

Modelagem dos componentes da produtividade de água no bioma Cerrado usando técnicas de sensoriamento remoto

Antônio Heriberto de Castro Teixeira ¹; Janice Freitas Leivas ²; Celina Maki Takemura ²; Inajá Francisco de Sousa ¹; André Quintão de Almeida ¹

¹Professor. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, Sergipe; ²Pesquisadora. Embrapa Territorial. Campinas, São Paulo

RESUMO

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) e o modelo da eficiência do uso da radiação (EUR) foram testados em conjunto para estimativa em larga escala dos componentes da produtividade da água no bioma Cerrado (CE). O produto reflectância MODIS MOD13Q1 foi usado com grades de dados climáticos do ano de 2016 para demonstrar o potencial do monitoramento da dinâmica da evapotranspiração atual (ET), da produção de biomassa e da produtividade de água baseada na ET (PA = BIO/ET), com uso dessas ferramentas ao longo do ano, considerando as condições do bioma inserido nas regiões brasileiras Norte - N (CE_N), Nordeste - NE (CE_NE), Centro Oeste - CO (CE_CO), Sudeste - SE (CE_SE) e Sul - S (CE_S). Significantes variações espaciais e temporais nas taxas desses componentes foram verificadas devidas às variações na umidade na zona das raízes das plantas, representada pela fração evapotranspirativa (ET_f) e nas taxas da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}). As mais fortes diferenças na PA foram detectadas entre as regiões CE_S e CE_NE com valor anual de 3,9 e 2,7 kg m⁻³, respectivamente. A modelagem em larga escala mostrou viabilidade para a estimativa dos componentes da produtividade da água, com grande potencial para suporte às políticas públicas ao manejo e conservação dos recursos naturais.

PALAVRAS-CHAVE: evapotranspiração; produção de biomassa; fração evapotranspirativa; radiação fotossinteticamente ativa;

INTRODUÇÃO

Em várias partes do bioma Cerrado, as demandas hídricas e as populações estão crescendo sob condição insustentáveis de consumo dos recursos naturais. Os consequentes impactos tem sido geralmente medidos em escalas locais, entretanto, com o contínuo desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas, estes podem ser atualmente analisados através da modelagem dos componentes da produtividade da água em largas escalas com precisões aceitáveis. Com os cenários de mudanças climáticas e de uso da terra, essas técnicas têm potencial para o monitoramento dessas mudanças quando se almeja o desenvolvimento sustentável (Jardim et al., 2022; Teixeira et al. 2020a, b; 2021a, b).

As mudanças climáticas de uso da terra afetam os balanços de energia, água e carbono (Ceschia et al., 2010; Zhao e Running, 2010). A compreensão das respostas dos parâmetros hídricos e de vegetação, bem como das suas dinâmicas, é indispensável para acesso a esses balanços (Yang et al., 2016; Zhang e Zhang, 2019). O bioma Cerrado tem uma larga diversidade de espécies naturais (Lewinsohn e Prado, 2005), mas sofrem de vários impactos ambientais, tais com desflorestamento, queimadas, poluição do ar, da água e do solo, bem como intensiva substituição das espécies naturais por culturas agrícolas (Arantes et al., 2016; Azevedo et al., 2020; Cabral et al., 2015; Fernandes et al., 2018; Giambelluca et al., 2009; Sano et al., 2019; Santos et al., 2021). Esses impactos demandam estudos em larga escala para o consumo sustentável dos recursos naturais (Araujo et al., 2019; Jardim et al., 2022; Nuñez et al., 2017; Santos et al., 2020; Teixeira et al. 2021a, b).

A quantificação dos componentes da produtividade da água usando sensoriamento remoto e grades de dados climáticos nos agroecossistemas do bioma Cerrado, é um meio viável para suporte ao manejo racional dos seus recursos naturais. Dentre esses componentes destaca-se a

evapotranspiração atual (ET), pois representa o principal uso dos recursos hídricos pela vegetação bem suprida de água e, em adição, está relacionada com a produção de biomassa (BIO) (Teixeira et al. 2020a, b). Por um lado, embora com esta relação, o aumento da ET implica em menor disponibilidade hídrica para usos ecológicos e humanos. Por outro lado, a substituição da vegetação natural por culturas agrícolas pode afetar a BIO (Ceschia et al., 2010). A quantificação desses parâmetros é essencial para restaurações ecológicas e acesso à dimensão dos impactos ambientais (Yang et al., 2016; Zhang e Zhang, 2019).

Algumas medições dos componentes da produtividade da água em campo já foram realizadas por diferentes métodos no bioma Cerrado (Cabral et al., 2015; Fernandes et al., 2018; Giambelluca et al., 2009). Entretanto, poucos esforços foram realizados para utilização de indicadores ambientais em larga escala nesse bioma. Em adição, medições pontuais não são viáveis para essa finalidade, devido às largas variações nas condições climáticas nos diferentes agroecossistemas do bioma. Devido a essas limitações, a extrapolação desses indicadores através de geotecnologias é uma alternativa viável para suporte às políticas públicas relacionadas ao uso dos recursos naturais.

Considerando a sua operacionalidade, o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido usando medições simultâneas em campo e por sensoriamento remoto em culturas agrícolas irrigadas e vegetação natural sob fortes contrastes termo hídricos no Nordeste do Brasil, para a determinação dos componentes da ET (Teixeira, 2010, Teixeira et al., 2008). O SAFER também vem sendo usado em conjunto com o modelo da eficiência do uso da radiação - EUR (Monteith, 1977) para estimativa da BIO (Teixeira et al 2020a, b; 2021b).

OBJETIVOS

Objetivando a implementação de um sistema operacional no bioma Cerrado, com uso de dados históricos, testamos a última versão do algoritmo SAFER em conjunto com o modelo EUR, para o monitoramento dos componentes da produtividade da água. Foi usado o produto reflectância MODIS MOD13Q1 na escala temporal de 16 dias e dados climáticos nessa escala no ano de 2016. Isto foi feito para demonstrar a viabilidade de aplicação do algoritmo para monitoramento da dinâmica desses componentes no bioma. Esse monitoramento é útil para subsídio às políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos naturais. As razões para uso de dados de 2016 foram duas: o bioma Cerrado estava recuperando os bons níveis de umidade na zona das raízes, após uma seca prolongada de 2012 a 2015 (Mariano et al., 2018; Rebello et al., 2020), e a disponibilidade de dados climáticos cobrindo todo o bioma ao longo desse ano. Embora a modelagem dos indicadores tenha sido realizada para apenas um ano, séries históricas de dados climáticos e imagens de satélites podem ser usadas nesse monitoramento para períodos específicos de qualquer ano.

MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 1 apresenta a localização do bioma Cerrado em cada região geográfica do Brasil, altitudes e as 133 estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) utilizadas.

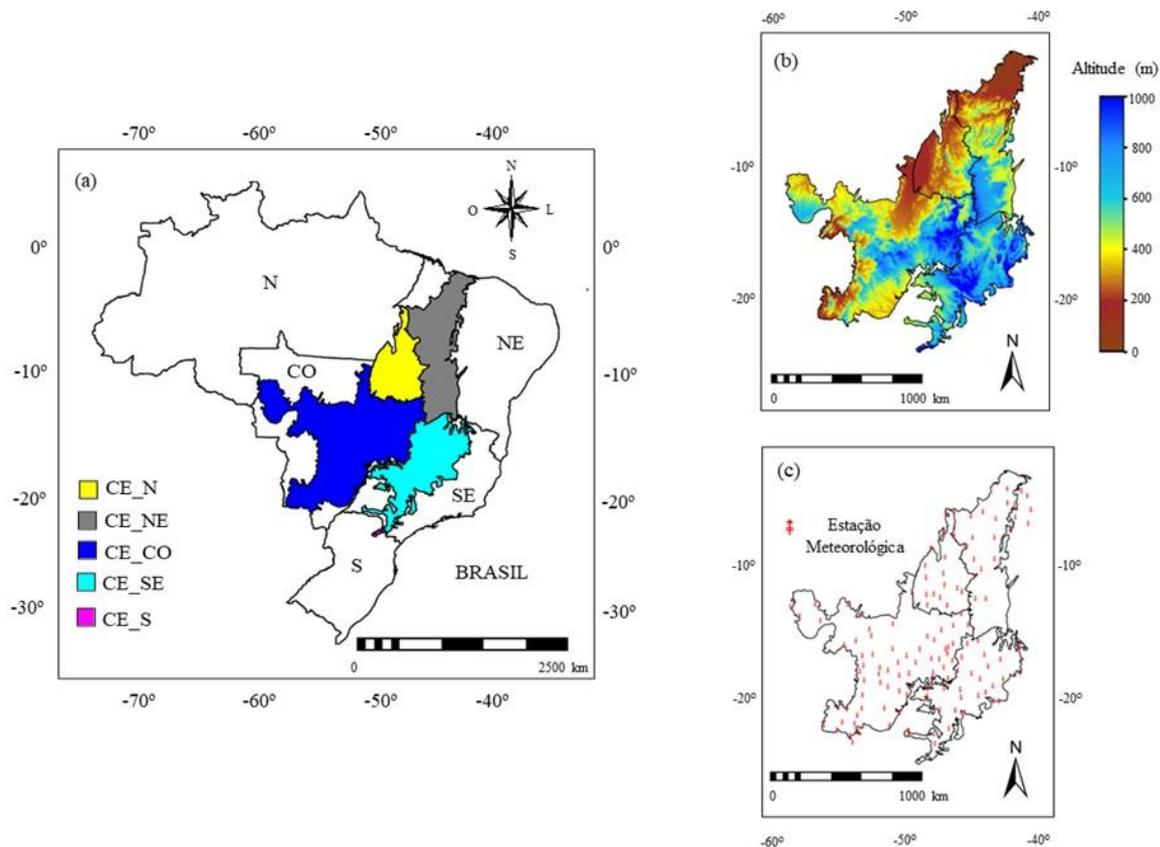


Figura 1. Localização do bioma Cerrado (CE) no Brasil. (a) Limites nas regiões geográficas Norte (N), Nordeste (NE), Centro Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S); (b) Distribuição espacial das altitudes; (c) Distribuição espacial das 133 estações meteorológicas utilizadas.

O bioma Cerrado enfrenta períodos de estiagens frequentes e suas espécies naturais desenvolvem resiliência com o aumento da aridez nessas condições mais secas (Almagro et al., 2017; Azevedo et al., 2020; Sano et al., 2019).

Os dados climáticos foram interpolados pelo método "movimento da média" e usados no cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998).

As grades dos dados climáticos foram usadas com as reflectâncias das bandas 1 e 2 do produto MODIS MOD13Q1 na resolução espacial de 250 m e temporal de 16 dias (Teixeira et al., 2020b).

O algoritmo SAFER (Simple Algorithm for Evapotranspiration) e modelo EUR (Eficiência do Uso da Radiação), aplicados em conjunto na corrente pesquisa, são descritos com detalhes em Teixeira et al (2020a, b).

Para determinação da evapotranspiração atual (ET) com o SAFER modela-se a razão dessa evapotranspiração para a de referência (ET_0), ou seja, a fração evapotranspirativa (ET_f), com parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e climáticos.

Para o EUR, a produção de biomassa (BIO) é modelada em função da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) e da ET_f . Então a produtividade da água foi considerada como a razão da BIO sobre a ET (Teixeira et al., 2020b).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

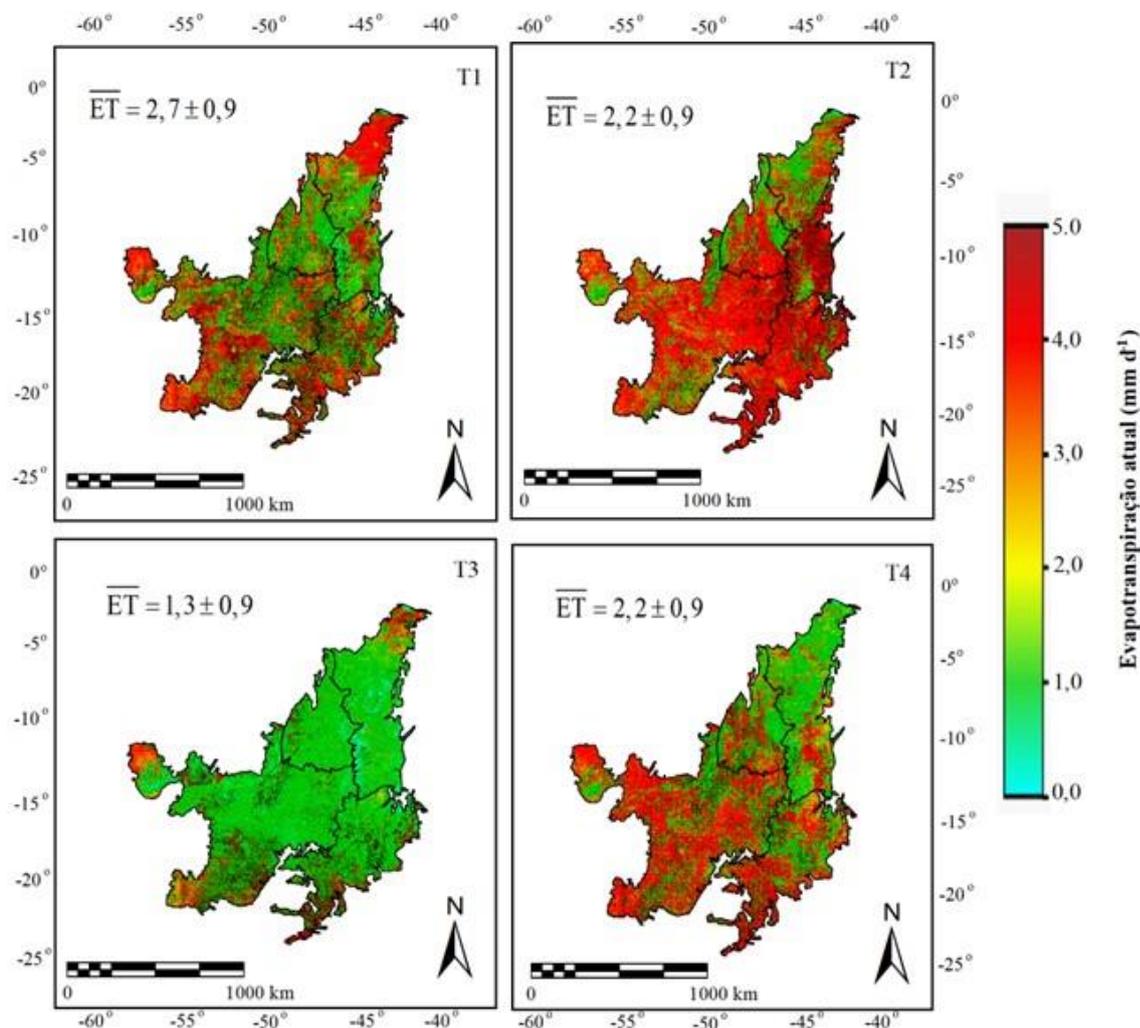


Figura 2. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em ET significam médias para todo o bioma.

Trimestres (T): T1 - janeiro a março; T2 - abril a junho; T3 - julho a setembro; e T4 - outubro a dezembro.

As variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da ET entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são fortemente detectadas. As menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de $1,5 \text{ mm d}^{-1}$, e as maiores em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de $2,5 \text{ mm d}^{-1}$. Na escala anual o valor médio de ET foi de $2,1 \pm 0,9 \text{ mm d}^{-1}$.

Com medições em campo de balanço de energia no Cerrado, Giambelluca et al. (2009) reportaram valores médios da ET de $1,9$ a $2,3 \text{ mm d}^{-1}$, variando de acordo com a densidade das plantas, enquanto com medições por sensoriamento remoto com imagens Landsat também nesse bioma, Laipelt et al. (2020) encontraram valores médios entre $2,0$ e $3,2 \text{ mm d}^{-1}$ em ecossistemas de grama e pastagem. Os resultados desses estudos prévios envolvem as taxas de ET apresentadas na Figura 2.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da ET ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 68% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 34% da média dos pixels nesse trimestre.

A Tabela 1 apresenta os valores trimestrais e anuais a evapotranspiração atual (ET) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre¹/ Bioma_Região²	T1 (mm d⁻¹)	T2 (mm d⁻¹)	T3 (mm d⁻¹)	T4 (mm d⁻¹)	Ano (mm ano⁻¹)
CE_N	2,4 ± 0,9	1,9 ± 0,8	1,1 ± 0,7	2,0 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_NE	2,5 ± 1,1	2,1 ± 1,0	1,2 ± 0,8	1,7 ± 0,8	1,9 ± 0,7
CE_CO	2,7 ± 0,8	2,2 ± 0,9	1,4 ± 0,9	2,4 ± 0,9	2,2 ± 0,7
CE_SE	3,0 ± 0,9	2,2 ± 0,9	1,5 ± 1,0	2,3 ± 0,8	2,3 ± 0,7
CE_S	3,0 ± 0,6	2,5 ± 0,8	3,3 ± 0,9	3,0 ± 0,9	2,9 ± 0,6

¹Trimestres (T): T1 - janeiro a março, T2 - abril a junho, T3 - julho a setembro, T4 - outubro a dezembro.

²Bioma_Região: CE_N - Cerrado na região Norte, CE_NE - Cerrado na região Nordeste, CE_CO - Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE - Cerrado na região Sudeste, CE_S - Cerrado na região Sul.

Para a região do Cerrado dentro da região Norte (CE_N), os maiores valores da ET foram detectados em T1 (janeiro a março), com valor diário médio no trimestre acima de 2,0 mm d⁻¹, enquanto as menores taxas foram em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual a ET em CE_N apresentou um total médio de 695 mm ano⁻¹. De acordo com os valores médios e desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais ocorreram em T3, quando DP representou 63% da média, enquanto as menores ocorreram em T1, com esse percentual de 36%.

A região CE_NE se destaca pelos menores valores de ET. Similarmente a CE_N, os maiores valores da ET foram em T1 (janeiro a março), com valor diário no trimestre em torno de 2,5 mm d⁻¹ e as menores taxas em T3 (julho a setembro), também com média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Na escala anual a ET em CE_NE apresentou o mesmo total médio de 695 mm ano⁻¹ como para CE_N. As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 66% da média dos pixels e as menores em T1 (43%).

No Cerrado dentro da região Centro Oeste (CE_CO), os valores máximos também ocorreram em T1 (janeiro a março), mas com média acima de 2,5 mm d⁻¹ e mínimos em T3 (julho a setembro), com essa média abaixo de 1,5 mm d⁻¹. Entretanto para essa região o total médio anual foi de 805 mm ano⁻¹. As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 68% da média dos pixels e as menores em T1 (30%).

A região CE_SE seguiu os padrões das anteriores com valores máximos da ET, em torno de 3,0 mm d⁻¹ de janeiro a março (T1) e mínimos, com valores em torno de 1,5 mm d⁻¹ de julho a setembro (T3), mas com um total anual médio de 842 mm ano⁻¹. As maiores variações espaciais também foram em T3, com DP representando 63% da média dos pixels e as menores em T1 (30%).

As maiores taxas da ET no bioma Cerrado foram dentro da região Sul (CE_S), quando de julho a setembro (T3) o valor médio diário ultrapassou 3,0 mm d⁻¹, enquanto as menores ocorreram em T2 (abril a junho), com a média diária ficando em torno de 2,5 mm d⁻¹. As elevadas taxas diárias produziram o maior total anual de 1061 mm ano⁻¹. As maiores variações espaciais aconteceram em

T2 (abril a junho), com DP representando 31% da média dos pixels e as menores foram em T1 (janeiro a março) com esse percentual de 20%.

Considerando todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, as maiores taxas da ET ocorreram de janeiro a março (T1) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de julho a setembro (T3) na região Sul (CE_S). Com relação às menores taxas da ET, estas foram de julho a setembro (T3) para as regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE) e de abril a junho (T2) em CE_S.

A Figura 3 mostra as distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da produção de biomassa (BIO) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016.

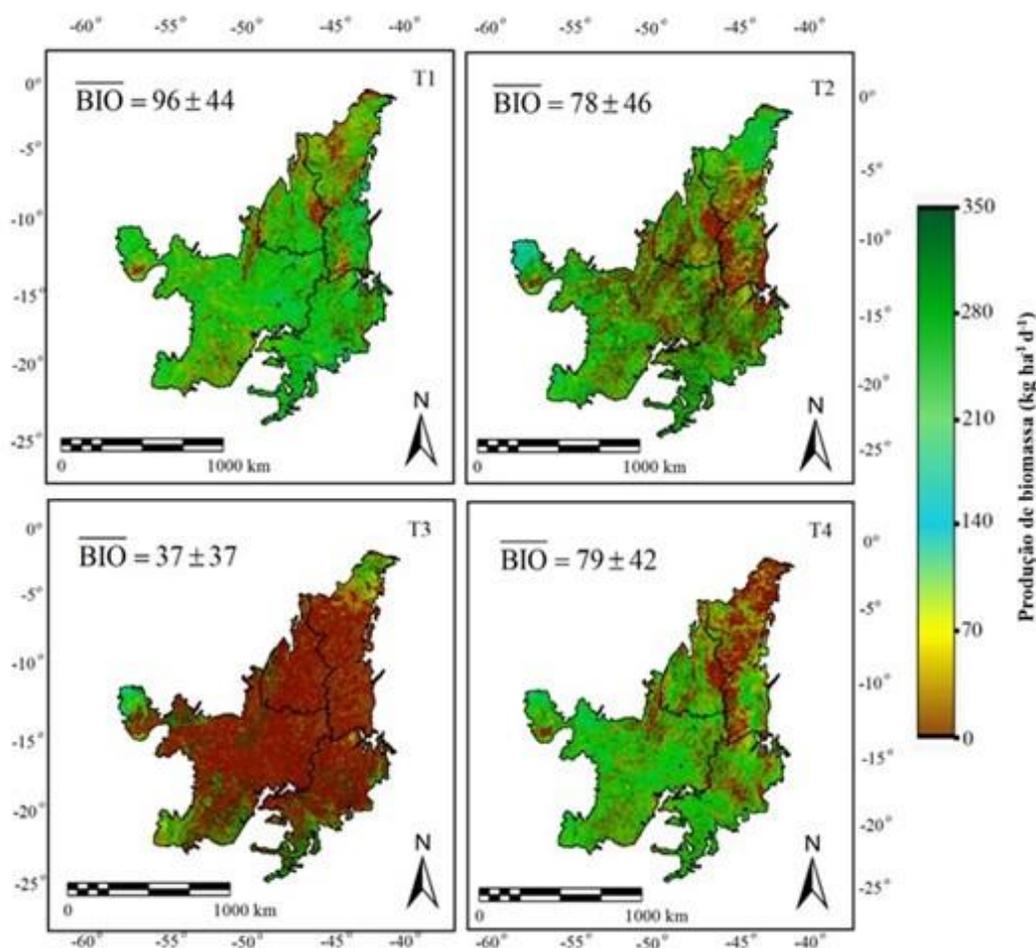


Figura 3. Distribuições espaciais dos valores trimestrais (T) da produção de biomassa (BIO) no bioma Cerrado com as médias e os desvios padrões (DP) para o ano de 2016. As barras em BIO significam médias para todo o bioma.

Trimestres (T): T1 - janeiro a março; T2 - abril a junho; T3 - julho a setembro; e T4 - outubro a dezembro.

Como para ET, variações espaciais e temporais nos valores dos pixels da BIO entre os trimestres e as regiões em que o bioma Cerrado está inserido são também fortemente detectadas. Os menores valores foram em T3 (julho a setembro), com média diária trimestral abaixo de 40 kg ha⁻¹ d⁻¹, e os maiores

em T1 (janeiro a março), quando essa média foi acima de $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$. Na escala anual o valor médio da BIO foi de $72 \pm 34 \text{ mm d}^{-1}$.

De acordo com os valores de desvios padrões (DP), as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro), quando DP representou 100% da média dos pixels nesse trimestre, enquanto as menores foram em T1 (janeiro a março) quando DP foi 46% da média dos pixels nesse trimestre.

Os valores da BIO apresentados na Figura 3 estão de acordo com Arantes et al. (2016), que, usando o produto MODIS MOD13Q1 Enhanced Vegetation Index, reportaram que o máximo de desenvolvimento da vegetação do bioma Cerrado ocorre de janeiro a março, caindo para a metade de agosto a setembro. O decréscimo da BIO em T3 (julho a setembro) no estudo corrente, também corrobora com Santos et al. (2021), que, também usando produtos MODIS, constataram um declínio nos valores da BIO nas espécies desse bioma, após redução das chuvas.

A Tabela 2 apresenta os valores trimestrais e anuais a produção de biomassa (BIO) e desvios padrões, para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Tabela 2. Valores trimestrais e anuais a produção de biomassa (BIO) e desvios padrões para o bioma Cerrado dentro de cada região geográfica brasileira, durante o ano de 2016.

Trimestre/ Bioma_Região ²	T1 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	T2 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	T3 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	T4 ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)	Ano ($\text{kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$)
CE_N	74 ± 40	58 ± 37	25 ± 26	60 ± 36	54 ± 30
CE_NE	76 ± 49	63 ± 44	26 ± 28	47 ± 34	53 ± 27
CE_CO	86 ± 40	74 ± 46	35 ± 38	80 ± 42	69 ± 33
CE_SE	96 ± 46	71 ± 46	38 ± 42	74 ± 41	70 ± 37
CE_S	116 ± 37	105 ± 37	130 ± 59	111 ± 48	115 ± 40

¹Trimestres (T): T1 - janeiro a março, T2 - abril a junho, T3 - julho a setembro, T4 - outubro a dezembro.

²Bioma_Região: CE_N - Cerrado na região Norte, CE_NE - Cerrado na região Nordeste, CE_CO - Cerrado na região Centro Oeste, CE_SE - Cerrado na região Sudeste, CE_S - Cerrado na região Sul.

Pela Tabela 2 percebem-se os menores valores da BIO nos ecossistemas do Cerrado inseridos nas regiões Norte e Nordeste enquanto os maiores aconteceram nas regiões Sul e Sudeste.

Para consideração do efeito da umidade na zona das raízes e da radiação solar incidente na BIO ao longo do ano, a Figura 4 mostra a dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_f), razão da ET para a ET_0 , e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado inserido em cada região geográfica, durante o ano de 2016.

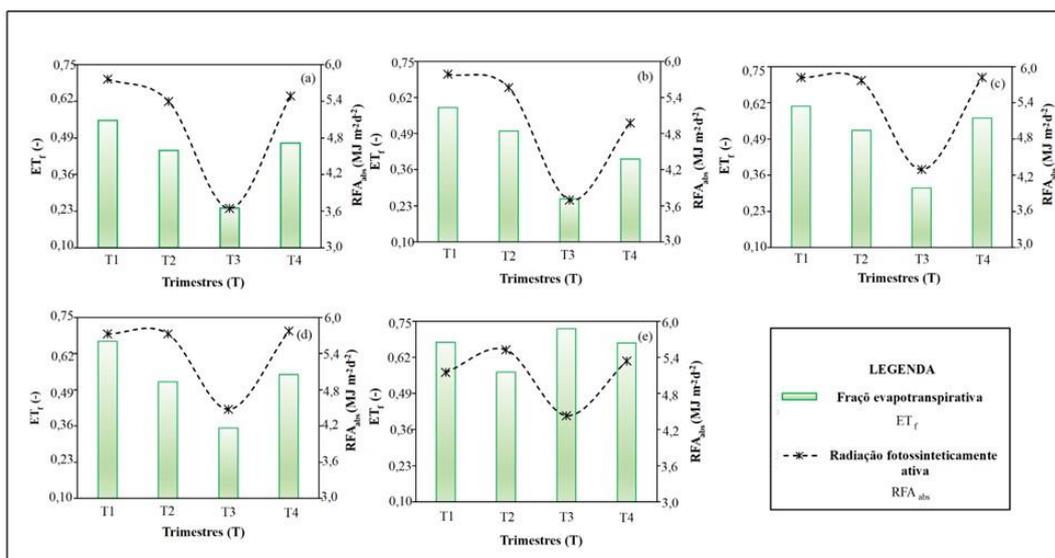


Figura 4. Dinâmica dos valores médios trimestrais da fração evapotranspirativa (ET_f) e da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RAF_{abs}), juntamente com seus desvios padrões (DP) para o bioma Cerrado, durante o ano de 2016.

Bioma Cerrado dentro das regiões geográficas brasileira: (a) Norte - CE_N, (b) Nordeste - CE_NE, (c) Centro Oeste - CE_CO, (d) Sudeste - SE, (e) Sul - S.

Os valores médios da ET_f ficaram entre 0,24 em CE_N e CE_NE de julho a setembro (T3) e 0,72 em CE_S também em T3. As respectivas médias anuais foram de 0,43 e 0,66. Os valores médios da RAF_{abs} estiveram entre 3,6 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ em CE_N de julho a setembro (T3) e 5,8 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ em CE_CO de janeiro a março (T1). Entretanto as médias anuais foram entre 5,0 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ em CE_NE e 5,4 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ tanto para CE_CO como para CE_SE.

De acordo com Zhou e Zhou (2009), as variáveis climáticas que mais afetam ET_f são a temperatura do ar, a umidade do ar e a energia disponível. Entretanto seus valores dependem também da abertura dos estômatos e da adaptação das espécies à escassez hídrica (Mata-González et al., 2005), o que é mais notável nos ecossistemas do bioma Cerrado (Almagro et al., 2017; Azevedo et al., 2020; Sano et al., 2019).

Pela Tabela 2, para CE_N, os valores máximos da BIO ocorreram em T1 (janeiro a março), quando a média trimestral foi acima de 70 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$, devido aos seus maiores valores de ET_f e RAF_{abs} (médias de 0,55 e 5,8 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, Figura 4a). As taxas mínimas da BIO foram em T3 (julho a setembro), quando a média trimestral foi em torno de 25 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$, sob os menores valores de ET_f e RAF_{abs} (médias de 0,24 e 3,6 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$, Figura 4a). Considerando a escala anual BIO foi 20 $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$.

Na região CE_NE, os valores médios trimestrais da BIO mais elevados (Tabela 2), acima de 75 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$, aconteceram durante o trimestre mais chuvoso de janeiro a março (T1), quando de acordo com a Figura 4b, ocorreram os máximos valores de ET_f (média de 0,58) RAF_{abs} (em torno de 5,8 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$). Entretanto, fora desse período caiu abaixo de 30 $kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$ em T3 (julho a setembro) sob os menores valores de ET_f e RAF_{abs} , respectivamente 0,25 e 3,7 $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ (Figura 4b). Na escala anual BIO em CE_NE ficou ligeiramente inferior a CE_N, em torno de 19 $t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, a menor taxa das regiões onde o bioma Cerrado está inserido.

As maiores taxas da BIO em CE_CO foram detectadas também em T1 (janeiro a março), mas com média diária trimestral acima de $85 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Tabela 2), sob os mais elevados valores de 0,61 e $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para ET_f e RAF_{abs} , respectivamente (Figura 4c). Os limites inferiores (Tabela 2) ocorreram em T3 (julho a setembro), entretanto com valores médios de 0,31 e $4,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para ET_f e RAF_{abs} , respectivamente (Figura 4c). O valor anual para CE_CO de $25 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ foi 30% mais elevado que para CE_N e CE_NE.

No bioma Cerrado inserido na região Sudeste (CE_SE), as taxas mais elevadas da BIO, com média diária trimestral ultrapassando $95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Tabela 2), foram, como nas regiões prévias, em T1 (janeiro a março), mas, de acordo com a Figura 4d, com valores de ET_f (média de 0,66) e RAF_{abs} em torno de $5,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. As taxas inferiores da BIO, como nas regiões prévias, também ocorreram em T3 (Tabela 2), mas com maior taxa média trimestral, acima de $35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$, sob os valores mais baixos de 0,35 e $4,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, para ET_f e RFA_{abs} , respectivamente (Figura 4d). Com o valor anual de $26 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, CE_SE se destaca com a segunda maior taxa da BIO, atrás da região CE_S.

Embora com uma área contendo o bioma Cerrado bem inferior as outras (ver Figura 1a), de acordo com a Tabela 2, CE_S se destaca com pelos valores da BIO acima de $100 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ bem distribuídos ao longo do ano. Diferentemente das outras regiões em que o Cerrado está inserido, os trimestres em que ocorreram os valores máximos de $130 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ foi em T3 (julho a setembro), sob o maior valor médio de ET_f de 0,72, mas com o menor valor médio de RFA_{abs} de $4,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 4e). A menor média trimestral da BIO, de $105 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Tabela 2), ocorreu em T2 (abril a junho), sob o menor valor de ET_f de 0,57, mas o maior de RFA_{abs} de $5,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 4e), evidenciando o efeito mais forte ET_f com relação à RFA_{abs} na magnitude da BIO. A região CE_S apresentou a maior taxa anual da BIO de $115 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, seis vezes àquela para CE_NE.

Considerando todas as regiões onde o bioma Cerrado está inserido, os trimestres com maiores taxas da BIO ocorreram de janeiro a março em CE_N, CE_NE CE_CO e CE_SE, diferenciando apenas para CE_S onde estas aconteceram em T3 (julho a setembro). As taxas mais baixas aconteceram em T3 (julho a setembro) em CE_N, CE_NE, CE_CO e CE_SE, com exceção apenas para CE_S, onde estas foram detectadas em T2 (abril a julho). De acordo com os valores das médias e de desvio padrão (DP) apresentados na Tabela 2, as maiores variações espaciais da BIO ocorreram em T3 (julho a setembro) em CE_SE, quando DP foi 112% da média, enquanto as menores aconteceram em T1 (janeiro a março) para CE_S, quando o percentual correspondente foi de 32%.

Para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, a ET_f influenciou mais os valores da BIO do que a RAF_{abs} , sendo isso mais evidenciado em CE_S, quando as taxas máximas da BIO ocorreram sob os mais baixos valores de RAF_{abs} e mais elevados de ET_f (Tabela 2 e Figura 4e). Isto demonstra que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado (Seneviratne et al., 2010). Deve-se salientar que no estudo corrente, BIO é a produção de biomassa diária e não a biomassa atual, podendo acontecer de vegetação mais alta apresentar menor taxa que para vegetação mais baixa.

Cruzando os valores da ET e da BIO das Tabelas 1 e 2, a produtividade da água (PA), considerada aqui como a razão da BIO para a ET, apresentou maiores valores de janeiro a junho (T1-T2) para todas as regiões em que o bioma Cerrado está inserido, sendo em torno de $3,1 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_N; $3,0 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_NE; $3,3 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_CO; $3,2 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_SE e $4,3 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_S. Os valores inferiores de PA foram em T3 (julho a setembro), com exceção de CE_S que ocorreram em T4 (outubro a dezembro), sendo as médias de $2,3 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_N; $2,2 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_NE; $2,5 \text{ kg m}^{-3}$ para ambos CE_CO e CE_SE; e $3,7 \text{ kg m}^{-3}$ para CE_S. As mais fortes diferenças na PA foram detectadas entre as regiões CE_S e CE_NE com valor anual de 3,9 e $2,7 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente.

Para integração das condições do crescimento vegetativo e dos fluxos hídricos no Cerrado, a Figura 5 mostra as relações entre BIO e ET, considerando os valores trimestrais durante o ano de 2016, para cada região onde o bioma está inserido.

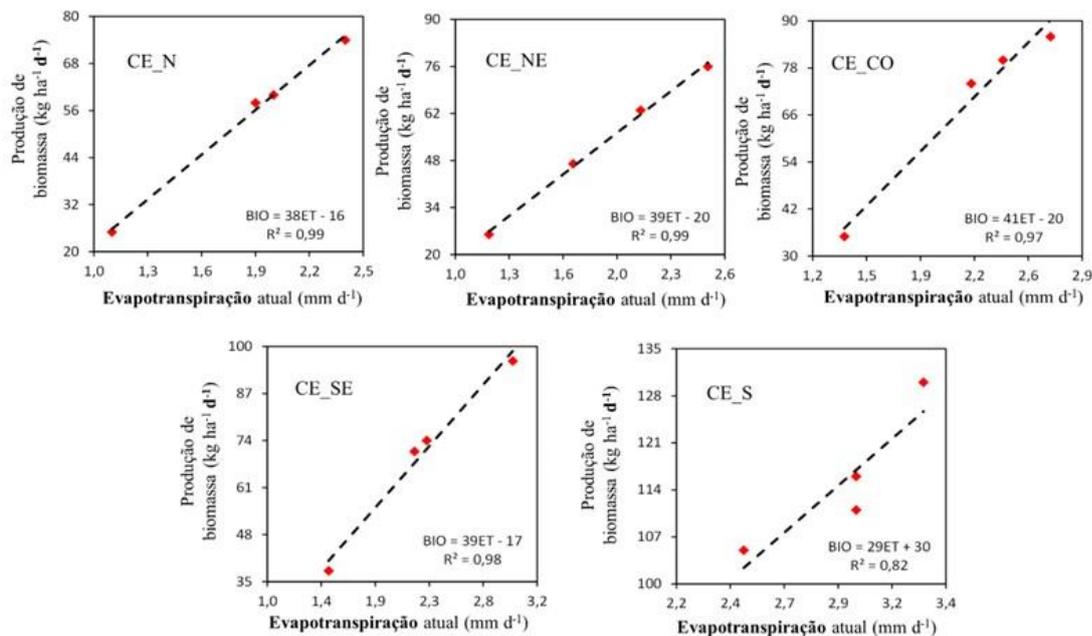


Figura 5. Relações entre os valores trimestrais durante o ano de 2016, da produção de biomassa (BIO) com aqueles para evapotranspiração atual (ET) no bioma Cerrado inserido nas regiões Norte (CE_N), Nordeste (CE_NE), Centro Oeste (CE_CO), Sudeste (CE_SE) e Sul (CE_S).

As correlações da BIO com ET (Figura 5) foram positivas para o bioma Cerrado inserido em todas as regiões, com os valores maiores nas regiões Norte (CE_N) e Nordeste (CE_NE), apresentando R^2 de 0,99 em ambas, enquanto as menores foram para a região Sul que apresentou R^2 de 0,82. Nas duas primeiras regiões os valores de ET_f são os mais baixos (média anual de 0,43), mas sob elevados valores de RAF_{abs} (média anual de 5,0 MJ m⁻² d⁻¹), explicando a forte correlação da ET com a BIO, pois mesmo com bons níveis de radiação solar nessas regiões, há necessidade de umidade na zona das raízes para que os fluxos hídricos ocorram. No caso de CE_S, a ET mais condicionada às variações da demanda atmosférica, a qual apresenta maior variação ao longo do ano devido a posição latitudinal.

CONCLUSÃO

Demonstrou-se a viabilidade da aplicação conjunta do algoritmo SAFER e o modelo da eficiência do uso da radiação com o produto reflectância MODIS MOD13Q1 e grades de dados climáticos para o monitoramento da dinâmica dos componentes da produtividade da água no bioma Cerrado. Diferenças espaciais e temporais nos valores da evapotranspiração atual (ET) e produção de biomassa (BIO) produziram resultados distintos para a produtividade da água (PA). As maiores diferenças entre os valores de PA nas regiões onde bioma Cerrado está inserido foram detectadas entre a região mais úmida Sul (CE_S) e a mais seca Nordeste (CE_NE).

Os níveis de umidade na zona das raízes, representados pela fração evapotranspirativa (ET_f) foi o principal parâmetro para as magnitudes da ET e da BIO, o que explica as largas diferenças entre os ecossistemas do Cerrado nas regiões Nordeste e Sul. Deve ser enfatizado que as variações na ET

podem ser também causadas por áreas com diferentes demandas atmosféricas e graus de cobertura do solo pela vegetação do bioma, afetando as partições entre transpiração e evaporação do solo.

As correlações positivas mais elevadas entre BIO e ET_f foram para o bioma inserido nas regiões Centro Oeste (CE_CO) e Sudeste (CE_SE). Nessa última região, os elevados valores de ET_f , juntamente com altos valores de radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) promoveram as mais elevadas taxas da BIO entre as regiões, com consequentes maiores valores de PA, embora esta região represente uma pequena parcela do bioma.

As taxas da BIO foram mais fortemente relacionadas com a ET_f que com a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFA_{abs}) em todos as regiões onde o Cerrado está inserido, demonstrando que os níveis de umidade do solo têm um controle mais forte na BIO no bioma Cerrado, entretanto isto foi mais evidenciado para o bioma dentro da região Sul (CE_S), onde os maiores valores da BIO ocorreram com os valores mais baixos de RFA_{abs} e mais altos de ET_f .

Embora os métodos tendo sido aplicado para um ano específico, o sucesso do uso conjunto de imagens do sensor MODIS e grades de dados climáticos mostrou potencial par a implementação de sistema operacional de monitoramento das condições hídricas e de vegetação com uso de série histórica de dados no Cerrado, para suporte a políticas públicas com relação ao manejo e conservação dos recursos naturais do bioma, com possibilidade de replicação dos métodos em outras condições ambientais. Pesquisas futuras podem focar na detecção de anomalias nos componentes da produtividade da água para anos específicos em comparação com as condições históricas.

REFERÊNCIAS

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 pp., 1998.

Almagro, A.; Oliveira, P. T. S.; Nearing, M. A. Projected climate change impacts in rainfall erosivity over Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, 8130, 2017.

Arantes, A. E.; Ferreira, L. G.; Coe, M. T. The seasonal carbon and water balances of the Cerrado environment of Brazil: Past, present, and future influences of land cover and land use. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 117, 66-78, 2016.

Araujo, L. M.; Teixeira, A. H de C.; Bassoi, L. H. Evapotranspiration and biomass modelling in the Pontal Sul Irrigation Scheme. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, 2326-2338, 2019.

Azevedo, G. B. de; Rezende, A. V.; Azevedo, G. T. O. S.; Miguel, E. P.; Aquino, F. G.; Bruzinga, J. S. C.; Oliveira, L. S. C. de; Pereira, R. S.; Teodoro, P. E. Woody biomass accumulation in a Cerrado of Central Brazil monitored for 27 years after the implementation of silvicultural systems. **Forest Ecology and Management**, v. 455, 117718, 2020.

Cabral, O. M. R.; Rocha, H. R.; Gash, J. H.; Freitas, H. C.; Ligo, M. A. V. Water and energy fluxes from a woodland savanna (cerrado) in southeast Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 4, 22-40, 2015.

Ceschia, E.; Beziat, P.; Dejoux, J. F.; Aubinet, M.; Bernhofer, C.; Bodson, B.; Buchmann, N.; Carrara, A.; Cellier, P.; Di Tommasi, P.; Elbers, J. A.; Eugster, W.; Grünwald, T.; Jacobs, C. M. J.; Jans, W. W. P.; Jones, M.; Kutsch, W.; Lanigan, G.; Magliulo, E.; Marloie, O.; Moors, E. J.; Moureaux, C.; Olioso, A.; Osborne, B.; Sanz, M. J.; Saunders, M. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 139, 363-383, 2010.

Fernandes, F. H. S; Sano, E. E.; Ferreira, L. G.; Baptista, G. M. de M.; Victoria, D. de C.; Fassoni-Andrade, A. L. Degradation trends on MODIS derived estimates of productivity and water use efficiency: a case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 11, 30-40, 2018.

Giambelluca, T. W.; Scholz, F. G.; Bucci, S. J.; Meinzer, F. C.; Goldstein, G.; Hoffmann, W. A.; Franco, A. C.; Bucherta, M. P. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, 1365-1376, 2009.

Jardim, A. M. R. F.; Júnior, G. N. A.; da Silva, M. V.; dos Santos, A.; da Silva, J. L. B.; Pandorfi, H.; Oliveira-Júnior, J. F. de; Teixeira, A. H. de C.; Teodoro, P. E.; de Lima, J. L. P. M.; Junior, C. A. S.; Souza, L. S. B.; Silva, E. A.; Silva, T. G. F. S. Using Remote Sensing to Quantify the Joint Effects of Climate and Land Use/Land Cover Changes on the Caatinga Biome of Northeast Brazilian. **Remote Sensing**, v. 14, 1911, 2022.

Laipelt, L.; Ruhoff, A.L.; Fleischmann, A.S., Kayser, R.H.B., Kich, E. de M., Rocha, H.R da, Neale, C.M.U. Assessment of an automated calibration of the SEBAL algorithm to estimate dry-season surface-energy partitioning in a Forest-Savanna transition in Brazil. **Remote Sensing**, v. 12, 1108, 2020.

Lewinsohn, T. M.; Prado, P. I. How many species are there in Brazil? **Conservation Biology**, v. 19, 619-624, 2005.

Mariano, D. A.; Santos, C. A. C. dos; Wardlowa, B. D.; Anderson, M. C.; Schiltmeyera, A. V.; Tadessea, T.; Svoboda, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, 129-143, 2018.

Mata-González, R.; McIendon, T.; Matin, D. W. The inappropriate use of crop transpiration coefficients (K_c) to estimate evapotranspiration in arid ecosystems: A review. **Arid Land Research and Management**, v. 19, 285-295, 2005.

Monteith, J. L. Climate and efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 281, 277-294, 1977.

Núñez, D. C.; Hernandez, F. B. T.; Teixeira, A. H. de C.; Franco, R. A. M.; Leivas, J. F. L. Water productivity using SAFER - Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, 524-529, 2017.

Rebello, V. P. A.; Getirana, A.; Filho, O. C. R.; Lakshmi, V. Spatiotemporal vegetation response to extreme droughts in eastern Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 100294, 2020.

Sano, E. E.; Rodrigues, A. A.; Martins, E. S.; Bettiol, G. M.; Bustamante, M. M. C.; Bezerra, A. S.; Couto, A. F.; Vasconcelos, V.; Schüler, J.; Bolfe, E. L. Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. **Journal of Environmental Management**, v. 232, 818 - 828, 2019.

Santos, J. E. O.; Cunha, F. F.; Filgueiras, R.; Silva, G. H.; Teixeira, A. H. de C.; Silva, F. C. S.; Sedyama, G. C. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, 1-8, 2020.

Santos, G. L. dos; Pereira, M. G.; Delgado, R. C.; Magistrali, I. C.; Silva, C. G. da; Oliveira, C. M. M. de; Laranjeira, J. P. B.; Silva, T. P. da. Degradation of the Brazilian Cerrado: Interactions with

human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, 118875, 2021.

Seneviratne S. I.; Corti, T.; Davin, E. L.; Hirschi, M.; Jaeger, E. B.; Lehner, I.; Orlowsky, B.; Teuling A. J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, 125-161, 2010.

Teixeira, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated and natural vegetation in the São Francisco River basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, v. 2, 1287-1319, 2010.

Teixeira, A. H. de C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Ahmad, M. D.; Moura, M. S. B.; Bos, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, 110-127, 2008.

Teixeira, A. H. de C.; Leivas, J. F.; Garçon, E. A. M.; Takeura, C. M.; Quartaroli, C. F.; Alvarez, I. A. Modeling large-scale biometeorological indices to monitor agricultural-growing areas: applications in the fruit circuit region, São Paulo, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 1, 1-14, 2020a.

Teixeira, A. H. de C.; Takemura, C. M.; Leivas, J. F.; Pacheco, E. P.; Silva, G. B.; Garçon, E. A. M. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, 1- 9, 2020b.

Teixeira, A. H. de C.; Leivas, J. F.; Struiving, T. B.; Reis, J. B. R. S.; Simão, F. R. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, v. 247, 1- 9, 2021a.

Teixeira, A. H. de C.; Leivas, J. F.; Pacheco, E. P.; Garçon, E. A. M.; Takemura, C. M. Biophysical characterization and monitoring large-Scale water and vegetation anomalies by remote sensing in the agricultural growing areas of the Brazilian semi-arid region. In, Pandey, P. C.; Sharma, L. K. (Eds). **Advances in remote sensing for natural resource monitoring** (1 ed., pp. 94-109) Wiley Online Library, New Jersey, 2021b.

Yang, Y.; Guan H.; Batelaan, O.; McVicar, T. R.; Long, D.; Piao, S.; Liang, W.; Liu, B.; Jin, Z.; Simmons, C. T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. **Scientific Reports**, v. 6, 1-8, 2016.

Zhang, X.; Zhang, B. The responses of natural vegetation dynamics to drought during the growing season across China. **Journal of Hydrology**, v 574, 706-714, 2019.

Zhao, M.; Running, S. W. Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 through 2009. **Science**, v. 329, 940-943, 2010.

Zhou, L.; Zhou, G. Measurement and modeling of evapotranspiration over a reed (*Phragmites australis*) marsh in Northeast China. **Journal of Hydrology**, v. 372, 41-47, 2009.