

Estimativa do NDVI com imagens do visível (RGB) obtidas com drones

Josiclêda Domiciano Galvinctio. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente_PRODEMA. e-mail; josicleda@gmail.com

Carine Rosa Naue-Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares- EBERSH. e-mail:
crnaue@yahoo.com.br

Artigo recebido em 17/09/2019 e aceito em 01/12/2019

RESUMO

O NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é um índice de vegetação muito utilizado para avaliação das condições de saúde da vegetação, seja ela preservada ou advinda das ações antrópicas, como por exemplo, agricultura. A estimativa do NDVI com drones ainda é bastante precária uma vez que necessita de diferentes estudos para avaliar a precisão deles. O objetivo deste estudo é avaliar a estimativa do NDVI obtidas com imagens do visível atentando para as calibrações radiométricas. Foram utilizadas equações de calibração radiométricas bastantes difundidas para uso do satélite Landsat 5. Essas equações foram utilizadas para calibração de imagens de drones. Os resultados mostraram que as calibrações elevaram o nível de acurácia das estimativas do NDVI com imagens de drones. Conclui-se que é de suma importância a calibração radiométrica das imagens obtidas com drones para que elas possibilitem estimativas mais precisas, como por exemplo o NDVI. O uso de produtos de drones para estimativa de NDVI é bastante promissor. Mas, se faz necessário o estudo de mais procedimentos robustos de calibração radiométrica, aumentando a qualidade dos produtos de dados advindos de drones e tornando mais comparáveis entre sites, sensores e horários.

Palavras-chave: Calibração radiométrica, condições ambientais, monitoramento.

Estimation of NDVI with visible images (RGB) obtained with drones

ABSTRACT

The NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) is a vegetation index widely used to evaluate the health conditions of vegetation, whether preserved or derived from anthropic actions, such as agriculture. NDVI's estimation with drones is still quite precarious as it requires different studies to assess their accuracy. The aim of this study is to evaluate the NDVI estimate obtained with images of the visible attention to radiometric calibrations. Radiometric calibration equations that were widely disseminated for the use of Landsat 5 satellite were used. These equations were used to calibrate drone images. The results showed that the calibrations raised the level of accuracy of NDVI estimates with drone images. It is concluded that it is of paramount importance the radiometric calibration of the images obtained with drones so that they allow more accurate estimates, such as NDVI. The use of drone products to estimate NDVI is quite promising. But it is necessary to study more robust radiometric calibration procedures, increasing the quality of data products from drones and making it more comparable between sites, sensors, and schedules.

Keywords: Radiometer calibration; environmental conditions; monitoring.

Introdução

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) é uma técnica que utiliza as faixas visível e infravermelha próxima do espectro eletromagnético para quantificar a densidade da vegetação em uma área específica. A refletância foliar é um parâmetro associado ao status de saúde das plantas e pode ser usado para determinar a atividade fotossintética, deficiências nutricionais e estresses que as plantas experimentam, Orrillo et al. (2017). Em teoria, vegetação saudável absorve a maior parte da luz visível que encontra e reflete muita luz infravermelha próxima Holme et al., (1987). Portanto, usando sensores apropriados para estimar a refletância foliar podem ajudar monitoramento e gerenciamento precisos de um campo agrícola e de qualquer outros ambientais naturais ou ecossistemas, Orillo et al., (2017). Diferentes estudos têm se utilizado de ferramentas de sensoriamento remoto para análise de diferentes variáveis ambientais, Assis et al., (2012), Oliveira et al., (2014), Lima et al., (2016), Viana et al., (2019), Maier et al., (2016), Aleixo e Silva Neto (2015), Gomes et al., (2016), Oliveira et al., (2015); Ribeiro et al., (2014), Silva et al., (2016), Spinelli et al., (2016). Souza et al., (2016), Costa e Silva (2017), muitos deles para avaliação multitemporal, Araújo e Fonseca (2016), Silva et al., (2017), Schirmbeck (2017). Vieira et al., (2017), Yurovskaya et al., (2018), Kotivuori et al., (2020), Bandini et al., (2020).

Nas últimas décadas diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas para auxiliar no avanço do conhecimento e monitoramento dos recursos naturais. Neste sentido, os drones tem surgido uma tecnologia promissora.

Drones, ou veículos aéreos não tripulados (UAVs), são usados pelos militares desde a Primeira Guerra Mundial para vigilância remota. Na última década, os agricultores começaram a usá-los para monitorar seus campos, além de ajudar os programas de agricultura de precisão. À medida que a tecnologia melhora e o custo continua a diminuir, os drones terão a cada dia um uso mais amplo nos diferentes campos do conhecimento, Stehr (2015).

Os pequenos sistemas aéreos não tripulados (UAS) permitiram o mapeamento da vegetação em uma resolução espacial muito alta, mas a falta de padronização levou a incertezas quanto à qualidade dos dados. Para que as

medições de refletância e os índices de vegetação (Vis) sejam comparáveis entre locais e ao longo do tempo, é necessário um planejamento cuidadoso do voo e procedimentos robustos de calibração radiométrica, Stow et al., (2019); Galvinctio (2019).

O mapeamento da vegetação usando pequenos sistemas aéreos não tripulados (UAS) encontrou recentemente muitas aplicações em monitoramento ambiental e ecológico, Manfreda et al., (2018); Cruzan et al., (2016); Anderson e Gastor ((2013), silvicultura, Padua et al., (2017); Zaldei e Wallace (2017), agricultura de precisão, Salami et al., (2014); Zang e Kovics (2012) e arqueologia, Cowley et al., (2017).

As principais vantagens do UAS sobre outras plataformas de sensoriamento remoto são a capacidade de coletar dados com uma resolução espacial muito alta e uma relativa facilidade de implantação, permitindo que o usuário defina visitar os tempos apropriados aos fenômenos que estão sendo investigados, Manfreda et al., (2018); Cruzan et al., (2016). No entanto, existe uma considerável diversidade de plataformas, sensores e métodos de coleta de dados, Salami et al., (2014); Sing e Frazier (2018); Aasen et al., (2018), levando a incertezas quanto à qualidade dos dados.

Em particular, as influências do método de coleta e das condições ambientais na qualidade dos dados é pouco compreendida, Sing e Frazier (2018); Dandois et al (2015). Isso cria problemas para que dados de diferentes fontes sejam combinados, ou se séries temporais de observações devem ser montadas, como dados coletados usando diferentes sensores e métodos ou sob diferentes condições ambientais podem não ser comparáveis.

Sabe-se que os drones são ferramentas bastante inovadoras e que tem sido de utilidade em diferentes áreas do conhecimento, Galvinctio (2019); Simões et al., (2019); Manfreda et al., (2018); Padua et al., (2017); Zaldei e Wallace (2017); Cowley et al., (2017); Cruzan et al., (2016); Salami et al., (2014); Anderson e Gastor (2013) e Zang e Kovics (2012). Os drones mais simples fazem imageamento da faixa do visível (RGB-Red, Green, Blue). Sabe-se que para estimar o NDVI é necessário a utilização da faixa do infravermelho próximo do espectro eletromagnético. Dessa forma existia o desafio de estimar o NDVI utilizando drones simples que imageam apenas o visível (RGB).

Alguns estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de relacionar as faixas do visível com o infravermelho, por Arai et al., (2016). Estes estudos são bastantes promissores e tem apresentado ótimas estimativas do infravermelho próximo utilizando as reflectâncias do visível. Através dessas equações se tornaram possíveis calcular o NDVI utilizando imagens de drones.

O NDVI em si é uma ferramenta de grande importância para análise ambiental. Adicionalmente, este índice é utilizado em diferentes modelos climáticos (Assis et al., (2012), Oliveira et al., (2014), Lima et al., (2016), Viana et al., (2019), Maier et al., (2016), hidrológicos (Lima et al., (2014), Oliveira et al., (2014). Assis et al., (2014); energia (Silva et al., 2019); Miranda et al., (2017), Singh (2015), Souza et al., (2015), Silva et al., (2005) e carbono (Morais et al., 2017), Souza et al., (2015). Assim, ele se torna importante informação para o entendimento dos diferentes fluxos que ocorrem sobre a superfície da terra.

Estudos que venham a contribuir no entendimento e precisão do NDVI são bastantes valorizados em diferentes áreas do conhecimento. Indiretamente os estudos de avanços nas estimativas do NDVI vem contribuindo nos melhores prognósticos ambientais que causam diretamente impactos sociais, econômicos e de desastres naturais.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é avaliar a estimativa do NDVI obtidos com imagens do visível com drones.

Material e métodos

Área em estudo

A imagem foi obtida para o plano de voo, Figura 1, localizada nas coordenadas -7.853324 e -35.235512 no estado da Pernambuco, Brasil. O voo ocorreu em 04/02/2020 as 11:23h tempo local. O tempo de voo foi de 7min19s, com dimensões de 100x100m, sobreposição de 50x50%, ângulo de inclinação da câmera de 90°, a altitude do voo de 50m e caminho de 446m. Foram obtidas 19 imagens do visível (Red- 660nm, Green550 nm, Blue 470nm) da câmera modelo FC2103_4.5_4056x3040 do drone MAVIC 2 Enterprise Dual. O voo tinha as seguintes características: Distância média de amostragem na superfície - Ground Sampling Distance (GSD) de 1.67cm / 0.66in, área de cobertura 0.020km² / 2.0412ha / 0.01sq. mi. / 5.0466 acres e média de 10970 pontos por imagem. O plano de voo foi projetado para que a câmera fosse orientada na mesma direção ao longo de cada voo. para permitir a construção de um ortomosaico.

A área escolhida para estudo é agrícola parte em preparo para o plantio e parte com cana-de-açúcar.

Para comparação das estimativas obtidas neste estudo foram utilizados dados obtidos com espectrorradiômetro fieldspec 3 em área de cana-de-açúcar. Foram utilizadas 35 amostras de reflectâncias obtidas com espectrorradiômetros.

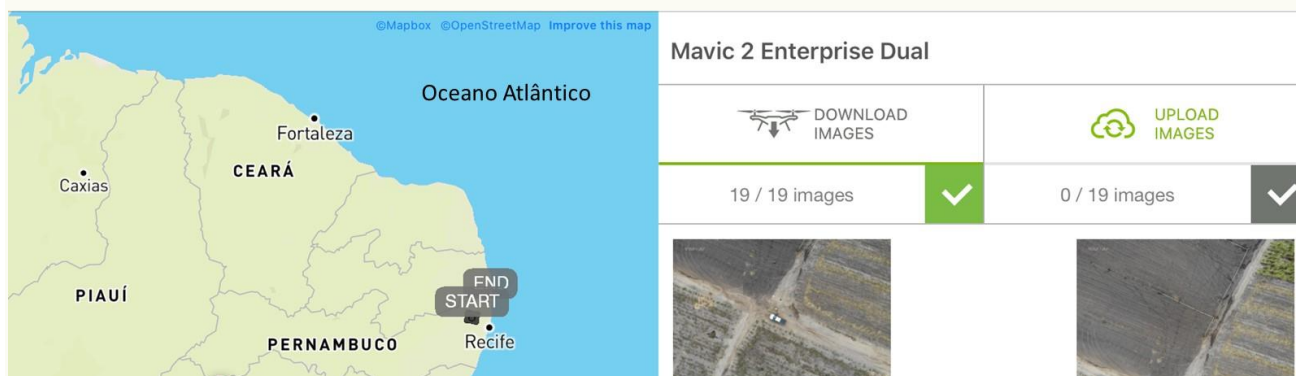


Figura 1 – Localização espacial do imageamento em estudo. Start e END é o início e fim do plano de voo.

Foram utilizados os dados da PCD- Plataforma de Coleta de Dados localizada a 500 metros da área de imageamento para descrever as condições ambientais no momento do imageamento e comparar com os resultados do NDVI.

Como as imagens cobria apenas as faixas do visível foi utilizado a equação proposta por Arai

et al., (2016) para obtenção da banda Infravermelho Próximo-NIR utilizando as bandas do visível. Foi utilizada a banda do verde para obtenção da banda NIR utilizando a equação 1:

$$\text{NIR} = (360,6 - \text{Banda verde}) / 1,1941 \quad \text{Eq. 1}$$

Foram realizadas duas análises para comparação. A primeira foi obtida o NDVI sem realizar as correções radiométricas. Ou seja, o NDVI foi calculado utilizando as imagens brutas. A segunda foi efetuada as correções radiométricas

apresentadas a seguir, utilizando as equações de 1 a 4.

Para obtenção das reflectâncias das bandas 1, 2, 3 e 4 (NIR) foi utilizado a irradiância espectral no topo da atmosfera, Tabela 1.

Tabela 1: Descrição das bandas com os correspondentes intervalos de comprimento de onda e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera terrestre (TOA).

Bandas	Comprimento de Onda (nm)	Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$)
1 (azul)	470	1957
2 (verde)	550	1826
3 (vermelho)	660	1554
4 (Infravermelho)	775	1036
5 Termal	10500	-

A reflectância monocromática foi obtida para cada banda usando a equação proposta por Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005, Galvncio (2019):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda i}}{k_{\lambda i} \cdot \cos Z \cdot d_r} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral de cada banda, $k_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$, Tabela 1), Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r) em dado dia do ano (DSA), que de acordo com Iqbal (1983), é dada por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(DSA \cdot 2\pi / 365) \quad (\text{Eq.3})$$

onde DSA representa o dia sequencial do ano e o argumento da função $\cos$ está em radianos. O valor médio anual de d_r é igual a 1,00 e ele varia entre 0,97 e 1,03, aproximadamente.

Quando a área de estudo tem pequena, ou mesmo declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol – E , que se encontra no cabeçalho da imagem, ou seja:

$$\cos z = \cos(90 - E) \quad (\text{Eq. 4})$$

em que o argumento da função $\cos$ está em graus.

Quando a área em estudo possui inclinação considerável é importante utilizar o Modelo Digital de Elevação que com drones é possível obter essa informação quando o voo possui uma boa sobreposição em x e y .

Neste estudo foi obtido o NDVI, através da equação que pode ser encontradas em Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Silva et al., 2005:

Foi calculado as estatísticas descritivas dos dados. Foi realizado teste de distribuição normal utilizando o método de Turkey para avaliar os desempenhos dos modelos.

Resultados e discussão

As condições ambientais no intervalo de tempo do imageamento foram as seguintes: Tempo local: o entre 10 e 11 horas local, foram registradas as seguintes temperaturas: temperatura média do ar $30,5^{\circ}C$, temperatura do ar no instante de 10h, $29,2^{\circ}C$ e as 11h $31,1^{\circ}C$, respectivamente. Temperatura média do solo/superfície de $32^{\circ}C$. As condições meteorológicas apresentavam uma umidade relativa do ar de 75% e velocidade média do vento de $4m^3/s$. Neste dia choveu 3,2mm.

A Figura 2 mostra um recorte da imagem RGB do visível da área imageada (retângulo preto) e duas fotografias representativas da área. Para este imageamento um carro cinza dourado foi utilizado como referência. A área escolhida é agrícola com plantio de cana-de-açúcar. Grande parte da área estava em preparo para o plantio. Ou seja, apresenta solo exposto. Nota-se que a imagem RBG apresenta visualmente efeitos da geometria da iluminação das imagens captadas pelo drone. Quando comparado a imagem RGB com a fotografias obtidas através de câmeras de celulares iphone 10x percebe-se que a imagem RGB aparece visualmente com a vegetação cores cinza. Stow et al., (2019) investigaram os efeitos da geometria da iluminação e da altura do voo nas imagens capturado por um UAS com um sensor multiespectral. Os resultados mostraram que mudar a iluminação da geometria teve efeitos visíveis nas imagens individuais, devido à reflectância

anisotrópica da vegetação. Esses efeitos foram muito menos pronunciados em ortomosaicos, exceto quando a sobreposição da imagem foi menor nas bordas da área de pesquisa. Os efeitos da refletância anisotrópica devem, portanto, ser considerados quando do planejamento de pesquisas de vegetação com drones.

A Figura 3 mostra o NDVI sem a correção radiométrica e a Figura 4 mostra o NDVI com as correções radiométricas. Nota-se que os valores do NDVI corrigido apresentam menos valores negativos e mais valores altos, Figura 4. Foi realizado um recorte espacial (perfil espacial) com 65535 pixels, Figura 5. Para este recorte o NDVI bruto, em geral, os valores estiveram entre zero e 0.3 e para o NDVI corrigido os valores estiveram entre 0.25 a 0.75.

A Tabela 2 mostra as estatísticas descritas do recorte espacial dos NDVIs estimados. Em média o NDVI corrigido foi de 0.55 e o NDVI bruto foi de 0.307. Foi comparado os NDVIs estimados para cana-de-açúcar com os dados observados em 35 amostras com espectrorradiômetro. Nas 35 amostras observadas em cana-de-açúcar o NDVI esteve entre 0.45 e 0.75, Figura 6. O NDVI observado para cana-de-açúcar médio foi de 0.58. O acerto foi 95% do NDVI médio corrigido e o observado de 64% com o NDVI bruto. Ou seja, ocorreu um ajuste de 31% no NDVI corrigido (calibração radiométrica).

Para comparação dos dados obtidos com drones e outros estudos já publicados foram escolhidos os que fizeram análise em folha ou dossel da planta. Essa escolha se deu devido os imageamentos aqui realizados com drones possuírem resolução espacial em torno 1,5 cm. Ou seja, é possível comparar os resultados aqui obtidos com os obtidos com espectrorradiômetros em folha e em dossel da planta. Segundo Stow et al., (2019) o efeito da altura de voo é relativamente pequeno nas análises dos índices de vegetação, mas a comparação com dados de referência no solo revelou discrepâncias entre as bandas

multiespectrais da câmera acoplada no drone, o que pode ser problemático para comparações com outros sensores. Esta é uma problemática de comparação de dados estimados com drones uma vez que as características das câmeras variam e os erros relativos das estimativas não estão muitas vezes relacionados as características do voo e sim as características das câmeras utilizadas.

Para avaliar a qualidade dos ajustes das estimativas das temperaturas foi aplicado o método de distribuição normal Q-Q. A Figura 7A mostra os valores em torno da reta entre -0.3 e 0.2. Os gráficos Q-Q avaliam a dispersão com os quantis da variável no eixo horizontal e a distribuição normal esperada no eixo vertical. Quando as variáveis são normais revela uma linha reta. A curvatura dos pontos indica desvios da normalidade. Os valores discrepantes aparecem como pontos que parecem distantes do padrão geral de pontos. Assim, nota-se que o NDVI corrigido sobrestima os valores extremos. E o NDVI bruto subestima os valores mínimos e sobrestima os valores máximos. A Figura 7B mostra a comparação entre o valor observado e o valor normal diminuído. Essa figura, com base nos mesmos dados do gráfico Q-Q Figura 7A exibe o desvio de cada ponto na probabilidade normal da linha reta correspondente à normal. O eixo vertical representa a diferença entre cada ponto no gráfico de probabilidade normal e a linha reta que representa o normal perfeito. O eixo horizontal representa o valor observado. Isso esclarece visualmente as áreas em que há maior desvio do normal. Se os dados da amostra fossem normais, todos os pontos de dados no gráfico normal prejudicado apareceriam perto da linha horizontal centralizada em 0. Nota-se que o NDVI corrigido necessita de melhorias nas estimativas dos valores mais altos.

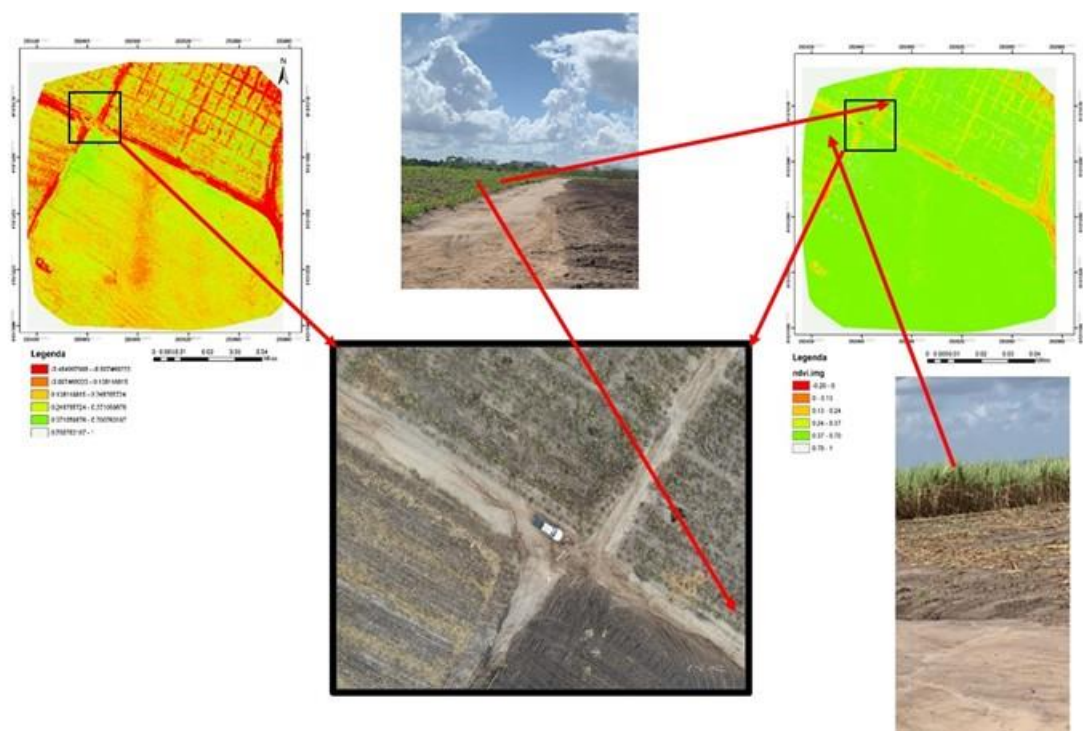


Figura 2 – Imagem do visível (RBG-123-Cor verdadeira). Retângulo preto é o recorte para destaque nas análises.

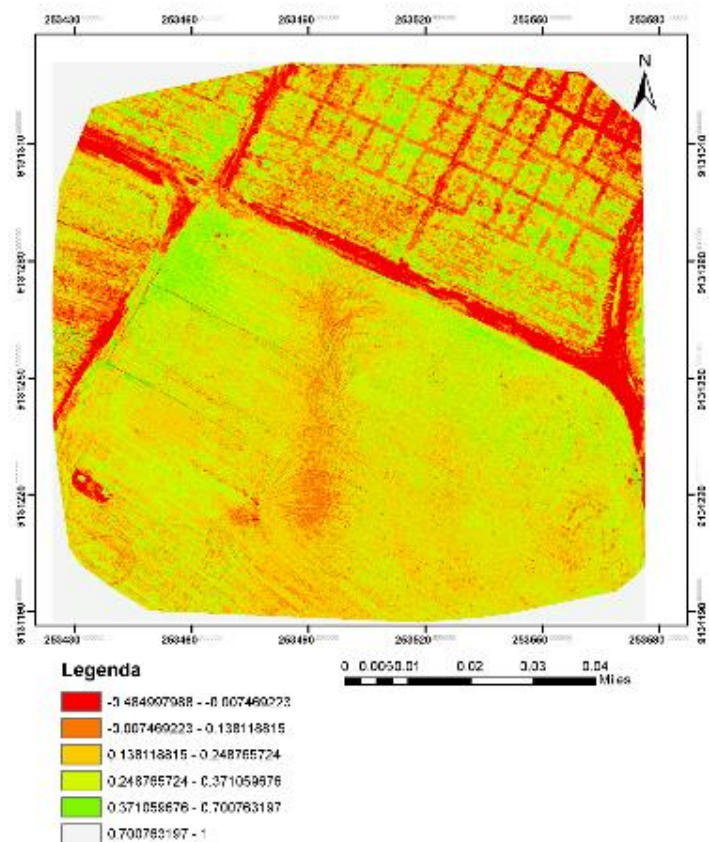


Figura 3 – NDVI bruto (sem correção)

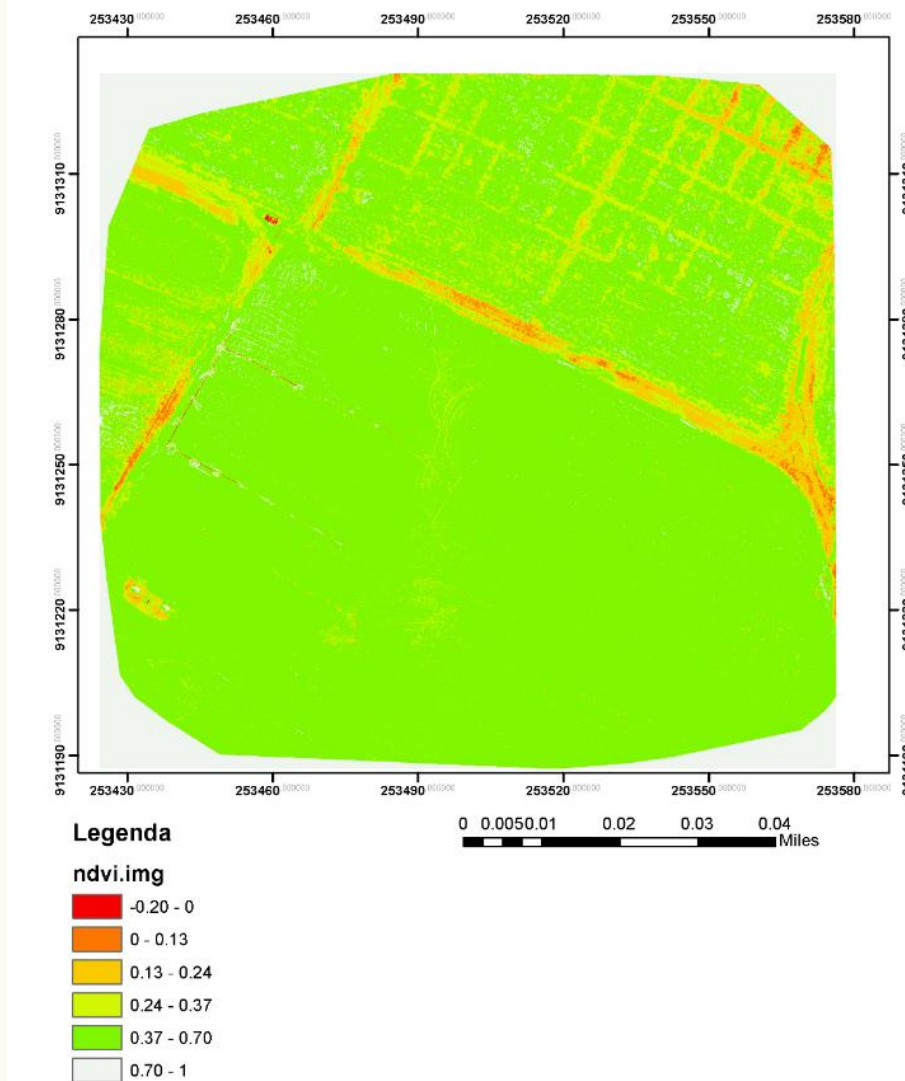


Figura 4 – NDVI corrigido.

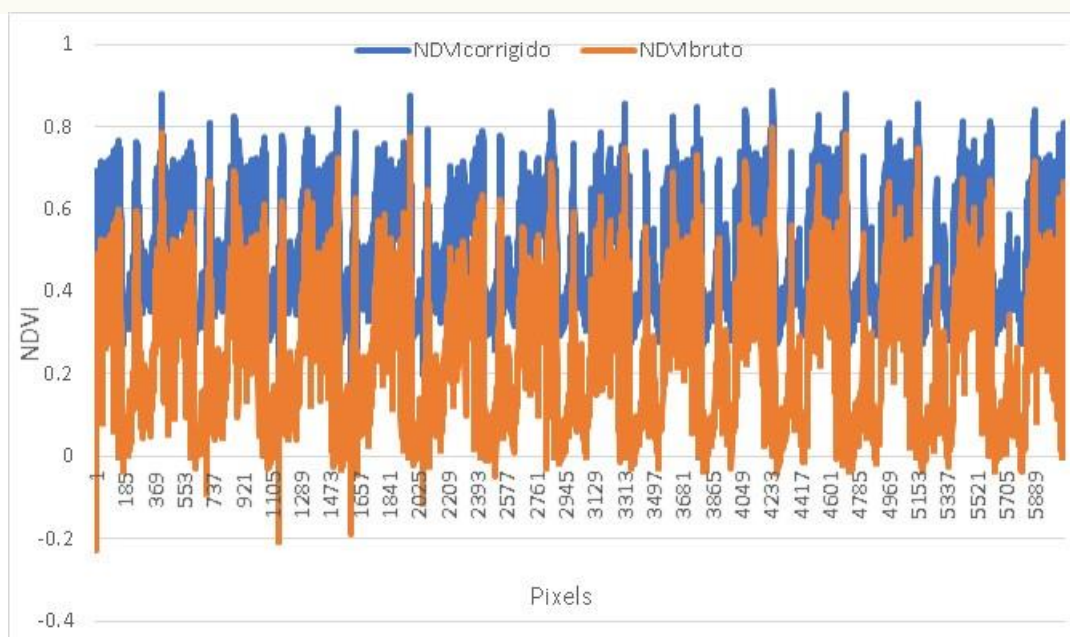


Figura 5 – Comparação NDVI corrigido e NDVI bruto.

Tabela 2 – Estatística descritiva.

		NDVIcorrigido	NDVIbruto
N	Validos	65535	65525
	Excluídos	0	10
Média		.55472315842226	.30756396584510
Raiz do erro médio		.000535417795787	.000680839836957
Mediana		.58408788305062 ^a	.33698221428571 ^a
Moda		0E-12	0E-12
Desvio padrão		.137065909979552	.174280370228715
Variância		.019	.030
Curtose		-.051	-.600
Mínimo		-.141394436359	-.228122000000
Máximo		.897181570530	.814265000000
Soma		36353.782187202945	20153.128862000092
Percentis	10	.34149100830857 ^b	.03774819718310 ^b
	20	.42271344860395	.13231692307692
	25	.46735243925026	.18670252380952
	30	.50309856635768	.23123112195122
	40	.55126996443305	.29331881690141
	50	.58408788305062	.33698221428571
	60	.61131305941220	.37394537931034
	70	.63838411294497	.41150861538462
	75	.65369690789117	.43310047530864
	80	.66990221009671	.45624396116505
	90	.70979184057654	.51444073684211

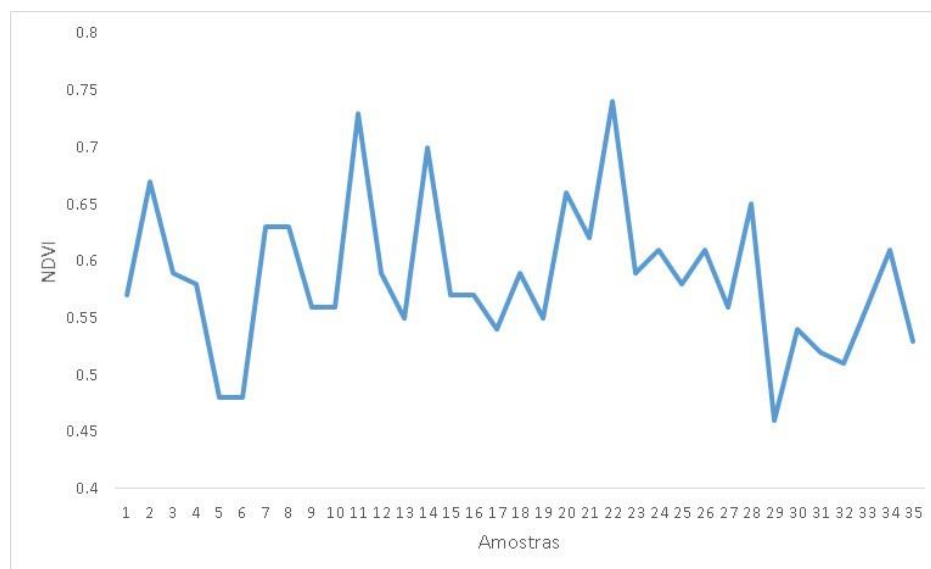
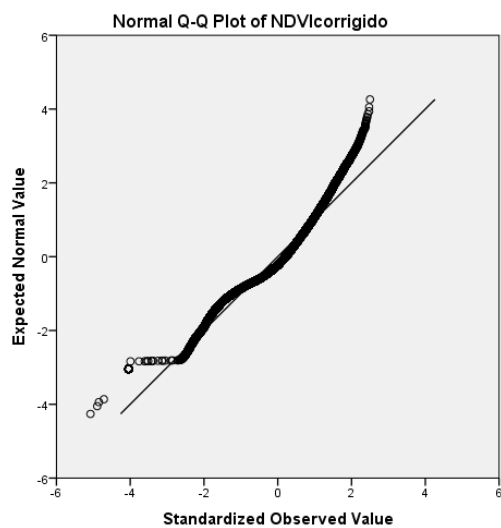
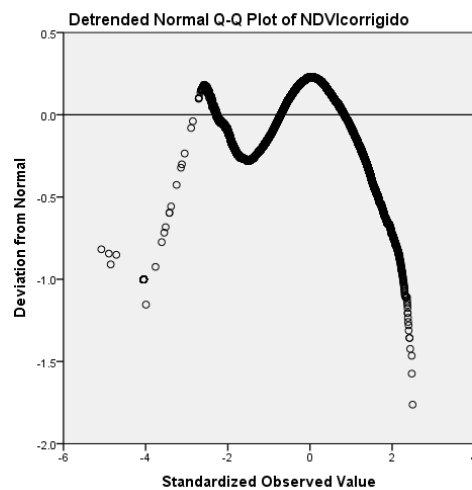


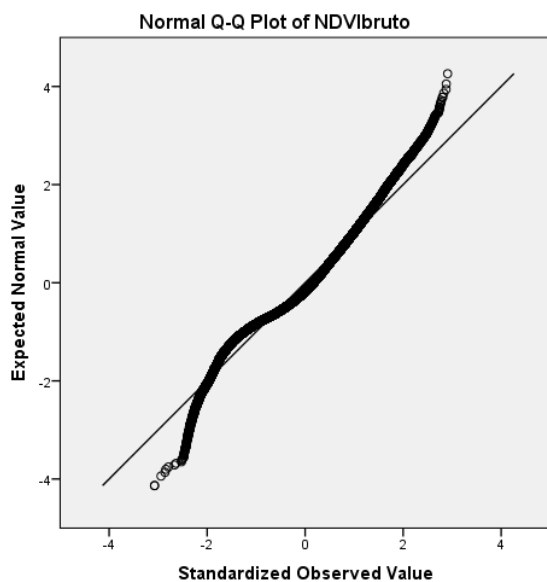
Figura 6 – NDVI de amostras de cana-de-açúcar.



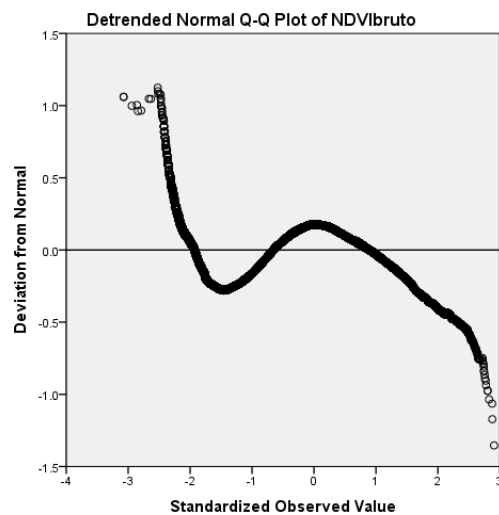
A



B



C



D

Figura 7- Distribuição normal com método de Turkey para o NDVI corrigido e bruto.

Em geral, a medição do sistema de câmeras utilizadas no imageamento de drones deste estudo se mostrou com boa consistência. Sendo o NDVI corrigido melhor ajustado aos dados observados. Alguns estudos têm obtido resultados semelhantes, Orrillo et al (2017).

Os testes estatísticos aqui utilizados mostrou que o sistema é confiável e pode ser usado como alternativa na determinação dos níveis de NDVI em campo. Mas, é preciso ressaltar que estudos com maior amostragem espacial e temporal precisa ser realizado para que se demonstrem uma maior robustez e validação entre os dados estimados e observados.

Neste estudo queremos mostrar a importância da calibração radiométrica das imagens de drones para as estimativas de índices de vegetação. Embora não seja possível dizer a partir desses resultados se houve algum efeito atmosférico, eles levantam questões sobre calibração radiométrica.

Segundo Stow et al., (2019) se forem tiradas imagens de calibração na superfície, então qualquer alteração na refletância medida com a altura é ignorada. Ainda os autores chamam atenção para as características das câmeras que podem influenciar mais na precisão dos dados do que as diferenças nas alturas do voo ou iluminação nas imagens quando mosaicadas.

Segundo Stow et al., (2019) a geometria da iluminação e a altura de vôo podem afetar a recuperação de valores de refletância de imagens individuais adquiridas pelo UAS, uma vez que dependem da alteração da geometria solar, da estrutura do dossel e possivelmente composição atmosférica.

Conclusão

Conclui-se que é de suma importância a calibração radiométrica das imagens obtidas com drones para que elas possibilitem estimativas mais precisas, aqui em especial o NDVI.

O uso de produtos de drones para estimativa de NDVI é bastante promissor. Mas, se faz necessário o estudo de mais procedimentos robustos de calibração radiométrica, aumentando a qualidade dos produtos de dados advindos de drones e tornando mais comparáveis entre sites, sensores e horários.

Agradecimentos

O autor agradece ao CNPq – pela bolsa de produtividade de pesquisa, processo 302924/2018-

9 e ao projeto universal 402834/2016-0 pela aquisição do drone termal e por custear despesas para imageamento com drones em campo.

Referências

- Allen, R. G.; Morse, A.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Bastiaanssen, W.; Wright, J. L.; Kramber, W. 2002b Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for Snake Plain aquifer in Idaho. Presented at the meeting of United States Committee on Irrigation, Drainage, and Food Control at San Luis Obispo, CA.
- Aleixo, N., & Silva Neto, J. (2016). Precipitação e Riscos em Tefê-AM (Precipitation and risk in Tefê -AM). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(4), 1176-1190. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.4.p1176-1190>
- Anderson, K.; Gaston, K.J. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front. Ecol. Environ.* 2013, 11, 138–146.
- Antoine, R., Fauchard, C., Oehler, J-F., Joignant, P., 2020. Permeability and voids influence on the thermal signal, as inferred by multitemporal UAV-based infrared and visible images. *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124907>
- Anjos, R., Nóbrega, R., Araújo, F., & Rocha Filho, G. (2016). Spatial Distribution of Rain Types in Pernambuco with the Usage of Remote Sensing. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6(3), 154-163. doi:<https://doi.org/10.5935/2237-2202.20160016>
- Araujo, T., & Fonseca, E. (2016). Análise Multitemporal dos Lençóis Maranhenses Entre 1984 a 2014 Utilizando Sensoriamento Remoto Orbital (Spatio-Temporal Analysis of Lençóis Maranhenses Between 1984 and 2014 Using Orbital Remote Sensing). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(1), 280-295. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p280-295>
- Arundel, J., Oldroyd, B., Winter, S. 2013. Modelling estimates of honey bee (*Apis* spp.) colony density from drones. *Ecological Modelling* 267, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.008>
- Assis, J., Calado, L., Souza, W., & Sobral, M. (2015). Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo no Município de Belém de São Francisco-PE nos Anos de 1985 e 2010 (Mapping of Use and Occupancy of Soil in Town of Belém de São Francisco-PE in Years of 1985 and 2010). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7(5), 859-870.

- doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.5.p859-870>
- Assis, J., Sobral, M., & Souza, W. (2012). Análise de Detecção de Variabilidades Climáticas com Base na Precipitação nas Bacias Hidrográficas do Sertão de Pernambuco (Analysis of Climate Variability Detection Based on Watershed Precipitation in the Sertão of Pernambuco). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(3), 630-645. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v5.3.p630-645>
- Bandini, F., Jakobsen, J., Olesen, D., Gutierrez, J. A. R., Bauer-Gottwein, P., 2017. Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles. *Journal of Hydrology* 548, 237-250. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.038>
- Bastiaanssen, W. G. M.; Pelgrum, H.; Wang, J.; Ma, Y.; Moreno, J. F. Roenink, G. J. Van Der Wal, T. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v.212–213, p.213-229.
- Borsuk, M. E., Higdon, D., Craig A. Stow Kenneth H. Reckhow. 2001. A Bayesian hierarchical model to predict benthic oxygen demand from organic matter loading in estuaries and coastal zones. *Ecological Modelling* 143, 165-181. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00328-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00328-3)
- Cavalcante, H., Cruz, P., Viana, L., Silva, D., & Barbosa, J. (2018). Influence of the use and the land cover of the catchment in the water quality of the semiarid tropical reservoirs. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7(7), 389-398. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.7.p389-398>
- Costa, J., & Da Silva, D. (2017). Distribuição espaço-temporal do Índice de anomalia de chuva para o Estado do Ceará (Distribution space-temporal of rain anomaly index for the Ceará State). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(4), 1002-1013. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1002-1013>
- Cruzan, M.B.; Weinstein, B.G.; Grasty, M.R.; Kohn, B.F.; Hendrickson, E.C.; Arredondo, T.M.; Thompson, P.G. Small unmanned aerial vehicles (micro-UAVs, drones) in plant ecology. *Appl. Plant Sci.* 2016, 4, 1600041.
- Da Cunha e Silva, D. C.; Albuquerque Filho, J. L.; Abreu Sales, J. C.; Lourenço, R. W. 2016. Uso de indicadores morfométricos como ferramentas para avaliação de bacias hidrográficas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, São Paulo, v. 9, n. 2, p. 627-642.
- Eetu Kotivuori, E., Kukkonen, M., Mehtätalo, L., Maltamo, M., Korhonen, L., Packalen, P. 2019. Forest inventories for small areas using drone imagery without in-situ field measurements. *Remote Sensing of Environment* 237. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111404>
- Felice, F. Di, Mazzini, A., Stefano, G. D., G. Romeo, G., Drone high resolution infrared imaging of the Lusi mud eruption. *Marine and Petroleum Geology* 90, 38-51. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.10.025>
- Francisco, P., Medeiros, R., Matos, R., Bandeira, M., & Santos, D. (2016). Análise e Mapeamento dos Índices de Umidade, Hídrico e Aridez Através do BHC para o Estado da Paraíba (Analysis and mapping of moisture indices, water and aridity through the BHC for the Paraíba state). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(4), 1093-1108. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.4.p1093-1108>
- Gabriela, K. W., Rodriguez, A., Zajc, M. E., Clément, M. Coster, A., Lambot, S. 2019. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment* 235. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111456>
- Gomes, V. P.; Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B., Ferreira, P. S.; Paz, Y. M.; Miranda, R. Q. 2016. Hyperspectral remote sensing applied for analysis of the resilience indicators and biome caatinga susceptibility to climate change. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 1122-1136.
- Guerra, S.M.M., Silva, R.B., A., Araújo, S. P., Corrêa, M.M., Silva, V. L., Santos, B. T. (2015). Caracterização Morfométrica e Avaliação da Qualidade da Água da Bacia Hidrográfica de Bitá, Ipojuca – PE (Morphometric characterization and assessment of water quality Hydrographic Basin of Bitá, Ipojuca-PE). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 759-775. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.3.p759-775>
- Kwon, Y. S., Pyo, J. C., Kwon, Y. H., Duan, H., Cho, K. H., Park. Y. 2019. Drone-based hyperspectral remote sensing of cyanobacteria using vertical cumulative pigment concentration in a deep reservoir. *Remote Sensing of Environment* 236. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111517>
- Lima, J., Montenegro, S., Montenegro, A., & Koide, S. (2014). Comparative hydrology: relationships among physical characteristics, hydrological behavior, and results of the SWAT model in different regions of Brazil (Hidrologia comparativa: relações entre características

- físicas, comportamento hidrológico e ...). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7, 1187-1195.
doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.6.p1187-1195>
- Lima, R., Moreira, E., & Nóbrega, R. (2016). A Influência Climática sobre a Epidemia Dengue na Cidade do Recife por Sistema de Informações Geográficas (Climate Influence on Dengue Epidemic in Recife City by Geographic Information System). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2), 384-398. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p384-398>
- Maier, É., Costi, J., Barreira, S., & Simões, J. (2016). Precipitação na América do Sul: Médias Climáticas e Padrões da Variabilidade no Período entre 1979 e 2008. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(1), 032-046. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p032-046>
- Manfreda, S.; McCabe, M.F.; Miller, P.E.; Lucas, R.; Pajuelo Madrigal, V.; Mallinis, G.; Ben Dor, E.; Helman, D.; Estes, L.; Ciraolo, G.; et al. On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring. *Remote Sens.* 2018, 10, 641.
- Miranda, R. Q. ;Galvêncio, J. D.; Moura, M. S. B. Jones, C. A. ; Srinivasan, R. . 2017. Reliability of MODIS Evapotranspiration Products for Heterogeneous Dry Forest: A Study Case of Caatinga. *Advances in Meteorology*, 1-14.
- Morais, Y. C.B.; Araújo, M.S. A. ;Moura, M. S. B.;Galvêncio, J. D.;Miranda, R. Q. 2017. Análise do Sequestro de Carbono em Áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 32, 585-599.
- Niedzielski, T., Szymanowski, M., Miziński, B., Spallek, W., Witek-Kasprzak, M., Ślopek, J., Kasprzak, M., Błaś, M., Sobik, M., Jancewicz, K., Borowicz, D., Remisz, J., Modzel, P., Męcina, K., Leszczyński, L., 2019. Estimating snow water equivalent using unmanned aerial vehicles for determining snow-melt runoff. *Journal of Hydrology* 578. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124046>
- Oliveira, J., de Medeiros, B., da Silva, J., Moura, G., Lins, F., Nascimento, C., & Lopes, P. (2018). Space-temporal evaluation of biophysical parameters in the High Ipanema watershed by remote sensing. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7, 357-366. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.6.p357-366>
- Oliveira, T.H.; Silva, J. E. ; Santos, M. O. ;Oliveira, J. S. E. S. ; Galvêncio, J. D. 2015. Time-space evolution of surface drainage and waterproofing process in Santo Amaro, Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 1571-1587.
- Ooi, M. (2015). Seed bank dynamics and climate change in semi-arid ecosystems: a focus on physically dormant species. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8, 651-659. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.0.p651-659>
- Patrick, M., K. Dean, J. Dehn. 2004. Active mud volcanism observed with Landsat 7 ETM+. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 131, 307-320.
- Ren, J. S., Ross, A. H., Hadfield, M. G., Hayden, B. J. 2010. An ecosystem model for estimating potential shellfish culture production in sheltered coastal waters. *Ecological Modelling* 221, 527-539. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.11.003>
- Ribeiro, R., Ávila, P., Brito, J., Santos, E., & Sousa, L. (2014). Análise da Tendência Climática nas Séries Temporais de Temperatura e Precipitação de Tucuruí-Pará (Trend Analysis of the Climate in Time Series of Temperature and Precipitation of Pará-Tucuruí). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7(5), 798-807. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.5.p798-807>
- Sanches, F., Verдум, R., & Fisch, G. (2014). Tendência de Longo Prazo das Chuvas Diárias no Sudoeste do Rio Grande do Sul: os Eventos Extremos e a Arenização (Long-Term Trend of Daily Rainfall in Southwest of Rio Grande do Sul: Extreme Events and the Sandization). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 7(6), 1100-1109. doi:<https://doi.org/10.26848/rbgf.v7.6.p1100-1109>
- Salamí, E.; Barrado, C.; Pastor, E. UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas. *Remote Sens.* 2014, 6, 11051–11081.
- Schirmbeck, L. (2017). Understanding TVDI as an index that expresses soil moisture. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 7(2), 82-90. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v7.2.p82-90>
- Singh, K. (2016). Uncertainties in Unmixing of Multi-phase Hyperspectral Data in Reflective Region: Effects of Texture and Fabric. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 5(3), 086-100. doi:<https://doi.org/10.29150/jhrs.v5.3.p086-100>
- Silva, B. B. Da.; Lopes, G. M.; Azevedo, P. V. 2005. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.20, n.2, p.243-252.

- Silva, D., Albuquerque Filho, J., Sales, J., & Lourenço, R. (2016). Uso de Indicadores Morfométricos como Ferramentas para Avaliação de Bacias Hidrográficas (Use of Morphometric Indicators as Tools for Assessment Watershed). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9, 627-642. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p627-642>
- Simões, R., Oliveira, U., Espinoza, J., Albuquerque, M., & Alves, D. (2019). Uso de drone de pequeno porte para análise costeira: enfoque metodológico (Use of small drone for coastal analysis: methodological approach). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(2), 622-640. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.2.p622-640>
- Silva, M., de Moura, F., & Jardim, C. (2017). O diagrama de Caixa (Box Plot) Aplicado à Análise da Distribuição Temporal das Chuvas em Januária, Belo Horizonte e Sete Lagoas, Minas Gerais-Brasil (The box diagram (Box Plot) applied to the analysis of the temporal distribution of rainfall in ...). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(1), 023-040. doi: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170003>
- Silva, E. R. A. C.; Miranda, R. Q.; Ferreira, P. S.; Gomes, V. P.; Galvêncio, J. D. 2016. Estimativa do Estresse Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Riacho do Pontal-PE / Hydrological stress estimate in Pontal watershed-PE. *Caderno de Geografia*, 26, 844-861.
- Silva, T G F Da ; Souza, C. A. A. ; Moura, M. S. B. ; Marin, F. R. ; Carvalho, H. F. S. ; Leitão, M. M. V. B. R. ; Galvêncio, J. D. 2019.. Balanço de Energia, Emissão Foliar e Eficiência do Uso da Radiação pela Cana-de-Açúcar em Cultivo sem e com Palhada. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 34, 69-78.
- Sousa, F., Vieira, V., Silva, V., Melo, V., & Guedes, R. (2016). Estimativas dos Riscos de Chuvas Extremas nas Capitais do Nordeste do Brasil (Estimates of the Risks of Extreme Rainfall in Capitals of Northeast Brazil). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2), 430-439. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p430-439>
- Spinelli, M., Carvalho, R., Silva, H., Brandão, S., & Frutuoso, M. (2016). Estudo Sustentável da Capacidade de Carga Antrópica e a sua Influência no Ponto de Equilíbrio da Resiliência Ambiental (Sustainable Study of the Anthropic Carrying Capacity and Its Influence on the Point of Equilibrium of the Environmental Resilience). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(1), 185-199. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.1.p185-199>
- Souza, L., Moura, M., Sediya, G., & Silva, T. (2015). Balanço de Radiação em Ecossistema de Caatinga Preservada Durante um Ano de Seca no Semiárido Pernambucano (Radiation Balance in Caatinga Ecosystem Preserved for a Year Drought in Semiarid Pernambuco). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(1), 041-055. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p041-055>
- Tauro, F., Porfiri, M., Grimaldi, S. 2016. Surface flow measurements from drones. *Journal of Hydrology*, 540, 240-245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012>
- Torresan, C.; Berton, A.; Carotenuto, F.; Gennaro, S.F.D.; Gioli, B.; Matese, A.; Miglietta, F.; Vagnoli, C.; Zaldei, A.; Wallace, L. Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *Int. J. Remote Sens.* 2017, 38, 2427–2447.
- Viana, R., Santos, G., Moreira, D., Louzada, J., & Rosa, L. (2019). O Uso da Geoestatística Espaço-Temporal na Predição da Temperatura Máxima do Ar (The Use of Space-Temporal Geostatistics in the Prediction of Maximum Air Temperature). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(1), 096-111. Doi: <http://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p096-111>.
- Vieira, A., de Magalhães, M., & da Silva, M. (2017). Uso da Terra como facilitador da Degradação Ambiental no município de Santa Quitéria, Ceará (Land use as a facilitating factor of environmental degradation in the municipality of Santa Quitéria, Ceara). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(4), 1329-1345. doi: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1329-1345>
- Quinn, W. Lewis Evan M. Lindroth Bruce L. Rhoads. 2018. Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *Journal of Hydrology* 560, 230-246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.008>
- Yurovskaya, M., Rascle, N., Kudryavtsev, V., Chapron, B., Marié, L., Molemaker, J., Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images. *Remote Sensing of Environment* 217, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.026>
- Pádua, L.; Vanko, J.; Hruška, J.; Adão, T.; Sousa, J.J.; Peres, E.; Morais, R. UAS, sensors, and data processing in agroforestry: A review towards practical applications. *Int. J. Remote Sens.* 2017, 38, 2349–2391.

Zhang, C.; Kovacs, J.M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precis. Agric.* 2012, 13, 693–712.