, J., Machuca, M., Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies.

- Ecological Modelling. 221. 46-58.  
DOI:10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M.L., Yebra, M., Salas, J., Hantson, S., Riva, J., Ibarra, P., Rodrigues, M., Echeverría, M., Azqueta, D., Román, M., Bastarrika, A., Martinez, S., Recondo, C., Zapico, E., Martinez-Vega, J., 2014. Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International Journal of Wildland Fire*. 23. 606-619. DOI:10.1071/WF12052.
- Chuvieco, E., Mouillot, F., Werf, G. R van der., Miguel, J. S.; Tanase, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I.; Heil, A., Hawbaker, T. J., Giglio, L., 2019. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation. *Remote Sensing of Environment* 225, 45-64, Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>. Acesso: 17 de jul.2020.
- EO BROWSER DO SENTINEL HUB, 2019. Navegador EO. Disponível: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>. Acesso: 04 nov. 2019.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária, 2019. Disponível: <https://www.embrapa.br/cerrados/colecao-entomologica/bioma-cerrado>. Acesso: dez. 2019.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019. *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Disponível: <https://www.ipcc.ch/srccl>. Acesso: dez. 2019.
- GIOVANNI. Plataforma EarthDATA - NASA GESDISC channel, 2019. Disponível: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov>. Acesso: 27 out. 2019.
- Guo, H., Bao, A., Liu, T., Chen, S., Ndayisaba, F., 2016. Evaluation of PERSIANN-CDR for Meteorological Drought Monitoring over China. *Remote Sens* 8, 379.
- Katiraie-Boroujerdy, P., Ashouri, H., Hsu, K., 2017. Trends of precipitation extreme indices over a subtropical semi-arid area using PERSIANN-CDR. *Theor Appl Climatol* 130, 249-260. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1884-9>. Acesso: nov. 2019.
- Krueger, E. S., Ochsner, T. E., Engle, D. M., Carlson, J. D., Twidwell, D., Fuhlendorf, S. D., 2015. Soil Moisture Affects Growing-Season Wildfire Size in the Southern Great Plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 79, 1567-1576 DOI:10.2136/sssaj2015.01.0041.
- Latrubesse, E.M., Arima, E., Ferreira, M.E., Nogueira, S.H., Wittmann, F., Dias, M.S., Dagosta, F.C.P., Maximiliano Bayer, M., 2019. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice*. Disponível: <https://doi.org/10.1111/csp2.77>. Acesso: dez. 2019.
- Lifang, C., Qun, D., Zhiming, Z., Zehao, S., 2019. Moisture content variations in soil and plant of post-fire regenerating forests in central Yunnan Plateau, Southwest China. *Journal of Geographical Sciences* 29 (7): 1179-1192. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1652-8>. Acesso: 19 de jul. 2020.
- Lotufo, J. B. S., Machado, N. G., Taques, L. M., Mützenber, D. M.S., Lotufo Neto, N., Biudes, M.S., 2020. Índices Espectrais e Temperatura de Superfície em Áreas Queimadas no Parque Estadual do Araguaia em Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.13, n.02, 648-663. DOI: 10.26848/rbgf.v13.2.p648-663.
- Lourenço, L., Mira, M., 2019. Grandes incêndios florestais de 17 de junho em Portugal e exemplos da determinação das respectivas causas. *Territorium* 26 (II), 49-60. Disponível: <https://territorium.riscos.pt/numeros-publicados/>. DOI: [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_26-2\\_4](https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-2_4)
- Luo, K., Quan, X., He, B., Yebra, M., 2019. Effects of Live Fuel Moisture Content on Wildfire Occurrence in Fire-Prone Regions over Southwest China. *Forests* 10(10), 887. Disponível: <https://doi.org/10.3390/f10100887>. Acesso: 17 de jul. 2020.
- MCTIC. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e comunicações, 2017. *Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil - 4º edição*. Brasília.

- Qi, Y., Dennison, P., Spencer, J., Riaño, D., 2012. Monitoring live fuel moisture using soil moisture and remote sensing proxies. *Fire Ecology*. 8. 71-87. DOI:10.4996/fireecology.0803071.
- Rampazo, N., Picoli, M., Cavaliero, C., 2019. Comparação entre dados meteorológicos provenientes de sensoriamento remoto (modelados e de satélites) e de estações de superfície. *Revista Brasileira de Geografia Física*. 12. 412-426. DOI:10.26848/rbgf.v12.2.
- Rao, K.; Williams, A. P.; Flefil, J. F.; Konings, A. G., 2020. SAR-enhanced mapping of live fuel moisture content, *Remote Sensing of Environment*, 245, 111797. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111797>. Acesso: 18 de jul. 2020.
- Ribeiro, J.F., Walter, B.M.T., 1998. As Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. de (Ed.). *Cerrado: ambiente e flora*. Planaltina: EMBRAPA-CPAC. p. 89-166.
- Rodell, M., Houser, P., Jambor, U.E.A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, J., Arsenault, K., Brian, C., Radakovich, J., MG, B., Entin, J., Walker, J., Lohmann, D., DL, T., 2004. The Global Land Data Assimilation System. *bams*. 85. 381-394. DOI:10.1175/BAMS-85-3-381.
- Seger, C.D., Batista, A.C., Tetto, A.F., Soares, R.V., Biondi, D., 2018. Caracterização do material combustível fino da estepe gramíneo-lenhosa no estado do Paraná, Brasil. *Ciência Florestal*, 28(2), 863-874. <https://doi.org/10.5902/1980509832127>.
- Schmidt, I.B., Fidelis, A., Miranda, H.S., 2017. How do the wets burn? Fire behavior and intensity in wet grasslands in the Brazilian savanna. *Braz. J. Bot* 40, 167–175. <https://doi.org/10.1007/s40415-016-0330-7>
- Sorooshian, S., Hsu, K., Gao, X., Gupta, H., Imam, B., Braithwaite, D., 2000. Evaluation of PERSIANN System Satellite-Based Estimates of Tropical Rainfall. *Bulletin of The American Meteorological Society - BULL AMER METEOROL SOC*. 81. DOI:10.1175/1520-0477.
- Sow, M.; Mbow, C.; Hély, C.; Fensholt, R.; Sambou, B., 2013. Estimation of Herbaceous Fuel Moisture Content Using Vegetation Indices and Land Surface Temperature from MODIS Data. *Remote Sens*. 5, 2617-2638.
- Viegas, D., J, Piñol, MT, Viegas, R, Ogaya., 2001. Estimating live fine fuel moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal of Wildland Fire*. DOI:10.1017/WF01022.
- White, B.L.A., Ribeiro, A.S., White, L.A.R., Ribeiro, G.T., 2014. Caracterização do material combustível superficial no Parque Nacional Serra de Itabaiana – Sergipe, Brasil. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 699-706.
- White, B.L.A, 2018. Modelos matemáticos de previsão do teor de umidade dos materiais combustíveis florestais finos e mortos. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 432-445.
- Yeber, M., Chuvieco, E., Riaño, D., 2008. Estimation of live fuel moisture content from MODIS images for fire risk assessment. *Agricultural and Forest Meteorology - AGR Forest Meteorol*. 148. 523-536. DOI:10.1016/j.agrformet.2007.12.005.
- Yeber, M., Dennison, P., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Jr, E., Danson, F., Qi, Y., Jurdao, S., 2013. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*. 136. 455–468. DOI:10.1016/j.rse.2013.05.029.
- Yeber, M., Quan, X., Riaño, D., Larraondo, P., van Dijk, A., Cary, G., 2018. A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental Australia based on optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 212, 260-272. DOI:10.1016/j.rse.2018.04.053.
- Zaterka Giroldo, Paula, 2016. Efeito da época de queima em um campo sujo de Cerrado. *Dissertação (Mestrado em Ecologia: Ecossistemas Terrestres e Aquáticos)*. São Paulo, Instituto de Biociências, USP.