



Universidade Federal
de Campina Grande

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Filipe Tawã Gomes

**IMPACTOS NO MICROCLIMA ASSOCIADOS À SUBSTITUIÇÃO DA
VEGETAÇÃO NATURAL POR PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Pombal – PB

2022

Filipe Tawã Gomes

**IMPACTOS NO MICROCLIMA ASSOCIADOS À SUBSTITUIÇÃO DA
VEGETAÇÃO NATURAL POR PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão do Curso (TCC),
apresentado ao Centro de Ciências e
Tecnologia Agroalimentar - campus da
Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG) como um dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a D. Sc. Virgínia de Fátima
Bezerra Nogueira

Co-orientador: Prof. D. Sc. Walker Gomes de
Albuquerque

Área de concentração: Climatologia/Mudanças
Climáticas

Pombal - PB

2022

G633i Gomes, Filipe Tawã.

Impactos no microclima associados à substituição da vegetação natural por placas fotovoltaicas / Filipe Tawã Gomes. – Pombal, 2022.
42 f. il. color

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2022.

“Orientação: Profa. Dra. Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira, Prof. Dr. Walker Gomes de Albuquerque”.

Referências.

1. Impacto ambiental. 2. Energia renovável. 3. Saldo de radiação. 4. Sensoriamento remoto. I. Nogueira, Virgínia de Fátima Bezerra. II. Albuquerque, Walker Gomes de. III. Título.

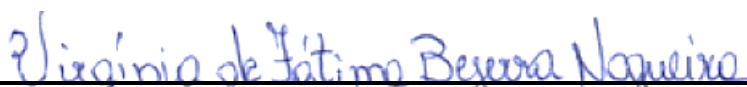
CDU 504.61(043)

Filipe Tawã Gomes

**IMPACTOS NO MICROCLIMA ASSOCIADOS À SUBSTITUIÇÃO DA
VEGETAÇÃO NATURAL POR PLACAS FOTOVOLTAICAS**

Trabalho de Conclusão do Curso (TCC),
apresentado ao Centro de Ciências e
Tecnologia Agroalimentar - campus da
Universidade Federal de Campina Grande
(UFCG) como um dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Área de concentração: Climatologia/Mudanças
Climáticas



Prof.ª Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira

Orientadora-CCTA/UFCG/Campus de Pombal-PB



M. Sc. Andrea Karla Gouveia Cavalcanti

Examinador Interno –



D. Sc. Valner da Silva Nogueira

Examinador Externo –

Pombal – PB, 21 de março de 2022

DEDICATÓRIA

“Dedico esta monografia aos meus pais, Dalvacir e José Ronaldo, que sempre estiveram ao meu lado e me apoiaram incondicionalmente em toda minha trajetória acadêmica”

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar por mais esta conquista em minha vida e por sempre me conduzir por um caminho de amor, dedicação e respeito.

Aos meus pais, Dalvacir Gomes Pereira Leite e José Ronaldo Leite, por toda paciência, apoio e compreensão durante todos os anos de minha vida e principalmente na minha formação superior.

À minha namorada, Alfredina dos Santos, que mesmo chegando no final dessa trajetória fez diferença significativa me dando confiança e incentivo dia após dia.

À demais familiares e parentes que contribuíram com minha vinda e estadia na cidade de Pombal durante meus estudos, em especial à Severina Gomes, José Gomes Sobrinho, José Gomes Filho, Ivonildes Gomes, Tião Gomes, Maria Gomes, Geraldo Gomes, Severina Sucupira, Antonio Gomes Pereira e Francisco Alessandro.

À minha orientadora Prof^a. Dr^a. Virgínia de Fátima Bezerra Nogueira pela orientação, estímulo e amizade durante todos os anos de minha formação acadêmica.

Aos professores por todo conhecimento repassado, todo apoio, todo respeito e paciência durante todo o curso, com destaque para o Prof^o. Dr. Walker Gomes, Prof^o. Dr. Cleidimario, Prof^o. Dr. Helber Rangel e Prof^a Dra. Jussara Silva Dantas, que permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

Ao setor de Serviço Social pela oportunidade de ser residente com destaque a Sebastião Marques e Maria das Neves que tanto fizeram por todos os residentes que ali passaram e aos funcionários do Restaurante Universitário por cada alimento servido em todo o período que ali me alimentei.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins dessa etapa de minha vida, Daniel Sousa, José Diogenes, Jefferson Clemente, Gean Pereira, Zaqueu Lopes, Jorge França, Ricardo de Sousa, José Amaro, Maiara Coelho, Illana Carvalho, Aline Rodrigues, Ayanne Meryllin, Edycarla Ferreira, Papilon Miller, Thalyne de Jesus, Patrícia de Jesus, Leonardo Prado, Valderisso Alfredo, Alan Keis, Rudson Silva, Lucas Pinheiro, Thyago Araújo, Nararaly e tantos outros que contribuíram para minha formação de algum modo.

À todos que participaram de projetos de pesquisa e extensão comigo durante todos esses anos.

Enfim, à todos que fizeram parte dessa etapa de minha vida.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo	15
Figura 2 – Média anual de irradiação - Brasil.....	16
Figura 3 – Usina fotovoltaica de Malta - PB	20
Figura 4 – Diagrama das etapas para processamento de Saldo de Radiação (Rn)..	22
Figura 5 – Albedo de superfície da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.	28
Figura 6 – Albedo de superfície da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.	30
Figura 7 – NDVI da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.	31
Figura 8 – NDVI da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.	32
Figura 9 – TST da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.	33
Figura 10 – TST da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.	34
Figura 11 – Saldo de Radiação da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.	35
Figura 12 – Saldo de Radiação da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos sensores do Landsat 8	21
Tabela 2 – Coeficientes dos pesos para cálculo de albedo no topo da atmosfera....	24

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Geral	14
2.2 Específicos	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 Energia Solar	15
3.2 Albedo	17
3.3 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	17
3.4 Temperatura de Superfície Terrestre	18
3.5 Saldo de Radiação	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	20
4.1 Área de Estudo	20
4.2 Metodologia	21
<i>4.2.1 Sebal</i>	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6 CONCLUSÃO	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho determinar a ocorrência de alteração do microclima na área de uma usina solar associados à substituição da vegetação natural por placas fotovoltaicas. Analisou-se o albedo de superfície, o índice de Vegetação por Diferença Normalizada, a Temperatura de Superfície Terrestre e o Saldo de Radiação no local de uma usina fotovoltaica, antes e após sua construção. Para obter essas variáveis foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, mais especificamente dos sensores OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor) dos meses de fevereiro e outubro nos anos de 2015 e 2021, referente ao ano anterior a construção do empreendimento e ao posterior, respectivamente. Utilizaram-se imagens no formato, GEOTIFF (TIFF), vetores no formato Shapefile (SHP), Modelo Digital de Elevação (MDE) captada através do sistema TOPODATA e usou-se o algoritmo SEBAL aplicado aos softwares GRASS 7.2.2 e QGIS 2.14.22. Os resultados demonstram a eficiência do procedimento aplicado apresentando uma diminuição do albedo e a temperatura de superfície. Apontou-se ainda que as placas apresentaram a mesma temperatura de solo exposto e a alteração do uso do solo resultou numa queda no saldo de radiação, comparado aos pontos externos, corroborando assim com a alteração microclimática causada pela usina.

Palavras-chave: Impacto Ambiental. Energias Renováveis. Saldo de Radiação. Sensoriamento Remoto.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the occurrence of microclimate change in the area of a solar plant associated with the replacement of natural vegetation by photovoltaic plates. The surface albedo, the Normalized Difference Vegetation Index, the Earth Surface Temperature and the Radiation Balance at the site of a photovoltaic plant, before and after its construction, were analyzed. To obtain these variables, images from the Landsat 8 satellite were used, more specifically the OLI (Operational Land Imager) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) sensors from the months of February and October in the years 2015 and 2021, referring to the year prior to the construction of the enterprise. and later, respectively. Images in the format, GEOTIFF (TIFF), vectors in the Shapefile format (SHP), Digital Elevation Model (DEM) captured through the TOPODATA system and the SEBAL algorithm applied to the GRASS 7.2.2 and QGIS 2.14 software were used. 22. The results demonstrate the efficiency of the applied procedure showing a decrease in albedo and surface temperature. It was also pointed out that the plates had the same exposed soil temperature and the change in land use resulted in a drop in the radiation balance, compared to the external points, thus corroborating the microclimatic change caused by the plant.

Keywords: Environmental impact. Renewable Energy. Radiation Balance. Remote Sensing.

1 INTRODUÇÃO

No atual cenário energético mundial as fontes renováveis têm ocupado espaço significativo e essencial em meio a tantas outras fontes de geração de energia. No quesito sustentabilidade, a energia solar fotovoltaica vem sendo altamente requisitada tanto para instalações residenciais quanto comerciais, incluindo usinas de alto porte, visto que seu custo de instalação é inferior de maneira significativa.

Para Da Silva e Severo (2012), o semiárido nordestino se põe como alternativa ideal para a instalação de usinas fotovoltaicas pelo seu alto potencial de irradiação devido a sua localização geográfica que lhe possibilita receber uma média de 8 horas diárias de irradiação e chega a um potencial de aproximadamente 5800 Wh/m² de acordo com dados da ANEEL. De Almeida e De Almeida (2022) destacam que o desenvolvimento econômico sustentável depende do uso de fontes alternativas de energia que possibilitem o bem estar populacional com o mínimo de impacto ambiental possível.

As mudanças climáticas a nível mundial mostram que a sociedade precisa de uma nova adaptação em seu modo de viver. O ser antrópico causou inúmeros impactos ao meio em que vive ao ponto que o clima passou a sofrer mudanças radicais a partir da liberação a nível avançado e desenfreado de quantidades elevadas de gases tóxicos. Lacerda et al. (2020) afirmam a necessidade de uma nova matriz energética associada a um programa de reflorestamento que possa transformar essa realidade.

Fontes renováveis têm se tornado alternativa altamente viável quando se parte da preocupação com o futuro do meio ambiente. No entendimento de Cunha et al. (2019), o aumento de investimentos governamentais para a aquisição de equipamentos de geração de energia fotovoltaica tem contribuído para que mais setores da sociedade tenham acesso a essa tecnologia, proporcionando meio sustentável e livre de geração de resíduos que possam atingir negativamente o meio ambiente.

Impactos significativos podem ser identificados fazendo uso do georreferenciamento, como cita Silva et al. (2018) que ao se verificar altos índices de Temperatura e Albedo de superfície, pode-se supor que se trata de área com

degradação visto que áreas vegetadas tendem a ser mais frias e possuir menor albedo.

Nos últimos anos, a intensificação do uso do geoprocessamento vem possibilitando avanços significativos na área de monitoramento de dados via satélite que possibilitam estimar por meio de equações e de scripts, como o SEBAL, o monitoramento de áreas de degradação que tenham causado impacto ambiental significativo.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Determinar se houve alteração do microclima na área de uma usina solar associada à substituição da vegetação natural por placas fotovoltaicas.

2.2 Específicos

- Obter NDVI, TST, albedo e Saldo de Radiação, antes e depois da instalação da usina;
- Analisar os mapas de NDVI, TST, albedo e Saldo de Radiação no período chuvoso e no período seco antes e depois da instalação da usina;
- Determinar se a presença da usina alterou o microclima local.

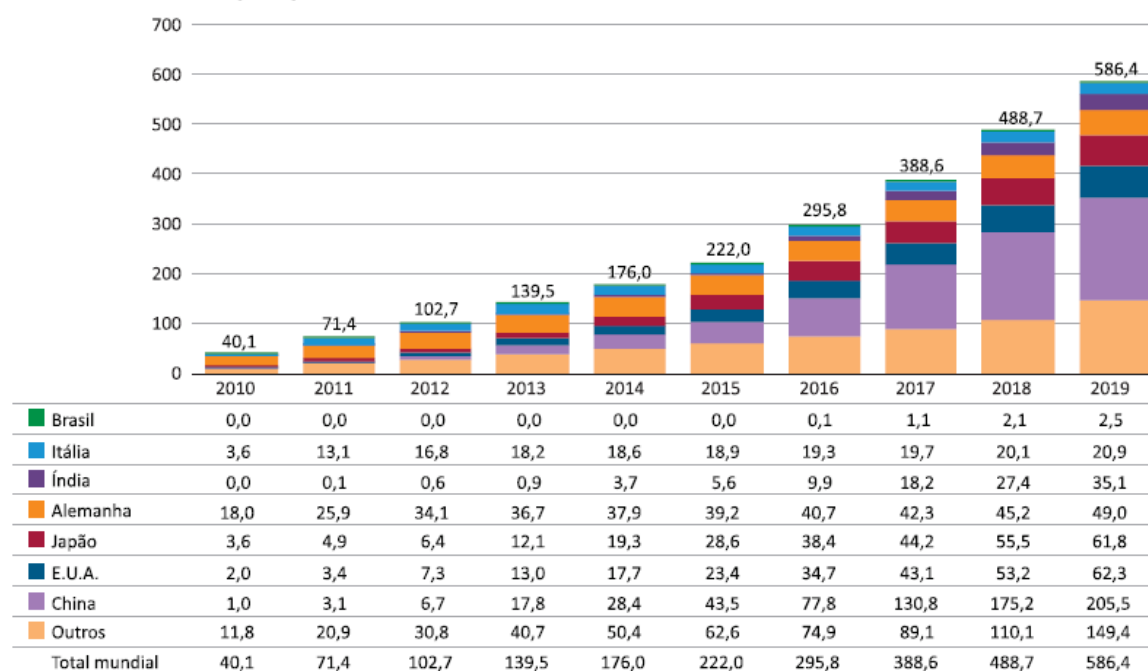
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Energia Solar

O sol fornece diariamente energia suficiente para manter a demanda energética mundial e ainda assim sobrar uma quantidade absurda de energia não captada. Enquanto o consumo global de energia no ano de 2000 chegou ao nível de 13TW (TeraWatts), a terra recebe anualmente cerca de $9,5 \times 10^4$ TW (MACHADO E MIRANDA, 2015). A energia elétrica fotovoltaica tem se sobressaído às demais devido a sua praticidade para converter energia solar em energia elétrica, visto que tanto individuais quanto em associação as placas podem atender ao consumo dos mais variados tipos de consumidores, sejam residenciais ou comerciais (Bezerra, 2021).

A nível mundial, o Brasil ainda é tímido no que se refere a geração de energia a partir dos raios solares (Figura 1).

Figura 1 – Evolução da capacidade instalada de geração fotovoltaica no mundo

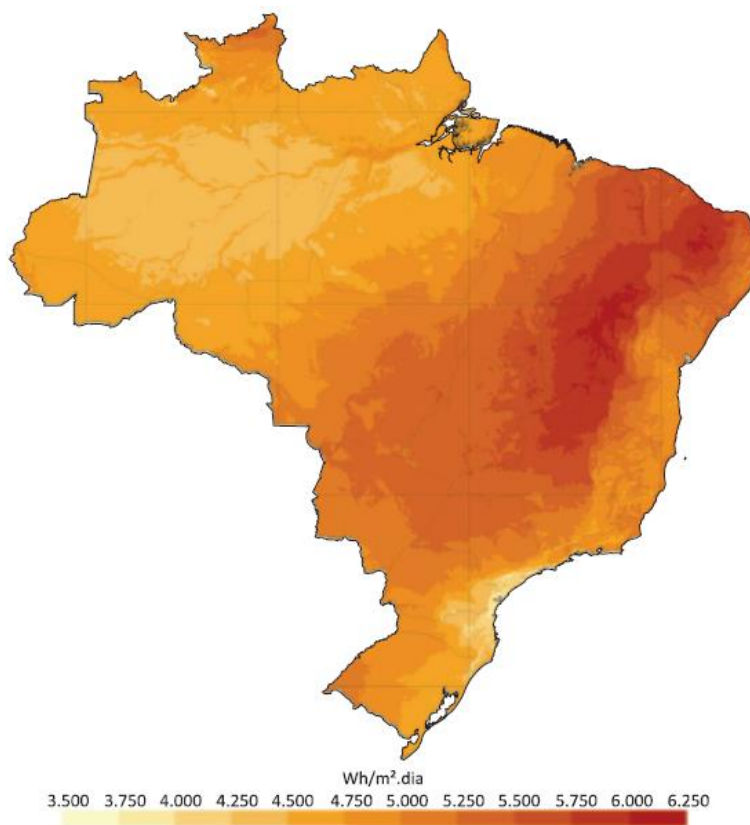


Fonte: Renewable Energy (2020). Elaboração: BNB/ETENE.

Mesmo com uma vasta área possível de implantação de usinas que capturem e transformem energia solar, ainda estamos longe muito distantes dos maiores do mundo como China, EUA e Japão em termos de geração de energia.

O Brasil recebe muita irradiação solar, o que é ideal para a instalação de usinas solares, podendo se destacar a nível mundial como um grande produtor desse tipo de energia. Segundo Pereira et al. (2017), o nordeste brasileiro apresenta valores elevados de irradiação solar, com média anual de 5,52 kWh/m². dia e baixíssima variabilidade interanual, tornando assim ideal para a geração de energia fotovoltaica (Figura 2).

Figura 2 – Média anual de irradiação - Brasil



Fonte: Pereira et al. (2017).

3.2 Albedo

Trata-se de um parâmetro utilizado em modelos climáticos que expressa a fração de radiação visível refletida pela superfície através da relação entre a energia que a superfície reflete e a que incide dependendo também das propriedades físicas da superfície em questão (Ferreira, 2006).

Oliveira et al. (2010) definem Albedo como a razão definida entre a radiação de onda curta refletida e a incidente, variando de acordo com a posição do sol e de fatores como umidade e ocupação do solo assim como a presença de nuvens, e pode ser usado para comprovação de mudanças da superfície visto que um albedo elevado é resultante de maior exposição solar.

De acordo com Berbet e Costa (2003), o albedo é um dos principais controladores de convecção nos trópicos, sendo um indicador biofísico de extrema importância para a análise dos dados de reflectância sob a superfície terrestre (razão entre radiação solar incidente e refletida que cada superfície reflete). Seu estudo se torna essencial para uma melhor análise dos impactos que podem ser causados pela exposição completa do solo para a instalação de placas solares.

O albedo de superfície, de acordo com Angelini (2018), é o parâmetro que possibilita estimar a capacidade de uma determinada superfície de refletir radiação eletromagnética. O albedo utilizado em cálculos que envolvam saldo de radiação é o de banda larga ($0,4\mu\text{m}$ à $2,35\mu\text{m}$).

3.3 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O NDVI é o índice de vegetação por diferença normalizada, sendo obtido a partir da razão entre a diferença e a soma das refletâncias no infravermelho próximo e no vermelho e é comumente utilizado para se monitorar vegetação, apresentando como resultados valores que variam de -1 a 1 (CORDEIRO et al., 2017).

O desenvolvimento do índice NDVI tem sua importância no monitoramento de alterações na vegetação causadas de forma antrópica ou não, permitindo o monitoramento da densidade e vigor de vegetação da superfície do nosso planeta (SILVA et al., 2009).

De acordo com estudos de Silva (2009), a ocorrência de valores abaixo do normal é justificada por nuvens e por sombreamentos provocados tanto pelas próprias nuvens quanto por árvores, construções e diversos outros fatores. Devido a diferença de vigor vegetativo refletido pelas mais diversas espécies vegetais, o uso do parâmetro pode identificar quais espécies estão presentes no local de análise.

Com a atualização adquirida ao longo dos anos, há também um melhoramento do modelo NDVI chamado SAVI (Índice de Vegetação Ajustado do Solo), que leva em consideração os efeitos do solo exposto para gerar seus resultados (HUETE et al., 1988).

3.4 Temperatura de Superfície Terrestre

Assim como o índice NDVI, a TST (Temperatura de superfície terrestre) é utilizada para monitorar padrão térmico e assim acompanhar o estado de vegetação e cultivos e se trata de um método de monitoramento via geoprocessamento. A TST estimada pelo satélite surge a partir da conversão da radiância térmica do topo da atmosfera em temperatura radiométrica. Devido a necessidade de correção de efeitos atmosféricos, há a necessidade de uso de algoritmos que façam esse ajuste para se ter uma maior noção da realidade identificada pelo sensor (ANGELINI, 2018).

A análise de mapas a partir da temperatura de superfície indica juntamente com o de NDVI a presença ou não de solo exposto ou vegetação visto que na presença de vegetação subtende-se que a temperatura passe a ser inferior se comparado a locais de solo exposto, fazendo com que o uso destes parâmetros em conjunto se tornem eficazes na obtenção de resultados satisfatórios de índices vegetativos. De acordo com a pesquisa de Rodrigues e Silva (2018), os valores de temperatura de superfície e de albedo em muitos casos têm sido proporcionais entre si numa comparação entre culturas, Área de Preservação Permanente (APP), solo exposto e área urbana.

3.5 Saldo de Radiação

O saldo de radiação (R_n) é definido como a diferença entre a radiação absorvida e a emitida pela superfície do planeta e representa a interação entre os componentes biofísicos que auxiliam na gestão de componentes naturais de modo a facilitar o entendimento de suas relações (VELOSO et al., 2020).

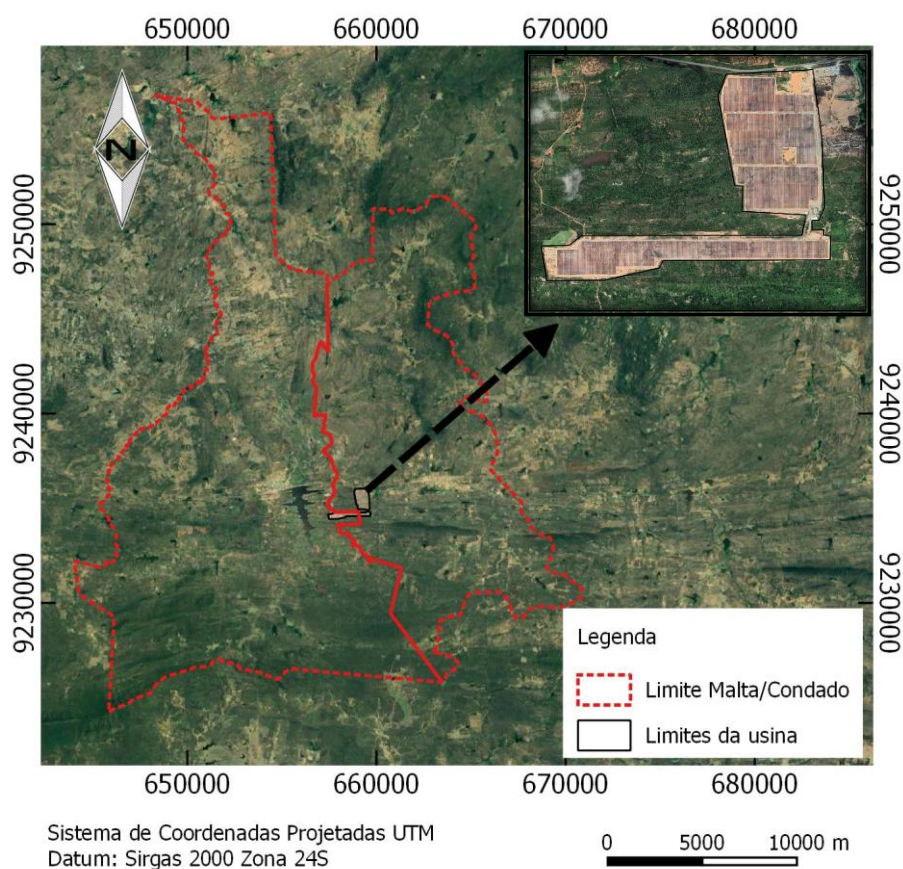
A partir do conhecimento do saldo de radiação (R_n), pode-se estimar a perda de água da superfície para a atmosfera de modo a auxiliar em estudos sobre planejamento e gestão de recursos hídricos. O conhecimento do saldo de radiação tem sua importância para a abrangência no monitoramento climático que pode auxiliar em modelagem hidrológica e agrícola (FAGUNDES et al., 2019).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de Estudo

A área de estudo é a Usina Fotovoltaica localizada no sítio Angicos, entre as cidades de Malta e Condado, porém pertencente a cidade de Malta, estado da Paraíba, no Nordeste Brasileiro. A área do terreno é de aproximadamente 120ha, tendo apenas 70ha ocupados pelas placas fotovoltaicas (Figura 3).

Figura 3 – Usina fotovoltaica de Malta - PB



Fonte: Autoria própria (2022).

A escolha desta área para a realização deste trabalho se deu por sua importância social e econômica para a região e pela ausência de estudos que demonstrem o impacto causado também no meio ambiente, mais especificamente o

impacto causado no microclima local pela substituição da vegetação nativa pelas placas fotovoltaicas.

4.2 Metodologia

Para o presente trabalho foram utilizadas imagens com menor interferência de nuvens, referentes aos meses de fevereiro e outubro dos anos de 2015 e 2021, que representam o período chuvoso e seco, sendo eles anteriores a construção da usina fotovoltaica e o ano mais recente. As imagens foram reprojctadas para o Datum SIRGAS 2000 24S.

Foram utilizadas imagens no formato GEOTIFF dos sensores OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor), ambos pertencentes ao Satélite Norte Americano Landsat 8. Utilizou-se também um Modelo Digital de Elevação (MDE) adquirido através do sistema de dados geomorfométricos do Brasil (Topodata). De acordo com Roy et al. (2014) o sensor OLI é representado pelas bandas espectrais do infravermelho e visíveis e o sensor TIRS pelas bandas térmicas.

Na Tabela 01 estão listadas as resoluções espaciais em metros e comprimento de ondas dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8 disponibilizados em metadados.

Tabela 1 – Dados dos sensores do Landsat 8

Sensor	Banda	Comp. De onda (μm)	Resolução espacial (m)
OLI	1	0.43 – 0.45	30
	2	0.45 – 0.51	30
	3	0.53 – 0.59	30
	4	0.64 – 0.67	30
	5	0.85 – 0.88	30
	6	1.57 – 1.65	30
	7	2.11 – 2.29	30
	8	0.50 – 0.68	15
	9	1.36 – 1.38	30

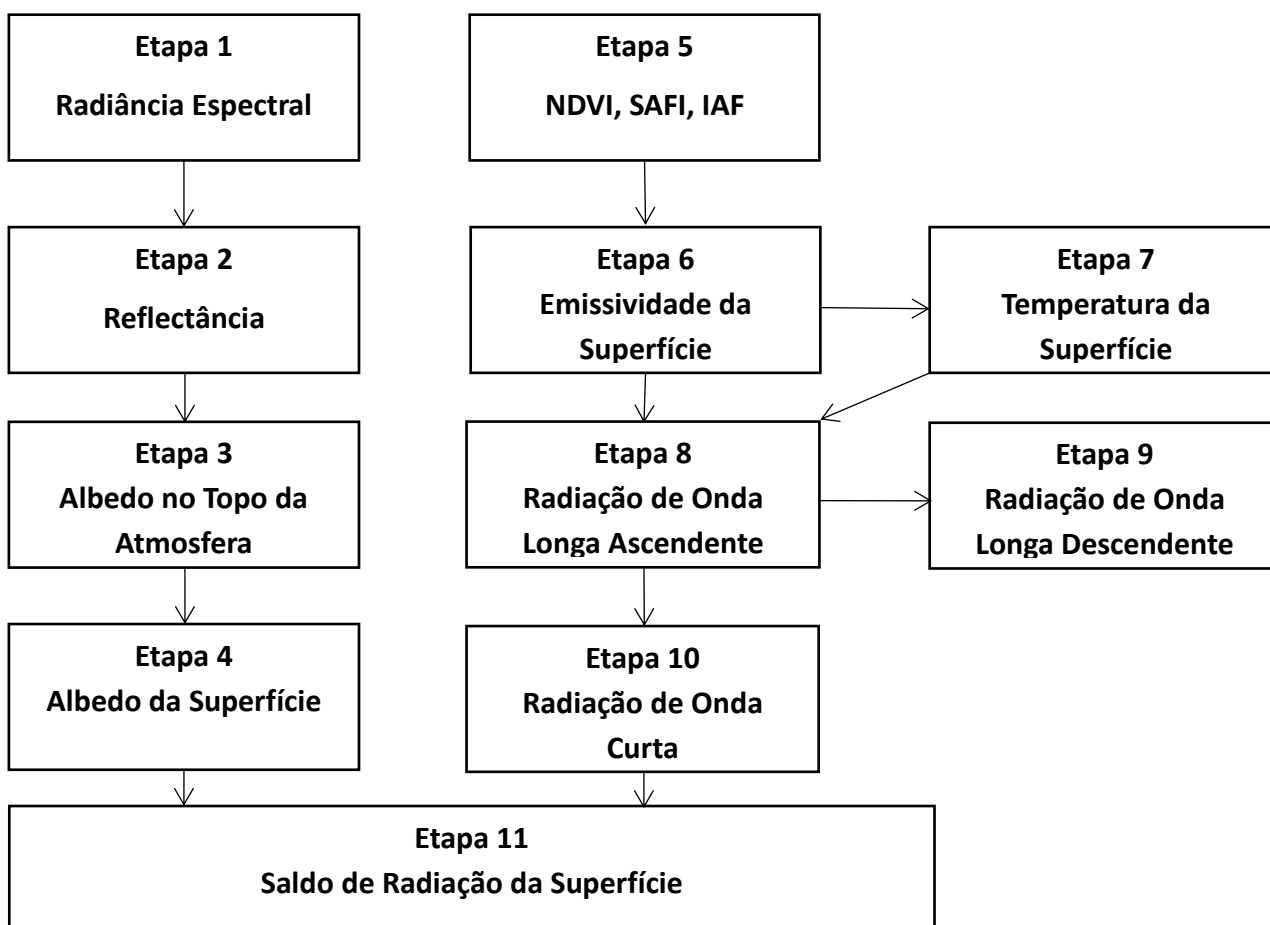
Fonte: Adaptado de Pessanha et al. (2018).

Tabela 1 – Dados dos sensores do Landsat 8 (Continuação)

Sensor	Banda	Comp. De onda (μm)	Resolução espacial (m)
TIRS	10	10.60 – 11.19	100
	11	11.50 – 12.51	100

Fonte: Adaptado de Pessanha et al. (2018).

As imagens foram processadas no software QGIS 2.14.22, reprojatadas, recortadas e posteriormente utilizadas no GRASS 7.2.2 para a geração dos dados finais utilizando o script em python (linguagem de programação comumente utilizada em programas de computador) disponibilizadas na rede mundial de computadores por Wolff (2016). Para estimar o saldo de radiação foi utilizado o algoritmo SEBAL (BASTIAANSEN, 1998.), apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama das etapas para processamento de Saldo de Radiação (R_n)

Fonte: Adaptado de Meireles (2007)

4.2.1 Sebal

Desenvolvido por Bastiaanssen (1995), o algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) foi utilizado para a obtenção do Saldo de radiação seguindo as etapas anteriormente citadas assim como utilizando as equações citadas a seguir.

Correção atmosférica e conversão do número digital (ND) em refletância:

$$\rho_{\lambda,b} = \frac{H_{\rho} Q_{CAL} + A_{\rho}}{\cos(\theta_{SE})}$$

Na qual:

- $\rho_{\lambda,b}$ – Refletância monocromática de todas as bandas;
- H_{ρ} – Redimensionamento multiplicativo específico de cada banda (constante -0,1);
- Q_{CAL} – Número Digital (ND);
- A_{ρ} – Fator aditivo (constante 2E-5);
- θ_{SE} – Ângulo do azimute, calculada por:

$$\theta_{SE} = 90 - \theta_{SZ}$$

- θ_{SZ} – Ângulo de elevação solar;

Albedo de superfície sem correção atmosférica através da radiação de onda curta:

$$\alpha_{toa} = (\varpi_2 * \rho_{\lambda,2}) + (\varpi_3 * \rho_{\lambda,3}) + (\varpi_4 * \rho_{\lambda,4}) + (\varpi_5 * \rho_{\lambda,5}) + (\varpi_6 * \rho_{\lambda,6}) + (\varpi_7 * \rho_{\lambda,7})$$

Em que:

- α_{toa} – Albedo da superfície no domínio da radiação de onda curta (0,3 – 3,0 μm);
- ϖ_n – Coeficiente dos pesos de cada banda;
- $\rho_{\lambda,n}$ – Refletâncias espectrais de cada banda;

Cálculo de cada peso:

$$\omega_{\lambda,b} = \frac{ESUN_{\lambda,b}}{\sum ESUN_{\lambda,b}}$$

Sendo:

- $\omega_{\lambda,b}$ – Coeficiente dos pesos;
- $ESUN_{\lambda,b}$ – Constante solar específica da banda b;

Tabela 2 – Coeficientes dos pesos para cálculo de albedo no topo da atmosfera.

Bandas	2	3	4	5	6	7
ω_n	0,300	0,277	0,233	0,143	0,036	0,012
$ESUN_{\gamma,b}$	2011,300	1853,000	1532,800	956,400	237,800	80,200

Fonte: adaptado de Silva et al. (2016).

Correção do albedo:

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{TOA} - \alpha_{atm}}{\tau_{SW}^2}$$

Na qual:

- α_{sup} – Albedo corrigido;
- α_{TOA} – Albedo no topo da atmosfera;
- α_{atm} – Radiação solar refletida pela atmosfera, adota-se 0,03 (Bastiaanssen et al. 2000);
- τ_{SW} – Transmitância atmosférica em dia de céu claro, calculada por:

$$\tau_{SW} = 0,75 + 2 * 10^{-5} * MDE$$

Em que:

- MDE – Altitude (m) de cada pixel do Modelo digital de elevação.

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI):

$$NDVI = \frac{(\rho_{IV} - \rho_V)}{(\rho_{IV} + \rho_V)}$$

Na qual:

- $NDVI$ – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;
- ρ_{IV} – Refletância do infravermelho;
- ρ_V – Refletância do vermelho.

Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)}$$

Em que:

- $SAVI$ – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo;
- L – Fator de ajuste do solo (adota-se 0,5).
- ρ_{IV} – Refletância do infravermelho;
- ρ_V – Refletância do vermelho.

Índice de Área Foliar:

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$$

Sendo:

- IAF – Índice de Área Foliar.
- $SAVI$ – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo;

Emissividade de superfície:

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 * IAF$$

Na qual:

- ε_0 – Emissividade de superfície (pela equação de Plank invertida);
- IAF – Índice de Área Foliar.

Radiância monocromática:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Em que:

- L_{λ} – Radiância monocromática;
- M_L – Fator de reescalonamento multiplicativo específico ($3,342 \times 10^{-4}$);
- Q_{cal} – Valor pixel a pixel da imagem;
- A_L – Fator de reescalonamento aditivo específico (0,1).

Temperatura de Superfície:

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)}$$

Na qual:

- T_S – Temperatura de Superfície;
- K_1 – Constante de calibração (774,88K);
- K_2 – Constante de calibração (1321,08K).
- L_{λ} – Radiância monocromática;

Radiação de onda longa emitida:

$$R_{ol,emi} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_S^4$$

Em que:

- $R_{ol,emi}$ – Radiação de onda longa emitida ($W \cdot m^{-2}$);
- ε_0 – Emissividade de superfície;
- σ – Constante de Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$);
- T_S – Temperatura de superfície.

Radiação de onda longa incidente:

$$R_{ol,atm} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4$$

$$\text{onde: } \varepsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln\tau_{sw})^{0,09}$$

Tendo:

- $R_{ol,atm}$ – Radiação de onda longa incidente (W.m^{-2});
- ε_a – Emissividade do ar;
- σ – Constante de Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$);
- T_a - Temperatura do ar;
- τ_{sw} – Transmitância atmosférica.

Radiação de onda curta incidente:

$$R_s = Q \cdot \cos\theta \cdot dr \cdot \tau_{sw}$$

Sendo:

- Q – Constante solar (1367 W.m^{-2});
- θ – Ângulo de incidência solar;
- dr – Distância Terra – Sol;
- τ_{sw} – Transmissividade atmosférica;

Saldo de Radiação (Rn):

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_s + R_{ol,atm} - R_{ol,emi} - (1 - \varepsilon_0) \cdot R_{ol,atm}$$

Na qual:

- R_n – Saldo de radiação (W.m^{-2})
- α – Albedo de superfície;
- R_s – Radiação de onda curta incidente;
- $R_{ol,atm}$ – Radiação de onda longa incidente (W.m^{-2});
- $R_{ol,emi}$ – Radiação de onda longa emitida (W.m^{-2});
- ε_0 – Emissividade da superfície ($4 - 100 \mu\text{m}$);

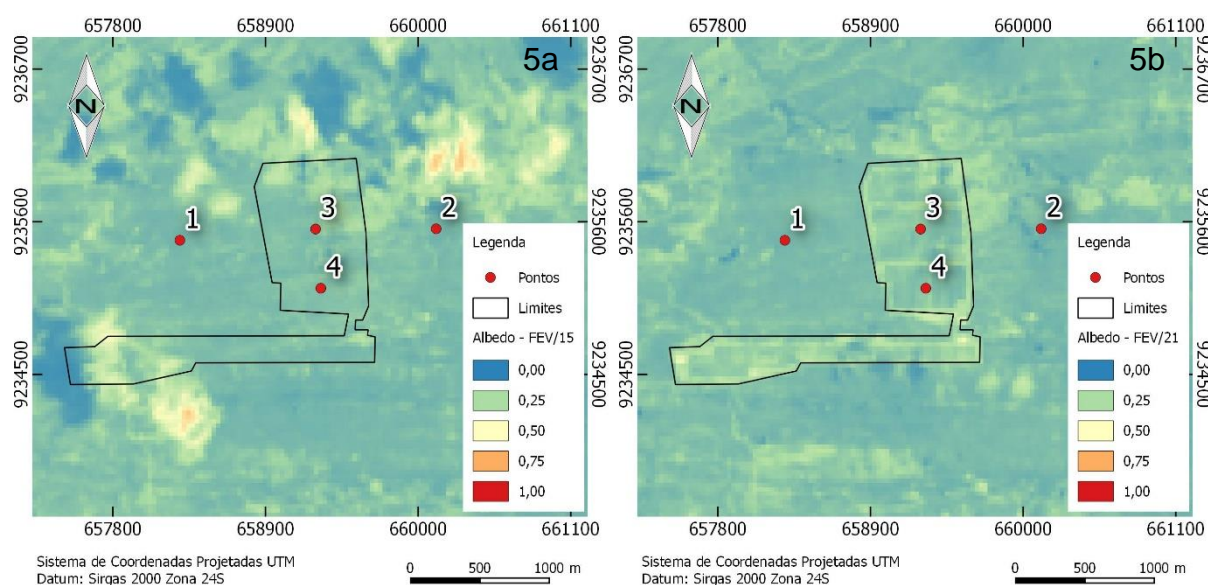
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

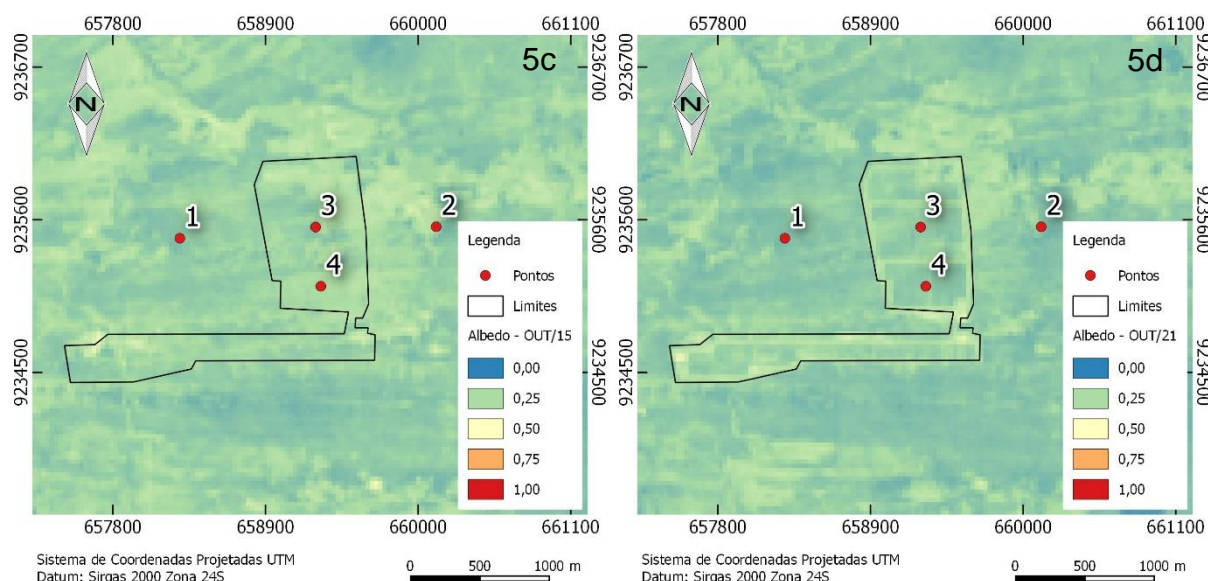
As discussões foram realizadas com base nas figuras com os mapas contendo as variáveis (Albedo, NDVI, TST e Rn) para os meses de fevereiro e outubro dos anos de 2015 e 2021

Na Figura 5 observa-se o albedo de superfície nos meses de fevereiro e outubro de 2015 e 2021. Observou-se um aumento significativo do albedo principalmente nas áreas de solo exposto como demonstrado pelos caminhos nas bordas da área da usina já construída, se aproximando do valor de 0.5. Veloso et al. (2016) obtiveram valores em seu trabalho por meio da comparação entre áreas com alta presença de sedimentos e áreas alagadas que apresentaram valores menores de albedo.

Comparando as Figuras 5a e 5b com 5c e 5d percebemos variação mínima no albedo, com valores maiores no período seco. É perceptível também que se comparados os mapas de acordo com os anos, houve aumento do albedo na região da usina, ficando muito perceptível as linhas de tráfego de veículos, onde se tem solo exposto.

Figura 5 – Albedo de superfície da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.



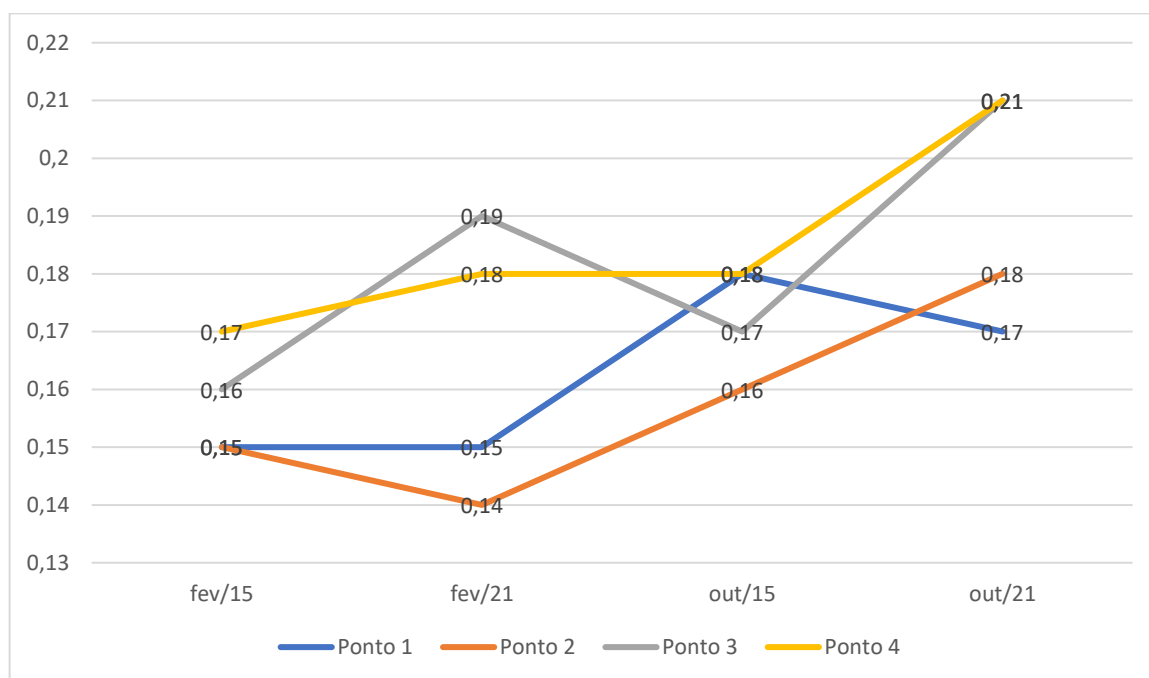


Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 6 estão apresentados os valores de albedo nos pontos internos e externos da usina, em pontos que foram escolhidos com base na homogeneidade dos valores. Durante o período anterior à construção da usina houve uniformidade dos valores visto que não havia interferência humana significativa naquele local que causasse alterações nessa variável. Após a construção do empreendimento houve aumento de albedo em todos os quatro pontos, porém, o albedo nos pontos 3 e 4, localizados sobre a área com as placas fotovoltaicas, tenderam a ser superiores aos pontos externos. O aumento significativo do albedo principalmente no período seco é justificado pela redução de vegetação e altas temperaturas.

A diferença de valores de albedo fica mais evidente quando se compara os meses de um mesmo ano, demonstrando que mesmo sem a presença da usina, os índices se superam no período seco. A área externa, por não estar sob ação humana, possui albedo inferior visto que ali pode haver a ocorrência de vegetação, mesmo que escassa e seca. Vale levar em consideração que a localização (semiárido nordestino) possui espécies vegetais adaptativas ao período de estiagem.

Figura 6 – Albedo de superfície da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.

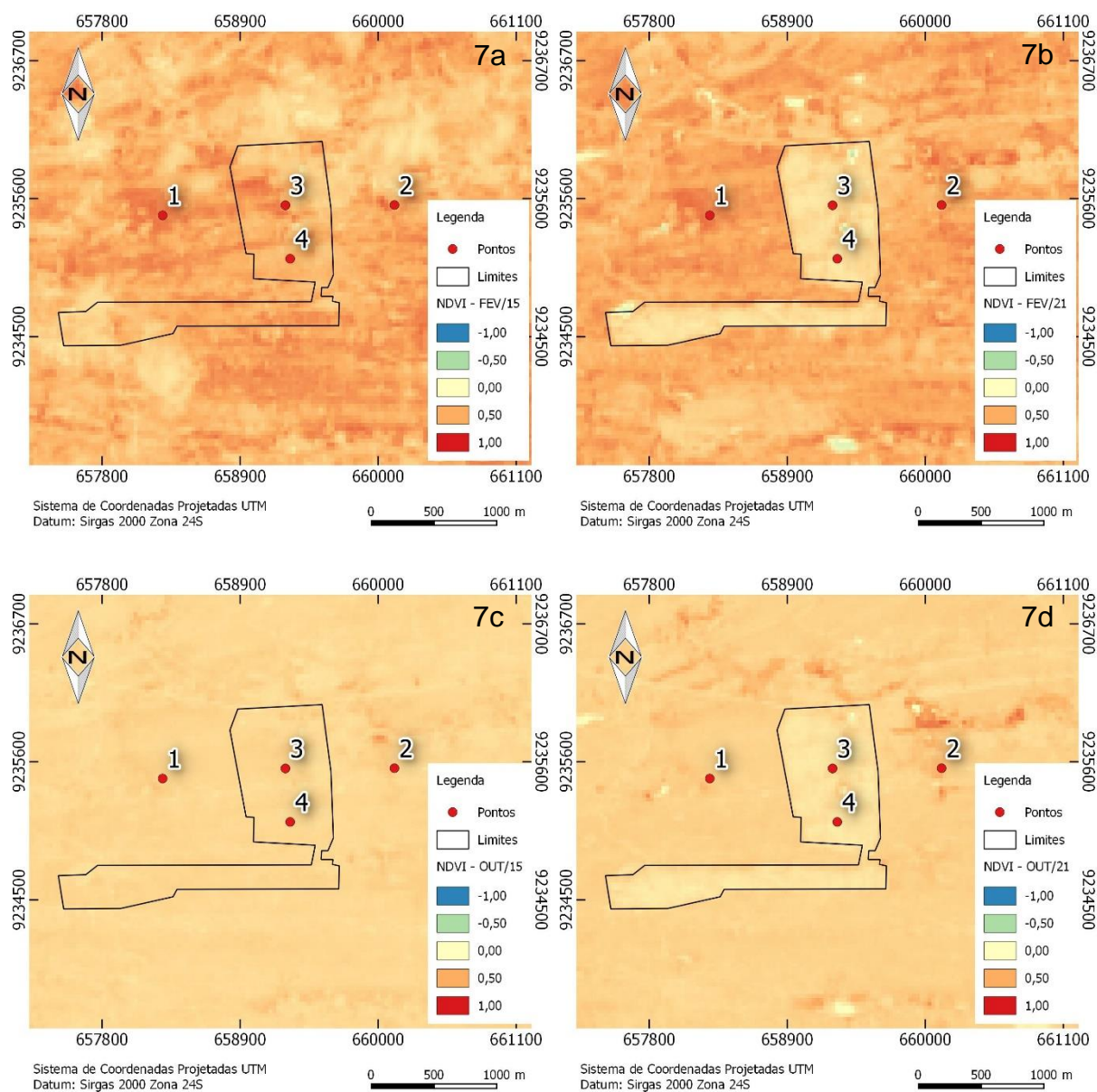


Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 7 estão os valores do índice NDVI, caracterizado por Brandão et al. (2007) como indicador sensível de quantidade e condição de vegetação. Comparando fevereiro de 2015 (7a) fevereiro de 2021 (7b) fica evidente a discrepância de valores após a construção da usina (2021), tendo em vista que a vegetação fica mais evidente e o local delimitado pela usina tem dados aproximados de 0 (zero), representando ausência de vegetação no local.

Durante o período chuvoso (7a e 7b), representado pelo mês de fevereiro, percebe-se que os valores são mais próximos e até acima do índice 0,5 demonstrando assim aumento de biomassa, com exceção da área ocupada pela usina que fica bem evidente no mapa. Enquanto que no mês de outubro, devido à escassez hídrica, percebe-se uma baixa no NDVI e os valores dentro e fora da usina são semelhantes, pois ambos não possuem vegetação.

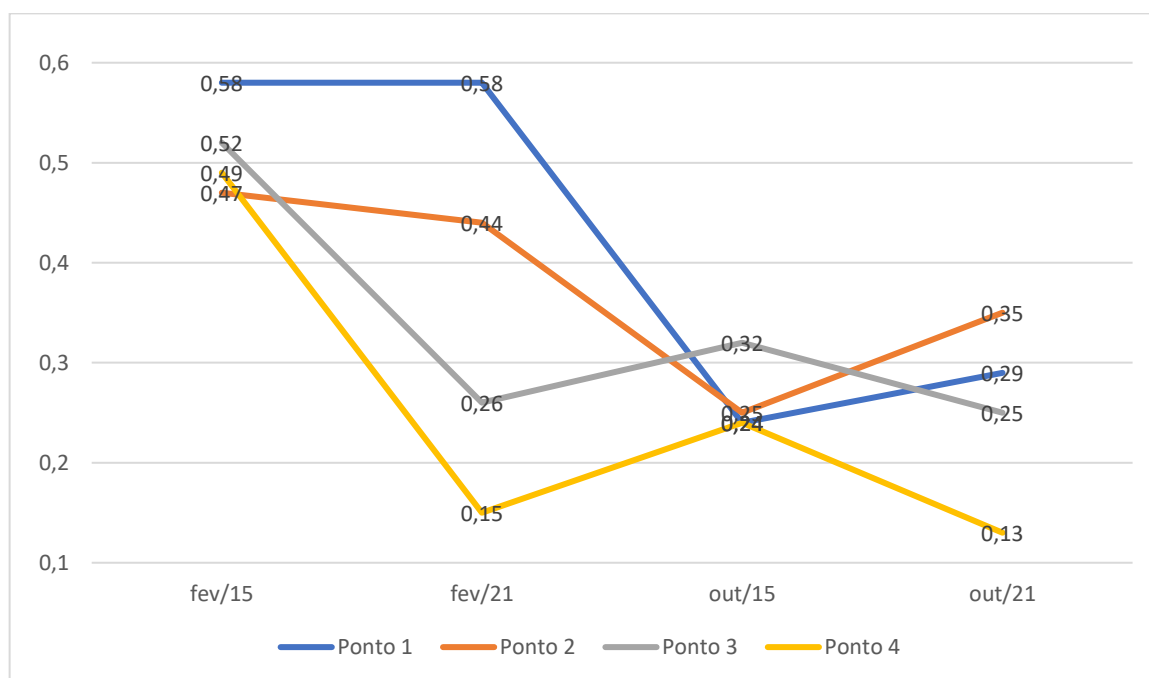
Figura 7 – NDVI da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d) 10/2021.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 8 é representado o NDVI na área da usina, onde há uma redução do índice no período de seca, justificado pelo fato de que o índice é representativo de vegetação e o período é escasso de espécimes vegetais. Há variabilidade de dados significativos apenas na área externa à usina (pontos 1 e 2) enquanto que na área interna (pontos 3 e 4) permanece em uniformidade. A ausência de valores negativos indica ausência de corpos d'água.

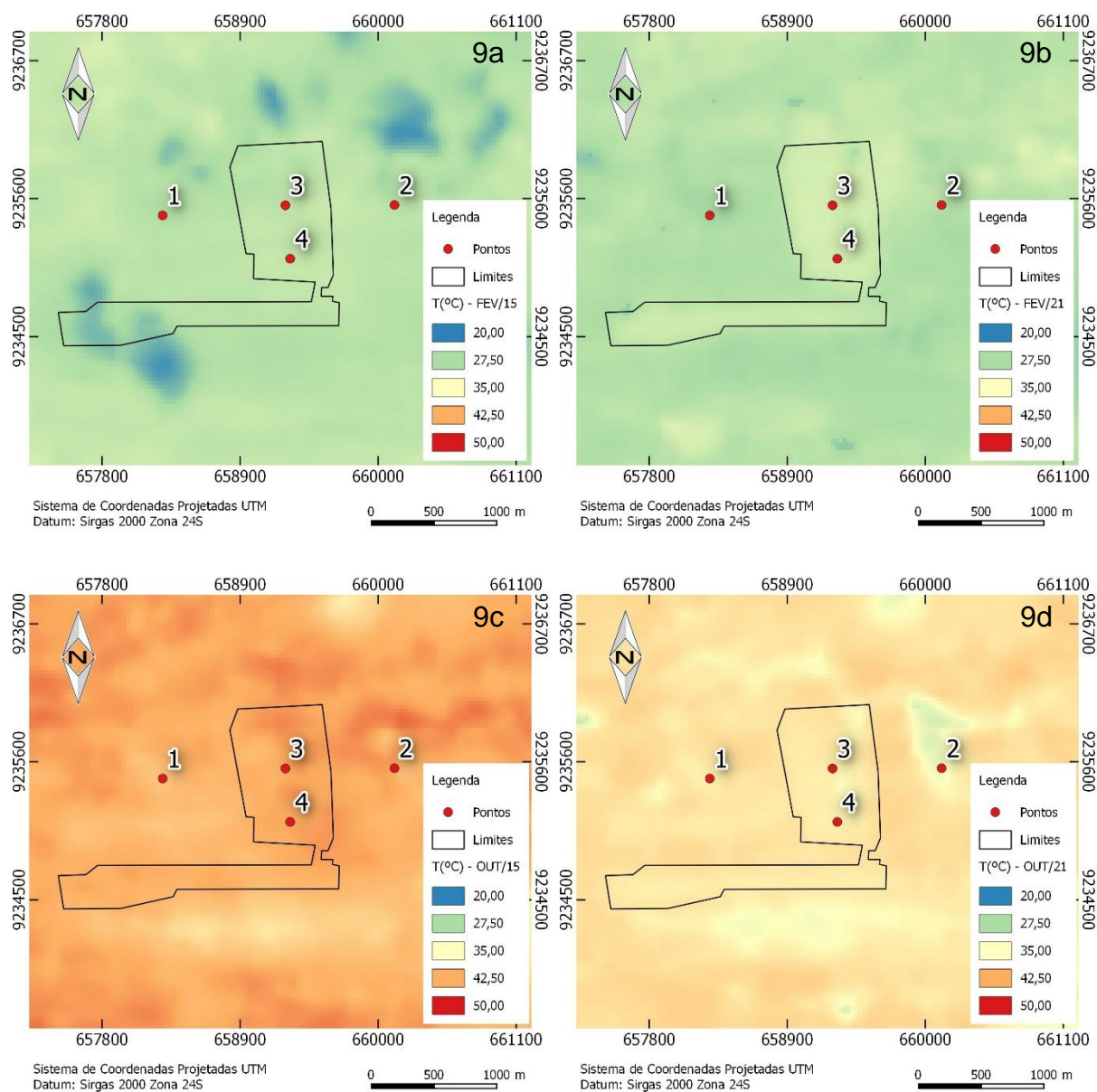
Figura 8 – NDVI da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 9, estão os mapas referentes à Temperatura de Superfície Terrestre (TST), imagens estas do exato momento de passagem do satélite sobre a referida área medida em Kelvin pelo algoritmo Sebal, porém, transformadas em graus Celsius com o auxílio da calculadora raster. A TST, segundo Marques et al (2014), é determinada a partir da radiação de ondas longas e que estima o fluxo de calor que entra e sai de um corpo. Observa-se variação entre 24°C e 46°C de um modo geral, sendo que fevereiro, representativo do período chuvoso, apresentou as temperaturas mais baixas, com atenção para o local da usina, onde se observa aumento de temperatura, apenas na área delimitada pela usina com no máximo 5°C de variação acima das demais áreas. Durante o período de seca, há uniformidade em todo o local, dentro e fora da área da usina, no entanto se observam valores bem altos de temperatura no ano de 2015, visto que este ano foi extremamente seco.

Figura 9 – TST da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.

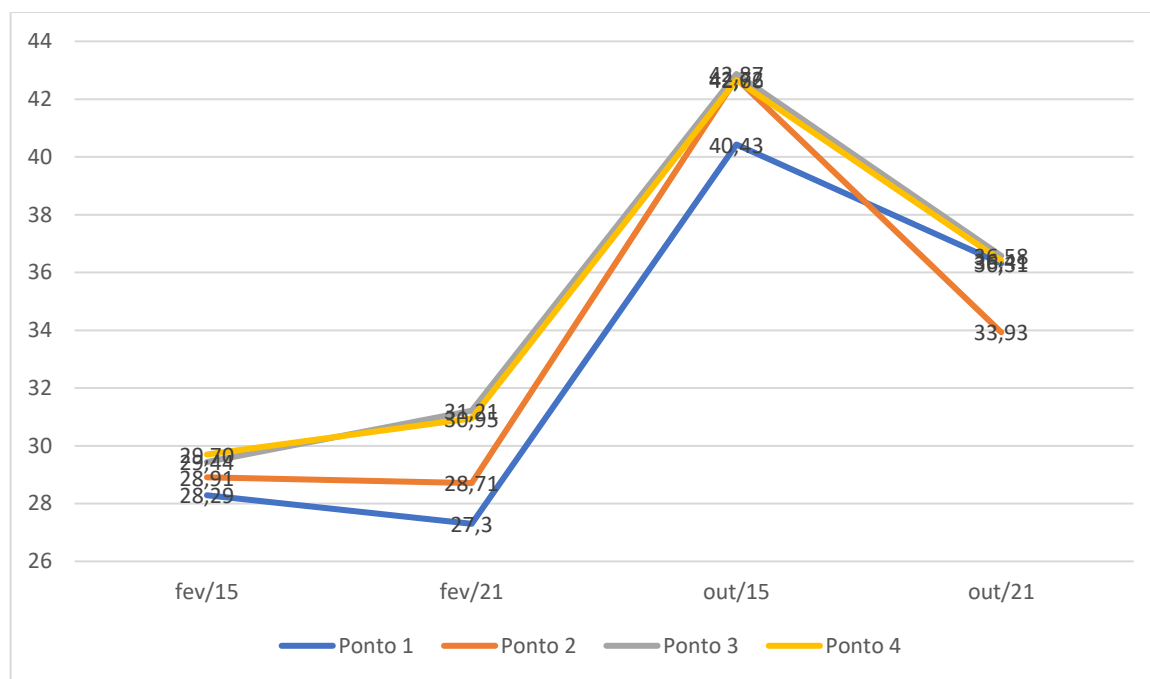


Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 10 pode-se visualizar os valores de temperatura de superfície nos pontos escolhidos. De modo geral houve uniformidade de dados. Há aumento de temperatura no período seco e sobre as placas, como já era esperado. Os pontos 3 e 4, sobre as placas se sobrepõem com precisão e apresentaram valor de TST maior que as áreas adjacentes a usina. A maior diferença foi de quase 4°C (3,9 °C) e ocorreu em fevereiro entre os pontos 3 e 1, enquanto que no mês de outubro a diferença foi

de 2,6°C entre os 3 e 2. No período seco, as placas, para a TST, funcionam como solo exposto, e quase não há diferença de TST entre as áreas.

Figura 10 – TST da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.



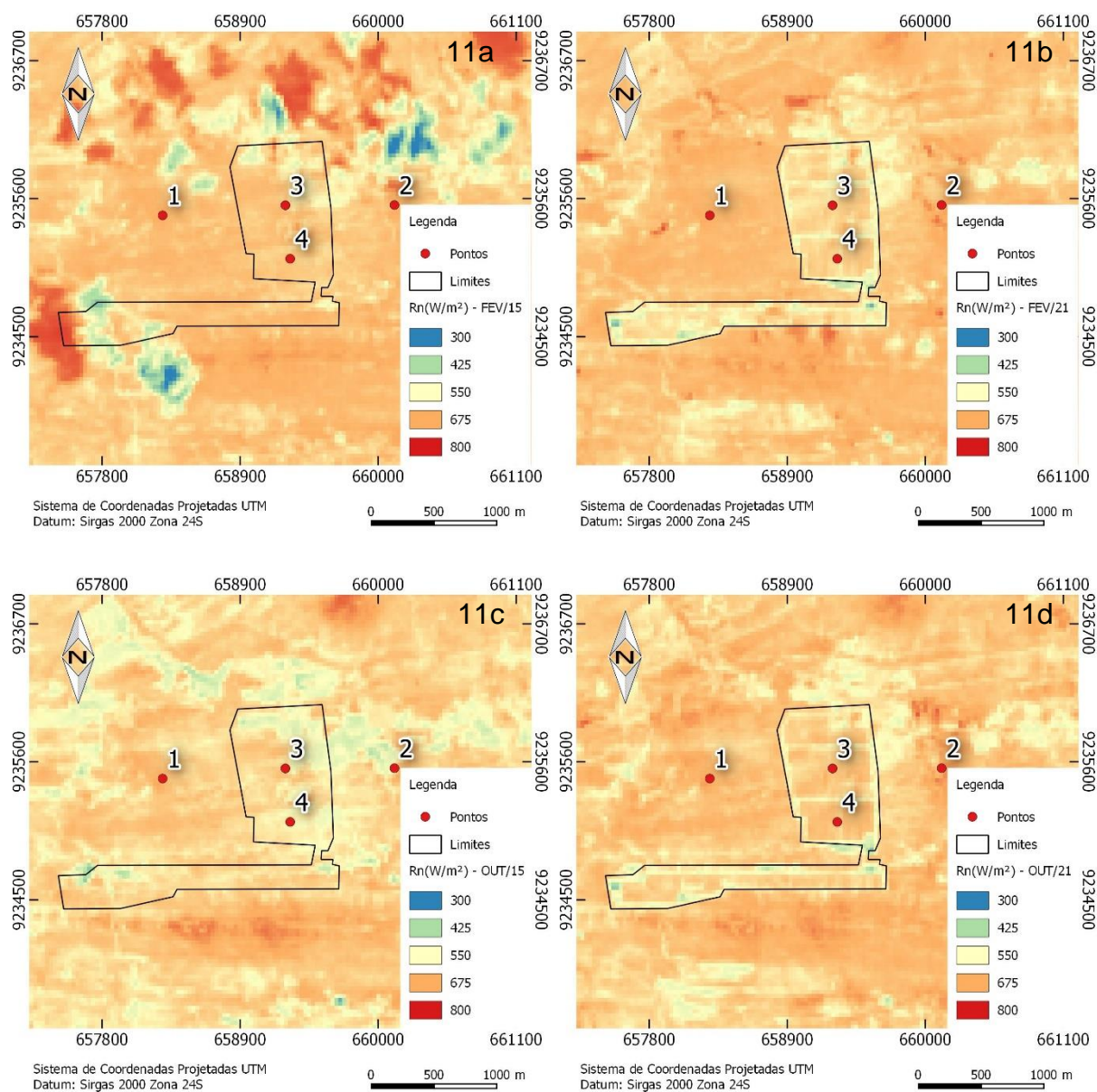
Fonte: Autoria própria (2022).

A Figura 11 representa a etapa final, quando se obtém o saldo de radiação (R_n), que resultou numa variação entre 390 e 750 W/m². Segundo Pessanha (2018), o Saldo de radiação resulta da interação entre o albedo e a temperatura de superfície terrestre. Ao ter um albedo menor, há menor reflexão de radiação e por consequência maior saldo de radiação de ondas curtas, ao passo que baixa temperatura de superfície resulta em saldo de radiação de ondas longas menor.

Os valores mais baixos, em coloração azul, se justificam pela presença de nuvens e os valores mais altos, em coloração avermelhada, se justificam pelas sombras das nuvens, de árvores altas. Isso ocorreu principalmente em fevereiro de 2015.

O saldo de radiação teve uma queda levemente visível dentro da área da usina e valores mais baixos são encontrados nos locais de trânsito entre as construções, devido à ausência de cobertura do solo.

Figura 11 – Saldo de Radiação da Usina Solar Fotovoltaica de Malta nos meses de: a) 02/2015, b) 02/2021, c) 10/2015, d)10/2021.



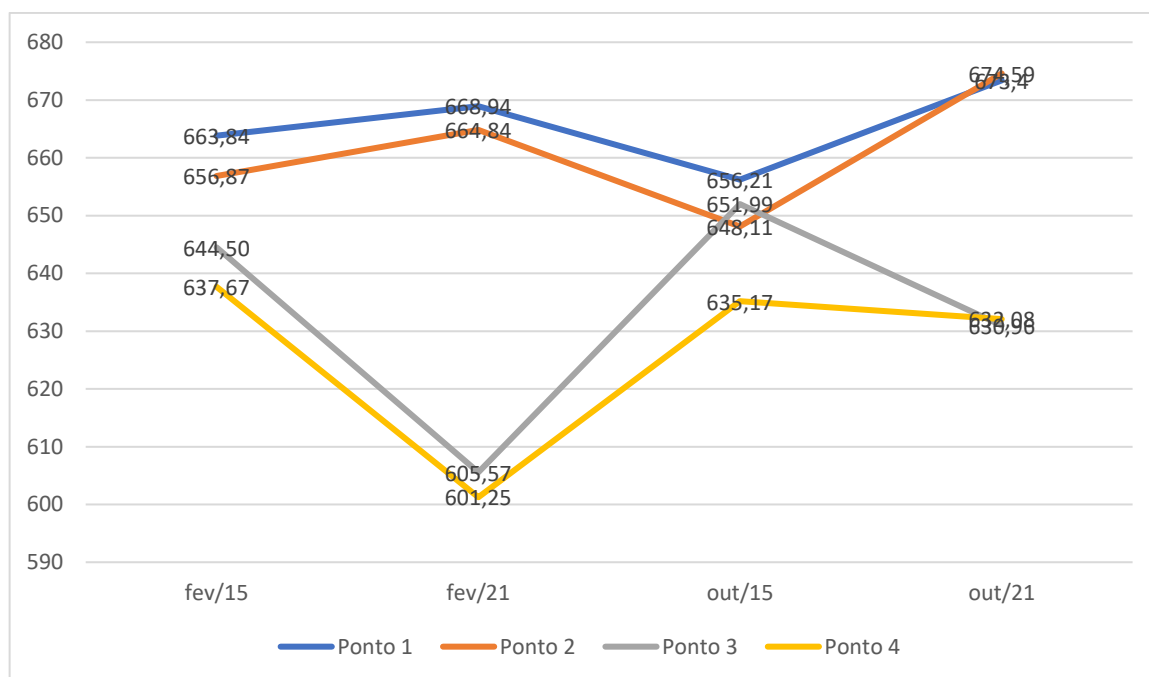
Fonte: Autoria própria (2022).

Analisando a Figura 12, constata-se que há alteração no saldo de radiação, consequência da construção da usina fotovoltaica, visto que nos períodos de fevereiro e outubro de 2021 há uma queda significativa nos valores de Rn na área da usina. Considerando as menores diferenças nos valores de Rn em FEV/2015, que seria entre os pontos 2(fora da usina) e o 3(dentro da usina) a diferença chega a $59,27\text{W/m}^2$, e a

maior diferença, que seria entre os pontos 1 e 4 resulta em 67,69 W/m². Em outubro/21, considerando o ponto 2 e o 4, a diferença ultrapassa 42 W/m².

Portanto, foi observada uma alteração clara nos valores do saldo de radiação resultante, conseqüente da construção da usina fotovoltaica visto que nos períodos de fevereiro e outubro de 2021 há uma queda significativa nos valores de Rn na área das placas.

Figura 12 – Saldo de Radiação da Usina Solar Fotovoltaica de Malta.



Fonte: Autoria própria (2022).

6 CONCLUSÃO

Foram obtidos com auxílio das imagens de satélite os mapas com Albedo, NDVI e TST e Balanço de Radiação dos meses de fevereiro (estação chuvosa) e outubro (estação seca) dos anos de 2015 e 2021, representando um período anterior a construção da usina fotovoltaica e o ano mais recente, respectivamente, sem que houvesse muita interferência de nuvens.

A análise do albedo identificou que houve um aumento significativo na área ocupada pela usina nos meses de fevereiro e outubro.

Os mapas de NDVI identificam com precisão a área da usina, já que o material das placas é totalmente diferente da superfície natural, que mesmo no período seco pode apresentar alguma vegetação ou umidade no solo.

O índice TST apresentou pouca variação entre os pontos analisados no mês de outubro, o que se conclui que no período seco as placas, para a TST, funcionam como solo exposto, e quase não há diferença de TST entre as áreas. Mas, na estação chuvosa a diferença de TST foi significativa, sendo mais quente na usina.

O saldo de radiação apresentou uma queda significativa nos valores de R_n na área da usina em relação a região do entorno.

A substituição de vegetação natural pelas placas de energia solar fotovoltaicas causou modificações no microclima local, afetando assim a temperatura e o albedo, o que resultou em uma redução de energia disponível para processos biofísicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELINI, Lucas Peres et al. Parametrização do albedo e correção da temperatura da superfície no balanço de energia por imagens Landsat 8 na transição Cerrado-Pantanal. 2018.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. **A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates**, v. 271, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v.229, p.87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M., MENENTI, M., FEDDES, R.A., HOLSLAG, A. A. M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) – Formulation. **Journal of Hydrology**, v.212-213, p.198-212, 1998a.

BASTIAANSSEN, W. G. M., PELGRUM, H., WANG, J., MA, Y., MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – Validation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229, 1998b.

BERBET, Meire LC; COSTA, Marcos Heil. Climate change after tropical deforestation: seasonal variability of surface albedo and its effects on precipitation change. **Journal of Climate**, v. 16, n. 12, p. 2099-2104, 2003.

BEZERRA, F. D. Energia solar. Caderno Setorial ETENE, Ano 6, nº 174, julho de 2021. Banco do Nordeste do Brasil, 2021. Disponível em: https://198.17.121.65/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf. Acesso em 15 mar. 2022.

BRANDÃO, Ziany Neiva; BEZERRA, Marcus Vinícius Cândido; SILVA, BB da. Uso do NDVI para determinação da biomassa na chapada do Araripe. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 13, p. 75-81, 2007.

CORDEIRO, Ana Paula Assumpção et al. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. *Ciência Florestal*, v. 27, p. 883-896, 2017.

COSTA, Jéfferson de Oliveira et al. Spatial variability of coffee plant water consumption based on the SEBAL algorithm. ***Scientia Agricola***, v. 76, p. 93-101, 2019.

CUNHA, Mauro Rezende; CONCOLATO, Caíque de Oliveira Fernandes; MELLO, José André Villas Boas. POTENCIALIDADES REGIONAIS PARA A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA BAIXADA FLUMINENSE, RIO DE JANEIRO. ***Revista Baru-Revista Brasileira de Assuntos Regionais e Urbanos***, v. 5, n. 2, p. 312-325, 2019.

DA SILVA, Bernardo B.; BRAGA, Alexandra C.; BRAGA, Célia C.; DE OLIVEIRA, Leidjane M. M.; MONTENEGRO, Suzana M. G. L.; JUNIOR, Bernardo Barbosa. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, n. 1, p. 3-8, 2016. DOI: DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>

DA SILVA, Glauciene Justino Ferreira; SEVERO, Thiago Emmanuel Araújo. Potencial/Aproveitamento de Energia Solar e Eólica no Semiárido Nordeste: Um Estudo de Caso em Juazeiro–BA nos Anos de 2000 a 2009 (Potencial/Usage of Wind and Solar Energy in the Northeastern Semiarid: A Study in Juazeiro-BA Between 2000 and 2009). ***Revista Brasileira de Geografia Física***, v. 5, n. 3, p. 586-599, 2012.

DE ALMEIDA, Hermes Alves; DE ALMEIDA, Ednaldo de Ceita Vicente. Potencial da energia solar fotovoltaica no Semiárido nordestino. ***Concilium***, v. 22, n. 2, p. 197-210, 2022.

FAGUNDES, Lucas Augusto et al. Análise das componentes da equação do balanço de radiação utilizando o modelo Sebal no sul do Brasil. 2019.

FERREIRA, Artur Gonçalves. **Meteorologia prática**. Oficina de Textos, 2006.

HUETE, A. R. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v.25, n.3, p. 295-309, 1988.

LACERDA, Francinete Francis et al. O Projeto Ecolume: O paradigma da abundância na convivência com o clima semiárido no Nordeste brasileiro. 2020.

MACHADO, Carolina T.; MIRANDA, Fabio S. Energia Solar Fotovoltaica: uma breve revisão. **Revista virtual de química**, v. 7, n. 1, p. 126-143, 2015.

MARQUES, Fábio Marcelo Ferreira et al. Estimativa da temperatura superficial e do saldo de radiação por meio do método sebal no entorno da fábrica de alumina da região de barcarena utilizando imagens do satélite landsat. 2014.

MEIRELES, M. Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 - TM na bacia do Acaraú – CE. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 89p, 2007.

OLIVEIRA, Tiago Henrique de et al. Índice de umidade (NDWI) e análise espaço-temporal do albedo da superfície da bacia hidrográfica do rio Moxotó-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 3, n. 2, p. 55-69, 2010.

PEREIRA, E. B.; MARTINS F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R.S.; DE LIMA, F. J. L.; RÜTHER R.; DE ABREU S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. 2017. Atlas Brasileiro de Energia Solar. 2nd ed. São José dos Campos: INPE.

PESSANHA, M. dos S. et al. Saldo de radiação estimado pelo algoritmo SEBAL em área urbana, Santa Cruz, RJ. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 20., 2018, Maceió. Desafios do monitoramento meteorológico: anais. Maceió: UFAL, 2018. p. 3775-3786., 2018.

Renewable Energy. bp statistical Review of World Energy June 2020. Disponível em: <<http://www.bp.com>>. Acesso em: 15 fev. 2022.

RODRIGUES, Daniel Victor Brito; SILVA, Fernanda Antonella Rojas. Estimativa do saldo de radiação, albedo, temperatura de superfície e NDVI em diferentes usos de solo no município de campo verde/MT. **XIX Encontro Nacional de Geógrafos**, 2018.

ROY, David P. et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. **Remote sensing of Environment**, v. 145, p. 154-172, 2014.

SILVA, Douglas Alberto de Oliveira et al. Impacto da alteração do uso do solo usando dados orbitais no baixo São Francisco. **Revista Ambientale**, v. 10, n. 3, p. 71-85, 2018.

SILVA, H.D.B. Estudo do Índice de Vegetação no Município de Floresta - PE, utilizando técnicas de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto. Universidade Federal de Rural de Pernambuco – UFRPE. Recife-PE, 2009.

SILVA, L. et al. Análise do albedo e do índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) em uma bacia hidrográfica, usando o SEBAL-Surface Energy Balance Algorithm for Land. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 2009.

VELOSO, Gabriel Alves et al. Determinação do albedo de superfície em áreas irrigadas do projeto Jaíba (Minas Gerais), mediante imagens landsat 5-TM. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 35, p. 126-146, 2016.

VELOSO, Gabriel Alves; DA SILVA, Lucas Augusto Pereira; FERREIRA, Manuel Eduardo. Análise do balanço de radiação e energia em áreas de veredas no norte de Minas Gerais, bioma Cerrado. **Cerrados**, v. 18, n. 1, p. 220-247, 2020.

WOLFF, W. 2016. Script to calculate daily evapotranspiration for Landsat 8 images in GRASS GIS. Disponível em: <http://doi.org/10.5281/zenodo.167350> [acessado em 3 de março de 2022]