



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO IRRIGADO DA
BANANA (*Musa sp. L.*), ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

ANTÔNIO ERIVANDO BEZERRA

Campina Grande - PB
Fevereiro – 2019

ANTÔNIO ERIVANDO BEZERRA

**ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO IRRIGADO DA
BANANA (*Musa sp. L.*), ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

ORIENTADOR: Prof. Dr. João Miguel de Moraes Neto
Prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira

Campina Grande – PB
Fevereiro – 2019



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



ANTÔNIO ERIVANDO BEZERRA

**ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO IRRIGADO DA
BANANA (*Musa sp. L.*), ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO**

BANCA EXAMINADORA:

Dr. João Miguel de Moraes Neto – Orientador UAEAg/CTRN/UFCG

Dr. Juarez Paz Pedroza – Examinador interno UAEAg/CTRN/UFCG

Dr. Bernardo Barbosa da Silva – Examinador externo UACA/CTRN/UFCG

Dr. Carlos Wagner Oliveira – Examinador externo CCAB/UFCA

Campina Grande – PB
Fevereiro – 2019

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, a toda minha família, aos meus pais, Aldir e Maria, a Natasha Matos Monteiro e a todos que contribuíram com meu aprendizado e que me apoiaram durante a caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por tudo de bom que foi proporcionado em minha vida e pelas graças concedidas.

À minha querida mãe, Maria de Queiroz, que dedicou todo seu tempo à criação dos filhos, transmitindo apoio e confiança durante todo o caminho transcorrido.

Ao meu pai, Aldir Alves, por tudo o que me ensinou durante a vida.

Aos meus irmãos, que apoiaram e dedicaram parte do seu tempo ao meu auxílio.

Aos meus avós, Eliza, Antônio, Antônio Genésio e Francisca de Jesus, por todo amor que me proporcionaram durante a vida.

À Natasha Matos Monteiro, que sempre esteve ao meu lado, sendo companheira, compreensiva e amorosa, me apoiando em todos os momentos bons e ruins.

Ao professor Dr. Carlos Wagner Oliveira pelo apoio, incentivo, aprendizado e amizade prestados a minha pessoa.

Ao professor Dr. João Miguel de Moraes Neto, pela confiança e orientação indispensável ao longo deste período.

Aos professores Dr. Bernardo Barbosa da Silva e Dr. Juarez Paz Pedroza pela sua orientação e contribuição, com o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os professores do programa que contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Aos colegas de classe que se tornaram amigos, irmãos e companheiros de todas as horas, por tantas alegrias, experiências inesquecíveis e ensinamentos.

A todos os profissionais do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela dedicação e esforço para conosco.

A CAPES e UFCG pela concessão de bolsa e financiamento da pesquisa.

“Se temos que esperar que seja para colher a semente boa que lançamos hoje no solo da vida. Se for para semear, então, que seja para produzir milhões de sorrisos, de solidariedade e amizade” (Cora Coralina).

SUMÁRIO

1- INTRODUÇÃO	13
2- OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.1 Objetivos específicos	15
3- REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 Região Metropolitana do Cariri (RMC) cearense	16
3.1.2 Clima	17
3.1.3 Solos	18
3.2 Cultura da bananeira	19
3.2.1 Origem e importância econômica.....	19
3.2.2 Classificação e morfologia	20
3.2.3 Exigências edafoclimáticas	22
3.3 Características das cultivares de bananeira da localidade em estudo	23
3.3.1 Características da cultivar Prata Anã.....	23
3.3.2 Características da cultivar Nanica ou Grand Naine	24
3.4 Coeficiente de cultivo (Kc) da banana	24
3.5 Evapotranspiração da cultura (ETc)	25
3.5.1 Evapotranspiração da cultura (ETc) e eficiência do uso da água (Water Productivity-WP).....	26
3.6 Produtividade Primária Bruta (Gross Primary Productivity-GPP) e eficiência do uso da água (Water Productivity-WP)	28
3.7 Uso do sensoriamento remoto para determinar a evapotranspiração real-ETr (%), produtividade primária bruta-GPP e eficiência do uso da água-WP	29
3.8 Principais sensores utilizados para determinar a evapotranspiração real-ETr (%), produtividade primária bruta-GPP e eficiência do uso da água-WP	31
3.8.1 Especificações técnicas e inovações presentes no Landsat 8	32
4- MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1 Área de estudo	34
4.2 Dados utilizados na pesquisa	34

4.3 Variáveis analisadas	37
4.3.1 Cobertura do solo	37
4.3.2 Evapotranspiração real (%)	37
4.3.3 Produtividade primária bruta (GPP)	46
4.3.4 Eficiência do uso da água (WP)	48
4.4 Análises estatísticas	49
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1 Análise espaço-temporal da cobertura do solo	50
5.2 Análise espaço-temporal da Evapotranspiração real (ETr %)	55
5.3 Análise espaço-temporal da produtividade primária bruta (GPP)	58
5.4 Análise espaço-temporal da eficiência do uso da água (WP)	65
5.5 Análises estatísticas	68
6- CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS	74
APÊNDICE A - CÔMPUTO DOS COMPONENTES DO SALDO DE RADIAÇÃO À SUPERFÍCIE (Rn)	81
APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO DO PIXEL QUENTE (HOT PIXEL) E PIXEL FRIO (COLD PIXEL) NA CENA DA IMAGEM	83
APÊNDICE C - CÔMPUTO DOS COMPONENTES DA EQUAÇÃO DE PENMAN-MONTEITH-FAO56	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Municípios da Região Metropolitana do Cariri cearense com melhor rendimento médio no cultivo da bananeira	20
Tabela 2- Correlação das leituras analógicas da bomba de pressão para cada nível de estresse hídrico (<i>FieldStat</i>) da cultura	27
Tabela 3- Descrições técnicas das bandas do satélite Landsat 8	33
Tabela 4- Parâmetros da superfície obtidos a partir do processamento das imagens do Satélite Landsat 8 (OLI/TIRS).....	37
Tabela 5- Variáveis utilizadas para calcular a reflectância, transmitância e albedo, durante o cultivo da bananeira	37
Tabela 6- Coeficientes de calibração para as bandas do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS)	39
Tabela 7- Datas das imagens do OLI/TIRS, temperaturas do ar máximo – Tmax (°C) e mínima- Tmin (°C), umidades relativas máxima – U _{max} (%) e mínima – U _{min} (%), NDVI médio, radiação fotossinteticamente ativa– RFA (MJ m ⁻² dia ⁻¹), valores de T1 e T2, referentes a temperatura média do ar para o mês com maior NDVI e dias selecionados para a pesquisa	58
Tabela 8- Análise estatística para Evapotranspiração real-ET _r (%), Produtividade primária bruta-GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹) e Eficiência do uso da água-W _p (Kg m ⁻³) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 3 de março de 2016	69
Tabela 9- Análise estatística para Evapotranspiração real-ET _r (%), Produtividade primária bruta-GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹) e Eficiência do uso da água-W _p (Kg m ⁻³) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 22 de maio de 2016	69
Tabela 10- Análise estatística para Evapotranspiração real-ET _r (%), Produtividade primária bruta-GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹) e Eficiência do uso da água-W _p (Kg m ⁻³) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 9 de julho de 2016.....	70
Tabela 11 - Análise estatística para Evapotranspiração real-ET _r (%), Produtividade primária bruta-GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹) e Eficiência do uso da água-W _p (Kg m ⁻³) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 29 de outubro de 2016.....	70
Tabela 12 - Análise estatística para Evapotranspiração real-ET _r (%), Produtividade primária bruta-GPP (g C m ⁻² dia ⁻¹) e Eficiência do uso da água-W _p (Kg m ⁻³) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 14 de novembro de 2016	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização da Região Metropolitana do Cariri-RMC, Estado do Ceará, Brasil	16
Figura 2 - Mapa de classificação climático do estado do Ceará, destacando a localização da área de realização da pesquisa	17
Figura 3 - Classificação de solos da área de estudo destacando os tipos de solos onde são cultivadas as bananeiras das unidades produtoras (SB, SPV e SDS)	18
Figura 4 - Níveis de estresse hídrico para manter a produtividade desejada.....	28
Figura 5 - Localização da área em estudo, destacando o cultivo da bananeira nas unidades produtoras (SB, SPV e SDS), na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Velha, Ceará, Brasil	36
Figura 6 - Fluxograma esquemático do METRIC, para obtenção dos elementos do balanço de energia e ETr %	38
Figura 7 - Valores médios mensais da precipitação e temperaturas do ar, para a região metropolitana do Cariri, cearense durante o período de janeiro a dezembro de 2016	50
Figura 8 - Uso e ocupação do solo da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	53
Figura 9 - Fotos das modificações ocorridas no entorno das unidades produtoras de banana para o período chuvoso e seco do ano de 2016	54
Figura 10 - Espacialização dos valores da evapotranspiração real (mm) da área de estudo, no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	56
Figura 11 - Espacialização da variação percentual dos valores da evapotranspiração real (%) da área de estudo, no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	57
Figura 12 - Espacialização dos valores de NDVI da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	61

Figura 13 - Espacialização dos valores de IAF ($m^2 m^2$) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	62
Figura 14 - Espacialização dos valores de produtividade primária bruta ($g C m^{-2} dia^{-1}$) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	63
Figura 15 - Fotos do sistema de irrigação, matéria morta e variações do estagio de crescimento da bananeira das unidades produtoras, localizada na divisa dos municípios de Barbalha e Missão, Ceará, Brasil	64
Figura 16 - Espacialização dos valores de eficiência do uso da água ($Kg m^{-3}$) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016	67

ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO IRRIGADO DA BANANA (*Musa sp L.*), ATRAVÉS DE SENSORIAMENTO REMOTO

RESUMO: A banana é um dos frutos mais consumidos mundialmente, no entanto, requer elevada demanda hídrica para atingir o seu potencial produtivo máximo. Para que se possa obter equilíbrio entre consumo e eficiência do uso da água, do inglês (*Water Productivity-WP*), torna-se necessário à implementação do gerenciamento integrado dos recursos hídricos. Com isso, o objetivo do trabalho foi determinar a eficiência do uso da água, no cultivo irrigado da bananeira (*Musa sp. L.*) para os municípios de Barbalha e Missão Velha, Ceará, Brasil, utilizando parâmetros como variação da evapotranspiração real- E_{Tr} (%), obtida através do algoritmo METRIC (Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration) e produtividade primária bruta, do inglês (*Gross Primary Productivity-GPP*), pelo modelo Eficiência de Uso da Luz, do inglês (*Light Use Efficiency-LUE*) ambos utilizando dados de sensoriamento remoto. Foram utilizadas imagens geradas pelos sensores OLI/TIRS do satélite Landsat 8, órbita 217 e ponto 65, em seis dias do ano de 2016 (3 de março, 22 de maio, 09 de julho, 29 de outubro e 14 de novembro), além de dados meteorológicos coletados na estação meteorológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia-INMET como: temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, radiação solar, precipitação e outros, utilizados nos processos de validação dos modelos e também no cálculo da evapotranspiração de referência- E_{T_0} . O cultivo da bananeira na localidade em estudo encontra-se consolidado a mais de dois anos, apresentando parâmetros biofísicos dentro da normalidade e variação da evapotranspiração real entre 75 e 100%, indicando nível de estresse hídrico baixo. Através da avaliação espaço temporal e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, percebe-se que, independentemente do tempo de cultivo e ou período do ano, a unidade produtora SB apresenta as melhores medias para as variáveis E_{Tr} (%), GPP e WP, seguido pela unidade produtora SPV e SDS. Tendo em vista o manejo empregado na irrigação, solo e a E_{Tr} (%) obtida encontrar-se próxima de 100%, e a GPP de 8,74 g C m⁻² dia⁻¹ percebe-se que o cultivo da unidade produtora SB proporciona melhor eficiência no uso da água (1,18 Kg m⁻³), uma vez que manteve o nível de produtividade em torno de 25-30 ton ha⁻¹.

Palavras-chaves: Demanda hídrica, Evapotranspiração, Irrigação, Saldo de radiação.

ESTIMATION OF EFFICIENCY OF WATER USE IN IRRIGATED BANANA (*Musa sp L.*), CULTIVATION THROUGH REMOTE SENSING

ABSTRACT: Banana is one of the most consumed fruits worldwide, however, it requires high water demand to reach its maximum productive potential. In order to achieve a balance between water use and efficiency, it becomes necessary to implement integrated water resources management. The objective of this work was to determine the efficiency of water (Water Productivity-WP) use in the irrigated cultivation of the banana tree (*Musa sp. L.*) for the municipalities of Barbalha and Missão Velha, Ceará, Brazil, using parameters such as actual evapotranspiration rate-ETr (%), obtained through the METRIC algorithm (Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration) and Gross Primary Productivity (GPP), by the Light Use Efficiency- LUE) both using remote sensing data. Images generated by OLI / TIRS sensors from Landsat 8 satellite, orbit 217 and point 65, were used in six days of 2016 (March 3, May 22, July 9, October 29 and November 14). meteorological data collected at the meteorological station belonging to the National Institute of Meteorology-INMET such as: air temperature, wind speed, relative humidity, dew point temperature, atmospheric pressure, solar radiation, precipitation and others used in the validation processes of the models and also in the calculation of reference evapotranspiration-ET₀. The banana cultivation in the studied locality has been consolidated for more than two years, presenting biophysical parameters within the normal range and evapotranspiration rate between 75 and 100%, indicating a low water stress level. By means of the temporal space evaluation and the comparison of means by the Tukey test at 5% of probability, it is noticed that regardless of the time of cultivation and / or period of the year, the production unit SB presents the best means for the ETr (%), GPP and WP, variables by the production unit SPV and SDS. Considering the management used in the irrigation, soil and the ETr (%) obtained were close to 100%, and the GPP of 8.74 g C m⁻² day⁻¹ it is noticed that the cultivation of the production unit SB provides better efficiency in water use (1.18 kg m⁻³), since it maintained the productivity level around 25-30 ton ha⁻¹.

Key words: Water demand, Evapotranspiration, Irrigation, Radiation balance.

1- INTRODUÇÃO

A bananeira (*Musa* sp. L.) é uma espécie pertencente à família *Musaceae*. A mesma pode desempenhar um papel importante na nutrição saudável para pessoas de todas as idades, por esse fato, está entre os frutos mais comercializados e consumidos em todo mundo, o que faz com que ela seja cultivada em mais de 130 países e ocupe destaque no ranking mundial das frutas, com produção anual de 106,5 milhões de toneladas (FU et al., 2018; SONG et al., 2018; FAO, 2016).

Devido aos elevados investimentos realizados no seu plantio, comercialização e desenvolvimento tecnológico, a bananicultura brasileira ganhou destaque no cenário mundial, principalmente em termos produtivos. Esses fatores contribuíram para que fosse alcançado o montante de aproximadamente 7,0 milhões de toneladas ano, área colhida de 480,8 mil hectares e rendimento médio de 14,2 ton ha⁻¹ (LASP, 2017).

Na região Nordeste, onde o clima Semiárido predomina com período chuvoso instável, a ocorrência de estresse abiótica causada pela baixa disponibilidade hídrica, resulta em prejuízos à produção em sequeiro. Em contra partida a fruticultura irrigada se configura num dos principais setores do agronegócio. Apesar das condições climáticas adversas, que dificultam a produção em sequeiro, essa região apresenta uma das maiores produções de banana do Brasil, com destaque para os estados do Maranhão, Bahia, Pernambuco e Ceará.

Uma parcela expressiva dos bananais cearenses se encontra no polo agrícola irrigado da Região Metropolitana do Cariri-RMC, principalmente nos municípios de Barbalha e Missão Velha, que despontam como maiores produtores irrigados do fruto, da referida região, atingindo produtividade média entre 18 e 20 ton ha⁻¹, respectivamente (ADECE, 2013).

A bananeira sofre constantemente com problemas hídricos, por isso, para manter o nível de produtividade adequado e satisfatório, torna-se necessário que o nível de estresse hídrico, representando pela evapotranspiração, seja mantido a cima de 65%. Em áreas áridas e semiáridas a determinação precisa da evapotranspiração da cultura (ETc) é essencial para práticas de manejo e regime de irrigação e está relacionada a estimativa do uso consuntivo de água, e a eficiência produtiva da bananeira.

Entretanto, a estimativa da ETc em áreas com grandes extensões é uma tarefa complexa devido à variabilidade espacial e temporal de diversas variáveis climáticas, bem como às características de uso do solo e mesmo de manejo da cultura. Todavia, a estimativa correta desse parâmetro se torna imprescindível, uma vez que, favorece o desenvolvimento da

cultura, melhora os índices de produtividade e eleva a eficiência do uso da água (EUA), e principalmente contribui para redução do desperdício desse recurso natural escasso na Região Nordeste.

A grande expectativa no setor agrícola é conseguir produzir mais alimentos, gastando menos água, otimizando assim, a utilização dos recursos hídricos. Para isso, tem sido desenvolvidos vários produtos de sensoriamento remoto, cuja finalidade gira em torno do acompanhamento constante do desenvolvimento das lavouras. Nesse sentido, o sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite fornece informações espaciais, como subsidio para análise da heterogeneidade da terra e é, portanto, de grande potencial para a modelagem das condições de campo em tempo real.

Essa tecnologia fornece dados precisos, de maneira rápida, a baixo custo, com eficiência significativa, podendo ser empregada na obtenção de índices de qualidade sanitária da cultura agrícola, balanço de radiação na superfície, evolução temporal da evapotranspiração real, produção de biomassa e eficiência do uso da água, entre outros (BAI et al., 2018; JIN et al., 2018).

A grande vantagem desse método é permitir estimativas em escalas regional e global, contemplando áreas com grande variabilidade de solo, vegetação, precipitação, entre outros, de modo que os resultados possam ser expressos na forma de mapas digitais, assim favorecendo o planejamento agrícola.

2- OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estimar a eficiência do uso da água na irrigação do cultivo da bananeira, utilizando dados de evapotranspiração real e produtividade primária bruta, obtidos através de sensoriamento remoto e modelagem.

2.2 Objetivos específicos

Determinar com base na evapotranspiração real-ET_r, o nível de estresse hídrico submetido ao cultivo irrigado da bananeira, para três unidades produtoras (SB, SPV e SD), localizadas na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Velha, Região Metropolitana do Cariri Cearense, durante os períodos chuvoso e seco do ano de 2016.

Avaliar os efeitos da irrigação sobre a produtividade primária bruta do cultivo irrigado da bananeira, para três unidades produtoras (SB, SPV e SD) contendo áreas com tempo de cultivo entre quatro, quatro a dez e dez a vinte anos de implantação. Referente aos dias 3 de março, 22 de maio, 9 de julho, 29 de outubro e 14 de novembro do ano de 2016.

Analisar os efeitos dos fatores edafoclimáticos sobre a evapotranspiração real, produtividade primária bruta e eficiência do uso da água para três unidades produtoras (SB, SPV e SD) da banana, referente aos dias 3 de março, 22 de maio, 9 de julho, 29 de outubro e 14 de novembro do ano de 2016.

Avaliar a produtividade média de frutos para três unidades produtoras (SB, SPV e SD) e com base no tipo de manejo adotado no solo e irrigação, evapotranspiração real e produtividade primária bruta, determinar qual apresenta melhor eficiência econômica do uso da água.

3- REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Região Metropolitana do Cariri (RMC) cearense

Embora esteja localizada no sertão semiárido e no “Polígono das Secas”, a região do Cariri cearense possui características atípicas, como áreas úmidas e férteis, além de fontes perenes, solos de boa qualidade (Vale do Cariri) e boas condições climáticas com temperatura e regime hídrico diferenciado das demais localidades do semiárido nordestino, de maneira que não padece, com tanta intensidade, dos efeitos das estiagens, em virtude da proximidade da encosta da Chapada do Araripe que recebe uma quantidade de chuvas acima da média do sertão (MEDEIROS et al., 2013).

A RMC foi criada pela Lei Complementar Estadual 78 de 2009 é composta pelos municípios de Barbalha, Caririáçu, Crato, Farias Brito, Jardim, Juazeiro do Norte, Missão Velha, Nova Olinda e Santana do Cariri, conforme Figura 1. Com expressivo potencial de desenvolvimento econômico, reúne cerca de 550 mil habitantes, sendo que aproximadamente 70% da população é considerada pobre. O Produto Interno Bruto - PIB per capita alcança R\$ 2.905, o que corresponde a 72% da média verificada no Estado do Ceará. O Índice de Desenvolvimento Humano - IDH da região é de 0,647, aquém da média do Estado (0,699), (QUEIROZ, 2014).

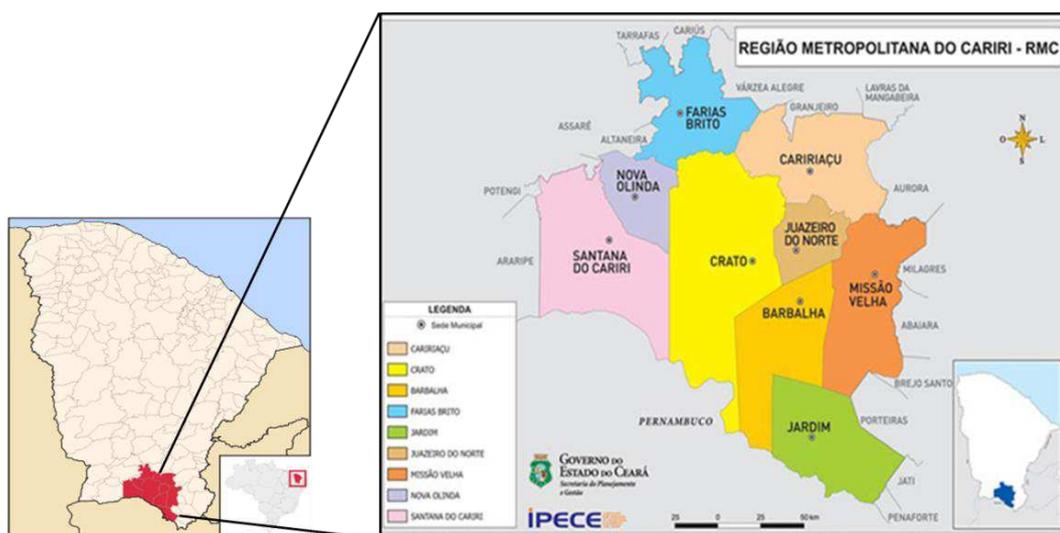


Figura 1. Mapa de Localização da Região Metropolitana do Cariri-RMC, Estado do Ceará, Brasil.

Fonte: Bezerra et al. (2017)

Os demais municípios da RMC são polarizados pela área conurbada dos Municípios de Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha (ou simplesmente CRAJUBAR). Esses três municípios

constituem centros secundários no interior do estado do Ceará, inegáveis detentores de concentração demográfica, bem como dos melhores indicadores socioeconômicos regionais, com relevante expressão social e econômica na região. Os demais Municípios, por outro lado, ilustram a existência de acentuada disparidade inter-regional (QUEIROZ, 2014).

A microrregião do CRAJUBAR corresponde a um dos maiores polos de desenvolvimento do Estado do Ceará, sendo considerado um centro de referência, no qual se verifica a maior concentração populacional e o principal eixo econômico da Região Sul do Estado. Juazeiro do Norte, o município mais populoso do interior, se destaca por seu centro comercial e religioso, além de deter o maior número de micro e pequenas empresas.

3.1.1 Clima

O estado do Ceará apresenta três tipos de clima: semiárido (BSw'h'), quente e úmido (Aw') e subtropical com chuvas astral (Cw') Figura 2. Em aproximadamente 80% do estado se verifica predominância do clima semiárido (BSw'h), com período chuvoso restrito a cerca de quatro meses do ano, enquanto o período seco perdura de sete a oito meses. Devido à proximidade com a linha do Equador, o regime térmico torna-se bastante uniforme, culminando em baixa amplitude térmica em função da menor incidência dos raios solares durante todo o ano, o que estabiliza a temperatura e impede a diferenciação das estações (BEZERRA et al., 2017; CAITANO et al., 2011; IBGE, 2016).

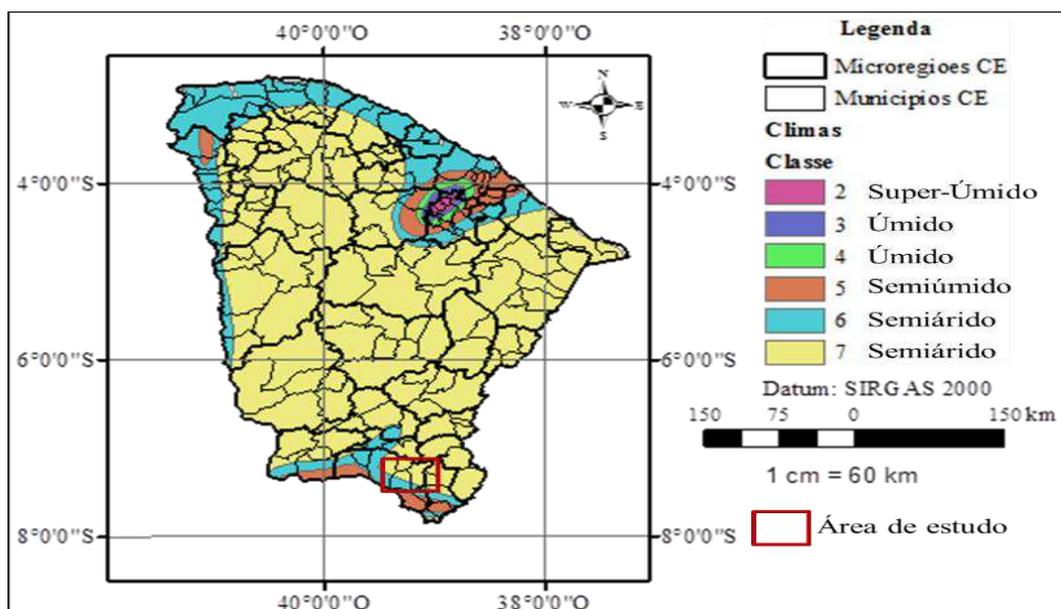


Figura 2. Mapa de classificação climática do estado do Ceará, destacando a localização da área de realização da pesquisa.

Fonte: Bezerra et al. (2017)

3.1.3 Solos

O conhecimento sobre classificação do solo implica diretamente no manejo agroclimático, uso e ocupação e conservação da biomassa. O quadro geológico da região do Cariri é bastante diversificado, refletindo diretamente sobre a variabilidade da cobertura vegetal. Ao ser realizado levantamento e classificação para descrição das manchas de solos da região, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos-FUNCEME, observou as seguintes classes: Latossolos, Argissolos, Luvisolos, Nitossolos, Planossolos, Cambíssolos, Vertissolos, Neossolos (FUNCEME, 2012).

O cultivo da bananeira na área em estudo ocorre sobre duas manchas de solos específicas: ARGISSOLO VERMELHO-PV1, NEOSSOLO FLÚVICO-RY3, apresentadas na Figura 3, (BEZERRA et al., 2017, FUNCEME, 2012). O ARGISSOLO VERMELHO-PV1 é um solo mineral que tem como característica principal a presença do horizonte B textural, o qual apresenta um significativo aumento de argila em relação aos horizontes suprajacentes E ou A, conjugado com atividade da argila baixa. A textura varia de arenosa a argilosa na superfície, e de média a muito argilosa em subsuperfície. São solos relativamente homogêneos do ponto de vista mineralógico e, devido ao adiantado grau de evolução pedogenética, predominam argilominerais do grupo das caulinitas em sua composição (FUNCEME, 2012).

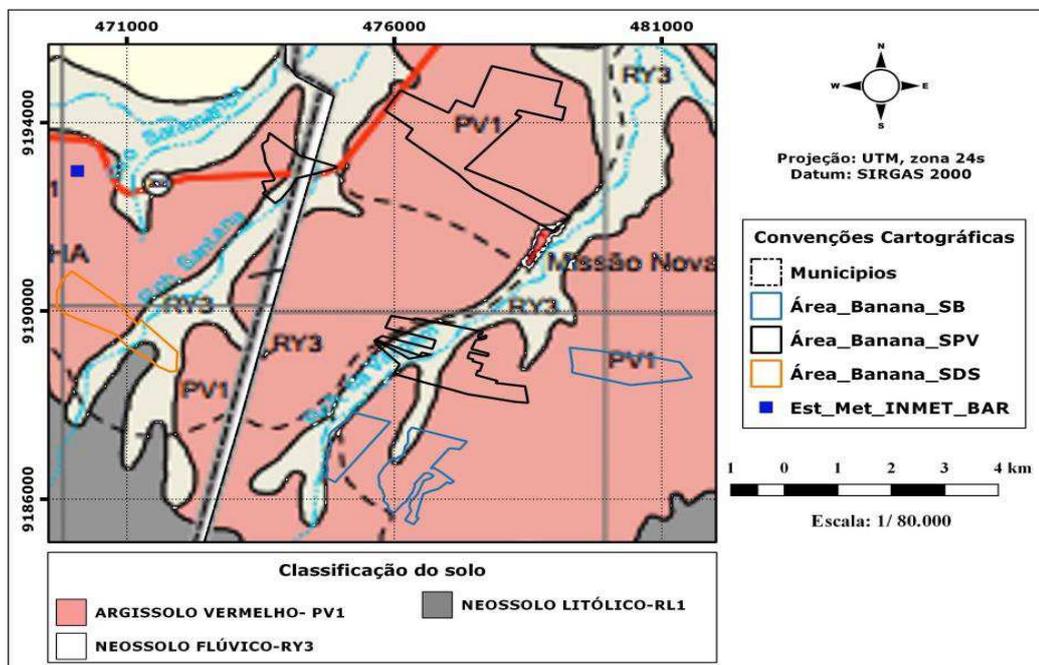


Figura 3. Classificação de solos da área de estudo destacando os tipos de solos onde são cultivadas as bananeiras das unidades produtoras (SB, SPV e SDS).

Fonte: Bezerra et al. (2017)

O NEOSSOLO FLÚVICO-RY3 possui camadas estratificadas sem relações pedogenéticas entre si, e que devido à sua gênese, pode apresentar uma variação muito grande de atributos morfológicos, físicos, químicos e mineralógicos. São solos derivados de sedimentos aluviais normalmente em perfis com estratificação muito distinta em termos de textura, cor e estrutura. Já o NEOSSOLO LITÓLICO-RL1, por ser considerado jovem, com afloramento de rochas, pode ser facilmente encontrado nas margens das propriedades e ou afluentes componentes das micro bacia hidrográficas locais (BEZERRA et al., 2017).

3.2 Cultura da bananeira

3.2.1 Origem e importância econômica

As cultivares de bananeira, em sua maioria, originaram-se do continente asiático, embora existam centros secundários de origem na África Central e nas ilhas do Pacífico, além de um importante centro de diversidade na África Ocidental. Sua evolução se deu a partir das espécies selvagens *Musa acuminata* Colla e *Musa balbisiana* Colla acrescido da origem bi específico (A = acuminata, B = Balbisiana). A classificação desses grupos de bananeira comestíveis refere-se também a níveis de cromossomos distintos, podendo ser diploides (AA, BB e AB), triploides (AAA, AAB e ABB) e tetraploides (AAAA, AAAB, AABB, ABBB), (SILVA et al., 2012).

A banana ocupa a primeira posição no ranking mundial das frutas, com uma produção anual de 106,5 milhões de toneladas. São mais de 130 países que se pratica o cultivo da banana no mundo. Em alguns deles, a atividade se destaca como uma das principais fontes de arrecadação e geração de emprego e renda. O continente asiático lidera a produção dessa fruta, com 58% do volume produzido; o americano vem em segundo lugar, com 26% (América do Sul, com 17% e a América Central, com 8%); seguido do continente africano com 14% (FAO, 2016).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2016) apontam para uma safra anual de aproximadamente 7,0 milhões de toneladas, com área colhida de 480,8 mil hectares e rendimento médio de 14,2 ton ha⁻¹. Esses valores classificam o Brasil como o quinto produtor mundial da banana. Em comparação com os resultados da safra do ano anterior, houve um decréscimo de 0,82% na área colhida, 1,05% de acréscimo na produção e de 1,89% no rendimento médio.

O cultivo da bananeira está distribuído por todo o Brasil. A região Nordeste é a maior produtora, seguida pelas regiões Norte, Sudeste, Sul e Centro-Oeste. Embora a região

Nordeste apresente excelentes condições de clima e solo para a produção da banana em alto padrão de qualidade, ainda se faz necessário superar, a baixa eficiência na produção, tendo em vista que nas localidades onde a bananeira é cultivada, as precipitações são insuficientes para atender às suas necessidades hídricas, tornando fundamental o uso de irrigação suplementar, como ocorre no Semiárido Brasileiro (MONTENEGRO *et al.*, 2009).

O censo agropecuário estadual realizado no ano de 2010 apresenta dados referentes ao cultivo da bananeira do estado do Ceará, onde o mesmo ocupa uma área de aproximadamente 50,5 mil hectares, com produção média de 436,2 mil toneladas e produtividade média de 8,7 ton ha⁻¹. Esses valores são relativamente baixos se comparados com outros estados produtores da fruta (VIEIRA *et al* 2018). Como apresentado na Tabela 1, os municípios de Barbalha e Missão Velha são os maiores produtores de banana do polo agrícola irrigado da RMC cearense (ADECE, 2016).

Tabela 1. Municípios da Região Metropolitana do Cariri cearense com melhor rendimento médio no cultivo da bananeira

Tipo de cultivo	Município	Área plantada (ha)	Área colhida (ha)	Produção (Toneladas)	Produtividade Média (ton ha ⁻¹)
Irigado	Missão Velha	540	460	9240,0	20,087
	Barbalha	295	295	5310,0	18,000
	Crato	675	655	5698,0	8,699
Sequeiro	Jardim	91	91	1210,0	13,297
	Barbalha	80	80	624,0	7,800

Fonte: ADECE, 2016.

A bananicultura apresenta-se como um dos principais agronegócios internacionais, despontando como a segunda fruta mais consumida no planeta, com 11,4 kg hab⁻¹ano⁻¹, perdendo apenas para a laranja, com 12,2 kg hab⁻¹ano⁻¹. O continente americano é o maior consumidor, com 15,2 kg hab⁻¹ano⁻¹, com destaque para a América do Sul, com 20 kg hab⁻¹ano⁻¹ e a América Central, com 13,9 kg hab⁻¹ano⁻¹ (FAO, 2016). O Brasil ocupa a primeira colocação no consumo per capita mundial da banana, com 7,95 Kg hab⁻¹ uma vez que grande parte da produção é destinada ao consumo interno, exportando apenas 1,5% do montante produzido (IBGE, 2016).

3.2.2 Classificação e morfologia

A bananeira pertence à classe *Monocotyledoneae*, ordem *Scitaminales* família *Musaceae*, da qual fazem parte as subfamílias *Heliconioideae*, *Strelitziodeae* e *Musoideae*.

Esta última, além do gênero *Ensete*, inclui o gênero *Musa* de onde se origina a série ou seção Eumusa. Considerado um vegetal herbáceo completo constituído por sistema radicular, caule subterrâneo (rizoma), pseudocaule, folhas, flores e frutos, e em alguns casos, as sementes são consideradas hidrófitas, ou seja, muito sensível ao déficit hídrico no solo e responsiva à irrigação (SILVA et al., 2012).

Mesmo sob condições de estresse hídrico as folhas da bananeira permanecem altamente hidratadas. Isso se dá, provavelmente, pelo fechamento dos estômatos em resposta ao sinal emitido pelas raízes, em consequência da síntese do hormônio vegetal ácido abscísico (ABA) que é transportado para a parte aérea via xilema. Este mecanismo conserva a água na planta, mas interfere negativamente na assimilação de CO₂ e, conseqüentemente, na produtividade (SILVA et al., 2012).

A bananeira possui sistema radicular do tipo fasciculado que cresce em maior porcentagem, horizontalmente, podendo chegar até 5 m. Nas camadas superficiais do solo ocupa os primeiros 20 a 30 cm. O caule verdadeiro é o rizoma onde todos os seus órgãos, diretos ou indiretamente, se apoiam. As gemas apicais presentes no rizoma estão sempre em processo de multiplicação na qual, produz-se uma folha e a sua respectiva gema lateral de brotação (TRINDADE et al., 2004).

As folhas inicialmente se apresentam como pequenos cones foliares, passando por um processo de desenvolvimento, assumindo progressivamente o aspecto de folha. À medida que a folha vai se formando no centro do pseudocaule, sua velocidade de desenvolvimento é acelerada, assim como o seu deslocamento para o alto. A gema apical pode gerar de 30 a 70 folhas; dependendo do potencial da cultivar, fertilidade, umidade do solo e temperatura ambiente (BORGES et al., 2014).

O pseudocaule é formado pelo imbricamento das bainhas das folhas e serve como sustentáculo do cacho e armazenador de água e nutrientes. No seu ápice existe a roseta foliar que é delimitada pelo ponto onde a folha mais velha se afasta do pseudocaule e a mais nova está se abrindo. Para indicar o surgimento da inflorescência, a bananeira emite de três a quatro folhas cada vez mais curtas, as quais correspondem às últimas folhas a serem lançadas. As flores masculinas, femininas e hermafroditas estão reunidas em pencas isoladas e protegidas por uma bráctea (BORGES et al., 2014).

O desenvolvimento da bananeira divide-se em três períodos: vegetativo, floração e colheita. O tempo transcorrido desde o plantio até o aparecimento do ramo floral (crescimento vegetativo) varia entre 7 e 9 meses e da floração até a colheita do cacho de aproximadamente

3 meses. Para a colheita da safra seguinte o tempo é por volta de 6 meses (TRINDADE et al., 2004).

3.2.3 Exigências edafoclimáticas

A bananeira é uma espécie tropical que exige calor constante, precipitações bem distribuídas e umidade do ar elevada para que possa expressar o máximo de desenvolvimento e produção. Outros fatores externos como topografia, solo, oxigênio, temperatura, luminosidade, vento e altitude influenciam diretamente no crescimento e produção da cultura. A bananeira esboça preferência por locais de relevo plano a levemente ondulados com declinação menor que 8%, facilitando assim o manejo e a realização de práticas culturais, tais como: mecanização, colheita e conservação do solo. Temperaturas altas e uniformes são indispensáveis para a obtenção de altos rendimentos, sendo que a temperatura ótima situa-se em torno de 28°C, valores inferiores a 15°C comprometem os processos metabólicos da planta e, superiores a 35°C pode prejudicar o seu desenvolvimento, em consequência, principalmente da desidratação dos tecidos (SILVA et al., 2012).

O uso da irrigação durante os meses de maio a dezembro ameniza a redução na produtividade, já que nestes meses ocorre déficit hídrico. O manejo inadequado da irrigação na cultura da bananeira pode prejudicar o crescimento e o desenvolvimento das plantas, diminuindo a produtividade e criando microclima ideal ao desenvolvimento de pragas e doenças. Sob severa deficiência hídrica, a roseta foliar da bananeira se comprime, dificultando ou até mesmo impedindo o lançamento da inflorescência, em consequência, o cacho pode não apresentar valor comercial esperado (SILVA et al., 2012).

Entre os fatores climáticos a luz desempenha importante papel para o desenvolvimento da bananeira, sendo necessárias de 1000 a 2000 horas de luz anual. Se cultivada em local que receba apenas 30% do limite mínimo de luminosidade, em caráter permanente, a espécie mantém-se apenas em fase vegetativa. O excesso de sombra na folha retarda o desenvolvimento, em decorrência da baixa atividade fotossintética (TRINDADE et al., 2004). O município de Barbalha apresenta uma taxa anual de 2.848,0 horas de brilho solar. Os menores índices de cobertura de nebulosidade ocorrem nos meses de agosto e setembro com 0,3 e 0,4 décimos respectivamente, sendo a sua taxa anual de 0,6 décimos (MEDEIROS et al., 2013).

O monitoramento da velocidade do vento deve ser constante e rigoroso, pois pode causar desde pequenos danos, até a destruição do bananal. No que se refere à velocidade do

vento, mais importante do que a média diária ou mensal, é seu valor instantâneo ao longo do dia, pois uma rajada de vento ou um vendaval que ocorre em alguns minutos é capaz de provocar destruição do bananal. A velocidade do vento inferior a $8,33 \text{ m s}^{-1}$, geralmente não prejudica a planta, ou seja, não é limitante para o cultivo da banana (TRINDADE et al., 2004). A variação média anual da velocidade do vento na área de estudo é de $1,90 \text{ m s}^{-1}$, nos meses de junho a outubro, com intensidade entre $2,02$ a $2,55 \text{ m s}^{-1}$; já nos meses de novembro a maio a flutuação da sua intensidade é de $1,32$ a $1,85 \text{ m s}^{-1}$ (MEDEIROS et al., 2013).

O cultivo da bananeira pode ser realizado em altitudes de 0 a 1000 m. A Altitude influencia de forma direta no desenvolvimento e na produção da bananeira, uma vez que está relacionada com outros fatores climáticos como: a temperatura, precipitação, umidade relativa, luminosidade, entre outros (SILVA et al., 2012). A umidade relativa alta acelera a emissão das folhas, favorece o lançamento da inflorescência, torna a casca e polpa do fruto mais túrgida com maior longevidade, uniformiza a coloração. Porém, propicia boas condições para o desenvolvimento da Sigatoka, mal do Panamá e outras moléstias. Assim é necessário o elevado número de pulverizações com defensivos agrícolas para realização do controle (BORGES et al., 2014).

3.3 Características das cultivares de bananeira da localidade em estudo

A escolha da cultivar depende do mercado consumidor e do destino da produção (indústria ou consumo in natura), além da adaptabilidade às condições do ambiente. Existem quatro padrões de cultivares da bananeira com expressão econômica: Prata (Prata Anã e Pacovan), Cavendish (Nanica e Grand Naine), Maçã, e Terra. Dentro de cada padrão há uma ou mais variedades (SILVA et al., 2012). Recomenda-se, também, introduzir novas variedades ou cultivares com características de resistência a pragas e doenças, como a Caipira, FHIA 01 e FHIA 18, visando desenvolver novas opções para o mercado consumidor (SILVA et al., 2014). Em virtude da adaptabilidade, as condições edafoclimáticas da região e demanda de mercado, as cultivar Prata Anã e Nanica ou *Grand Naine* são frequentemente encontradas nas localidades produtivas da RMC (MEDEIROS et al., 2013).

3.3.1 Características da cultivar Prata Anã

Cultivar do grupo AAB, com pseudocaule muito vigoroso, de cor verde clara, brilhante, com poucas manchas escuras próximas à roseta foliar. Porte médio a alto, cacho cônico, ráquis com brácteas persistentes, coração grande e frutos pequenos, com quinas, ápices em

forma de gargalo e sabor agridoce. É suscetível às Sigatokas Amarela e Negra e ao Mal-do-Panamá, todavia apresenta boa tolerância à broca-do-rizoma e aos nematoides. A sua indicação, apesar da baixa capacidade produtiva, deve-se a grande aceitação pelos consumidores. A produtividade média esperada situa-se entre 25 e 30 t ha⁻¹ (SILVA et al., 2014).

3.3.2 Características da cultivar Nanica ou Grand Naine

A cultivar do padrão Cavendish (AAA) apresenta boa capacidade produtiva, bainhas com tonalidade vermelha, pecíolo esverdeado e coberto por cerosidade, pseudocaule muito vigoroso de cor verde-oliva com manchas castanhas e pretas, além de cacho com formato ligeiramente cônico. As diferenças existentes no porte determinaram a separação das cultivares do subgrupo Cavendish em cinco classes: porte muito baixo, baixo, médio-baixo, médio e alto. Os frutos das cultivares do subgrupo Cavendish apresentam ponta ou ápice em forma de gargalo pouco acentuado e são delgados, longos, encurvados e, quando maduros, muito doces e verde amarelados, sendo bastante apreciados no mercado interno e exportação. É suscetível à Sigatoka-Negra, medianamente suscetível à Sigatoka-Amarela e resistente ao Mal-do-Panamá, apresentando alta produtividade média em torno de 40 a 50 ton h⁻¹ (SILVA et al., 2014).

3.4 Coeficiente de cultivo (Kc) da banana

O coeficiente de cultivo (Kc) varia de acordo com o estado fenológico da cultura, sendo determinado através da divisão da evapotranspiração da cultura (ET_c) obtida através de lisímetro ou técnicas de sensoriamento remoto, e a evapotranspiração de referência (ET₀), obtida por meio de dados climatológicos. Quando o cultivo se encontra inseto de estresse biótico e abióticos o Kc pode ser substituído pela fração da evapotranspiração (ET_r), servindo como indicativo do desenvolvimento e uso consultivo da água pelas culturas agrícolas irrigadas (PÔÇAS *et al.*, 2015).

De acordo com Silva et al. (2012), publicações clássicas como o manual 24 da FAO, fornecem valores tabelados do Kc para os estádios de desenvolvimento da cultura da bananeira no segundo ano de produção, sendo eles: 1,00 (início); 1,20 (meio) e 1,10 (final). Barroso et al, (2010) verificaram que em locais de clima subúmidos valores de Kc tendem a ficar próximos de 1,0 a 1,2 no segundo ano de cultivo dessa cultura. Costa (2009), estudando o Kc da bananeira, cv. “Pacovan Apodi”, durante o segundo ano de produção, utilizando

dados de lisímetros de drenagem na Região da Chapada do Apodi, obteve valores de 1,09 para a fase inicial, 1,21 para a fase de produção e 0,71 para a fase final do cultivo.

Montenegro et al. (2009), ao determinarem o Kc da cultura da banana em Paraipaba, litoral cearense, observaram que durante o estágio fenológico inicial até 170 dias após o plantio (DAP) o valor médio apresentado foi de 0,60. No período de florescimento e desenvolvimento dos frutos - 1º ciclo (240 - 360 DAP), o valor obtido foi de 1,05. Ao entrar no 2º ciclo de vida produtiva, a bananeira apresentou valor médio de 0,86 para o Kc no estágio de crescimento vegetativo (415 - 560 DAP), e 1,05 ao retorna para o estágio de florescimento e desenvolvimento dos frutos (580 - 680 DAP). Oliveira et al. (2015), ao realizarem estimativa da evapotranspiração e Kc médio da cultura da banana no Distrito de Irrigação Jaguaribe - Apodi - DIJA, para o período de julho a outubro de 2006, utilizando o modelo METRIC, alcançaram os seguintes valores: 1,12; 1,38; 0,93 e 1,45 respectivamente.

3.5 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A evapotranspiração da cultura-ETc acontece quando as plantas se encontram em áreas extensas, em condições nutricionais, sanitárias e ambientais adequadas, não havendo déficit hídrico ou qualquer outro fator limitante ao pleno desenvolvimento. A ETc é determinada a partir da multiplicação da evapotranspiração de referência-ETo e o coeficiente da cultura-Kc que depende do estágio de desenvolvimento das plantas, do sistema de irrigação, da configuração de plantio e das condições meteorológicas reinantes (ALLEN et al., 2010). O requerimento hídrico da bananeira é relativamente alto, podendo chegar até 1.900 mm ano⁻¹, e esse valor deve ser bem distribuído no decorrer da safra. A evapotranspiração da cultura é bastante influenciada pela porcentagem de água disponível na zona radicular, que de acordo com o tipo de solo e condições climáticas, pode variar de 3 a 8 mm dia⁻¹ (TRINDADE et al., 2004).

Montenegro et al. (2009), em estudo realizado para determinação da evapotranspiração da bananeira (cultivar pacovan) em Paraipaba-CE, região de clima do tipo Aw (tropical chuvoso), através de balanço hídrico, verificou evapotranspiração média de 2,6 mm dia⁻¹ para o estágio inicial, 3,5 mm dia⁻¹ para o estágio de florescimento e desenvolvimento dos frutos do 1º ciclo, 3,9 mm dia⁻¹ e 4,3 mm dia⁻¹ para o crescimento vegetativo e florescimento e desenvolvimento dos frutos do 2º ciclo, respectivamente.

A evapotranspiração da bananeira variou entre 1,9 mm dia⁻¹ e 5,4 mm dia⁻¹, durante o estágio de florescimento e desenvolvimento dos frutos do 2º ciclo. O valor da ETc mínimo

observado é bem similar ao obtido por Teixeira et al. (2001), em Petrolina, que foi de 1,7 mm dia⁻¹. Entretanto, o valor máximo da ETc nas condições de Petrolina foi superior, atingindo 6,3 mm dia⁻¹ no período de colheita do 2º ciclo (MONTENEGRO et al., 2009).

Ao realizar o comparativo dos resultados de estimativa da evapotranspiração da cultura da banana, para o Distrito de Irrigação Jaguaribe - Apodi - DIJA, Limoeiro do Norte-CE, obtidos por lisimetria e dados de sensoriamento remoto, confrontando os modelos METRIC e SAFER, nota-se grande similaridade entre os resultados, onde a ET avaliada apresenta variações de 4 a 9 mm dia⁻¹ (OLIVEIRA et al., 2015).

3.5.1 Evapotranspiração da cultura (ETc) e eficiência do uso da água (Water Productivity-WP)

Ao analisar a correlação existente entre evapotranspiração e produtividade da bananeira, percebe-se que os requisitos de água para produção máxima são altamente dependentes da evapotranspiração da cultura-ETc e, portanto, variam significativamente dependendo do clima onde a cultura está sendo cultivada. No leste Africano Highlands, a disponibilidade hídrica pela precipitação está situada na faixa inferior (500 mm). Com isso, a seca compromete o fornecimento hídrico e à produção de bananas na África Oriental, onde um declínio de 100 mm na precipitação causou perdas máximas de 1,5 a 3,1 kg ou 8-10% da produtividade (VAN ASTEN et al., 2011).

Genótipos de banana (AAA, AAB e ABB) tolerantes a seca, e compatíveis às condições edafoclimáticas da República de Uganda, localizada no leste da África, apresentam estreita correlação entre Eficiência de Transpiração – TE, taxa de crescimento da cultura e produção de biomassa. Nota-se, no entanto, que uma cultivar que apresenta elevada TE durante a seca não garante a tolerância à seca, tendo em vista que a TE tende a subir quando os estômatos estão fechados. Uma TE elevada está correlacionada com o fechamento estomático superior, que é visto principalmente como uma estratégia de sobrevivência e está inversamente relacionado com a produtividade (KISSEL et al., 2015).

As avaliações realizadas por Van Asten et al. (2011) com seis cultivares de (*Musa* sp) em condições de estresse hídrico, demonstram não haver diferença significativa. A TE média global e a produção média de matéria seca, variou de 4,15 Kg m⁻³ (± 1,25) a 4,54 Kg m⁻³ (± 0,77) de água transpirada, evidenciando que a TE mais baixa encontrada para o cultivo da banana é 30% maior do que a TE média observada para outras culturas C3, como o feijão-de-baga (2,50 Kg m⁻³), e algumas C4 como a cevada (1,9-3,2 Kg m⁻³) e trigo (3,2 kg m⁻³). Esses

resultados colocam a banana na faixa de média a alta TE. Finalmente, deve-se notar que a cultura da bananeira apesar de apresentar boa eficiência no uso da água, o requerimento hídrico para expressar o máximo de produtividade, ainda é muito alto.

Coelho et al. (2013), ao avaliarem o efeito de diferentes lâminas de irrigação obtidas com base na ETC e Kc, estimados para condições de tabuleiros costeiros, constataram haver correlação positiva e linear entre a produtividade, demanda hídrica e evapotranspiração da banana do tipo Terra, já que o incremento da irrigação pode elevar a produtividade em até 40% em comparação ao cultivo de sequeiro.

Segundo Coelho et al. (2006), ao correlacionarem o regime hídrico com a produtividade e eficiência de uso da água, percebe-se que o regime de irrigação correspondente ao uso do Kc fixo próximo de (1,1), apresentou melhor resposta para ambas as cultivares tanto em termos de produtividade (33,5 ton ha⁻¹ para a cultivar Prata Anã e 60,5 ton ha⁻¹ para a Grand Naine), como em eficiência do uso de água (4,93 kg m⁻³ para a cultivar Prata Anã e 8,88 kg m⁻³ para a Grand Naine), demonstrando que a cultivar Grand Naine é mais eficiente no uso da água que a cultivar Prata Anã.

De acordo com Shapland (2016), o *fieldstat*, apresentado na Tabela 2, indica o nível de estresse hídrico ao qual a cultura está submetida, sendo o mesmo correspondente à evapotranspiração real e correlacionada com o potencial hídrico foliar, determinado pela bomba de pressão em bar. O nível de estresse hídrico pode ser medido através dos sensores contidos em micro estação meteorológica específicas, com área de abrangência de quatro hectares. Desse modo, o nível de estresse hídrico da área de cultivo pode ser obtido diariamente de forma remota e simples.

A legenda de cores apresentada na Figura 4 indica o limiar de estresse hídrico suportado pela cultura sem que haja perda de produtividade. No caso de algumas culturas de alto valor econômico e extremante sensíveis ao déficit hídrico, como por exemplo, as culturas da videira e bananeira, se recomenda que o nível de estresse hídrico não fique abaixo da faixa vermelha (tensão entre 13-15 bar) ou 50-65% de ET (SHAPLAND, 2016).

Tabela 2. Correlação das leituras analógicas da bomba de pressão para cada nível de estresse hídrico (*FieldStat*) da cultura.

Nível de estresse hídrico (<i>FildStat</i>)	Variação (ET)	Tensão equivalente (bar)
Baixo (Low)	>75%	< 12 bar
Leve (Mild)	65 - 75%	12 - 13 bar
Alto (High)	50 - 65%	13 - 15 bar
Extremo (Extreme)	<50%	>15 bar

Fonte: Shapland, 2016.

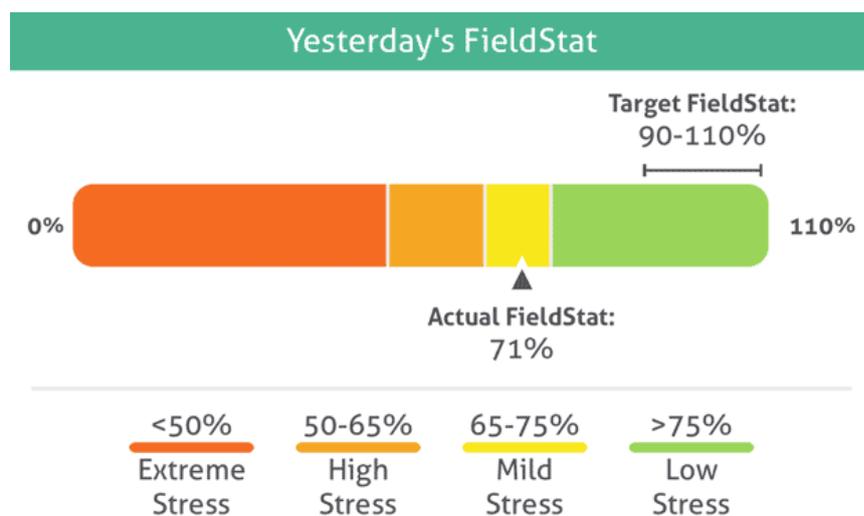


Figura 4. Níveis de estresse hídrico para manter a produtividade desejada.
Fonte: Shapland (2016).

3.6 Produtividade Primária Bruta (*Gross Primary Productivity-GPP*) e eficiência do uso da água (*Water Productivity-WP*)

No contexto das mudanças climáticas, o foco para o sequestro de carbono pelos ecossistemas florestais é fundamental para mitigar os danos e suas consequências em níveis regionais e globais (SHARMA et al., 2013). A Produção Primária Bruta, do inglês (*Gross Primary Productivity-GPP*) se refere à fotossíntese no nível do ecossistema e é um dos principais fatores que controlam a troca de dióxido de carbono (CO_2) entre a biosfera e a atmosfera e é importante para compensar as emissões antropogênicas de CO_2 . Esta produção é processada a partir da conversão de energia luminosa em biomassa (DELGADO et al., 2018a).

Existem diversos métodos destinados à quantificação do carbono estocado na vegetação, dentre os quais se destaca a técnica da covariância de vórtices turbulentos, muito empregada para quantificar o fluxo de CO_2 em diversos ecossistemas florestais (BEER et al., 2010; CABRAL et al., 2011). Esta técnica goza de grande prestígio junto à comunidade científica, mas seu custo e operacionalidade muitas vezes se apresentam restritivos para vários grupos de pesquisa nos países em desenvolvimento. Outra questão que restringe o uso de tal técnica refere-se a sua representatividade, que cobre apenas alguns quilômetros quadrados, salvo nos casos de áreas extensas e homogêneas (SILVA et al., 2013).

Nesse sentido, os métodos que empregam o sensoriamento remoto apresentam como grande vantagem a ampla cobertura espacial, baixo custo e maior operacionalidade. Muitas

dessas técnicas se fundamentam no conceito de eficiência de uso da luz, do inglês (Light Use Efficiency-LUE) proposto por Monteith (1972). A sua aplicação prática resultou de grande contribuição dada por Field et al. (1995) e, mais recentemente Bastiaanssen e Ali, 2003 ao empregarem o conceito de fração evaporativa com vistas a contabilizar o fator água no processo de fixação do carbono por parte da vegetação (KALFAS et al., 2011; SILVA et al., 2013).

Muitos modelos da GPP baseados em sensoriamento remoto se fundamentam na relação entre a eficiência de uso da luz - ϵ , a fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida - fPAR e a radiação fotossinteticamente ativa - RFA (ALMEIDA et al., 2018). Um dos maiores desafios no uso de tais modelos consiste em se obter “ ϵ ” numa grande área, em virtude de sua dependência de fatores ambientais e da própria vegetação. Uma das soluções consiste em relacionar “ ϵ ” em função do seu valor máximo - ϵ_{max} , mais as contribuições ambientais sintetizadas pela temperatura do ar e o status de água na vegetação (SILVA et al., 2013).

Outro elemento chave na modelagem da GPP é a RFA, devido ao seu papel na fotossíntese e dada sua dependência à dinâmica da atmosfera. A RFA corresponde à fração da radiação solar, situada entre 400 nm e 700 nm, e na ausência de medições pode-se estimá-la em função da radiação solar global diária - $R_{s,24h}$. Destaca-se que apenas uma fração da RFA, (entre 40 e 50%) é absorvida pelo dossel vegetativo no processo de fixação do carbono (TEIXEIRA et al., 2014). Embora mapas da GPP integrantes do produto MOD17A2 estejam disponíveis para diversos ecossistemas terrestres, o mesmo possui resolução de 1 km, gerado para períodos de oito dias; além disso, a RFA é estimada com base em dados de radiação solar global extraídos de dados de reanálise (KHALIFA et al., 2018).

3.7 Uso do sensoriamento remoto para determinar a evapotranspiração real-ET_r (%), produtividade primária bruta-GPP e eficiência do uso da água-WP

Apesar da melhoria da qualidade e produtividade das commodities produzidas mundialmente, fica evidente que a gestão da água na agricultura, requer atenção considerável, tendo em vista que as mudanças globais do clima tendem a alterar o rendimento das culturas (Ainsworth e Ort, 2010). De modo, que a quantificação exacta do rendimento das culturas sob condições limitadas de água, torna-se essencial para melhorar a eficiência do uso água de irrigação na agricultura moderna (GARCÍA-VILA e FERERES, 2012; KIM; KALUARACHCHI, 2015).

Para a agricultura irrigada, faz-se de grande valia a quantificação do saldo de radiação incidente sobre uma determinada área, pois constitui a principal fonte de energia utilizada no aquecimento do solo, ar e evapotranspiração real, além de influenciar diretamente no potencial produtivo das plantas, uma vez que, a qualidade e quantidade de radiação incidente, atuam diretamente na fotossíntese e produtividade da cultura (SOUZA et al., 2014).

As técnicas de sensoriamento remoto constituem uma ferramenta poderosa para o estudo e pesquisa de inúmeros problemas relacionados com os recursos naturais. Nas últimas décadas, o emprego de imagens de satélite vem se estabelecendo como um instrumento de fundamental importância nos estudos sobre o balanço de energia e de água na superfície, determinação de evapotranspiração real-ET_r e coeficiente de cultivo-K_c, eficiência no uso da água pela agricultura irrigada, além da identificação e monitoramento de áreas em processo de degradação, desmatamento de reservas e monitoramento de rebanhos, entre outros (ROMÁN et al., 2010).

O sensoriamento remoto por imagens orbitais foi usada para testar a correlação entre a eficiência do uso da água em nível de dossel, do inglês (WUE_{canopy}) e radiação solar, bem como estresse hídrico atmosférico. Com base nesse estudo, verificamos que a eficiência do uso da água em nível de dossel aumentou durante eventos de neblina e quando o estresse hídrico atmosférico e a radiação solar estavam reduzidos comparados aos dias de céu claro, de modo que a radiação difusa irradiava uma fração maior do dossel, e, portanto envolvendo um número maior de folhas no processo de fotossíntese (BAGUSKAS et al., 2018).

O sensoriamento remoto constitui uma importante fonte de aquisição de dados para o desenvolvimento da agricultura de precisão, muito porque essa tecnologia possibilita o monitoramento constante e periódico do estado nutricional das plantas, variabilidade dos parâmetros do solo (umidade e disponibilidade hídrica), condições para manejo vegetal, ocorrência de doenças, infestações por pragas e mapeamento da produtividade de cada colheita (HONDA, 2013).

O emprego do sensoriamento remoto para obtenção da evapotranspiração é bastante frequente nos estudos de determinação da produtividade efetiva e eficiência de uso da água na agricultura irrigada. Considerando que a fração evaporativa-FE da cultura corresponde ao fator água, elemento de extrema importância para realização dos processos biofísicos envolvendo trocas de energia e massa, o produto final desses processos realizados pelas plantas é, sobretudo, convertido em produtividade da cultura (MADUGUNDU et al., 2016; SOUZA et al., 2014; TEIXEIRA et al., 2014; ZHANG et al., 2014; SILVA et al., 2013).

A companhia nacional de abastecimento-CONAB, tem buscado medidas eficazes para incrementar e potencializar o sistema de levantamento e acompanhamento das safras agrícola. Portanto, tem-se investido em recursos tecnológicos de eficiência comprovada, tais como: modelos estatísticos, sensoriamento remoto, utilização do sistema GPS, sistemas de informações geográficas (SIG) e modelos agrometeorológicos/espectrais, para estimar as áreas de cultivo e prever impactos à produtividade das lavouras (CONAB, 2016).

De acordo com o técnico responsável pelo setor de monitoramento da safra, a CONAB tem realizado mapeamentos das principais culturas de verão, de segunda safra e de inverno, destacando o arroz, café, cana-de-açúcar, milho, soja e trigo, através do acompanhamento das condições agrometeorológicas e espectrais, pois os índices de vegetação calculados a partir de imagens de satélite fornecem informações valiosas sobre as condições da vegetação, e servem como elementos bases para quantificar a produtividade das lavouras (CONAB, 2016).

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) e o índice de área foliar (IAF), obtidos por sensoriamento remoto, são frequentemente utilizados na modelagem de sequestro de carbono, determinação da evapotranspiração, necessidades de água de irrigação, demanda nutricional, realização de podas e em diversas práticas agrícolas. O NDVI expressa a diferença de reflectância entre a faixa espectral do vermelho (660 nm) e a do infravermelho próximo (800 nm), (GUIMARÃES et al., 2013; TELES et al., 2013; GONSALVES et al., 2011).

O IAF definido como sendo igual a razão entre a área foliar de toda a vegetação pela unidade de área ocupada por ela, sendo um dos principais indicadores da produção de biomassa da cultura. Nas culturas, em geral, da fase inicial de crescimento até o estágio de completa interceptação da radiação pelas folhas, a taxa de produção dos fotoassimilados aumenta até um valor máximo em função do IAF. Portanto, quanto mais rápido a cultura atingir o IAF máximo e quanto mais tempo a área foliar permanecer ativa, maior será a produtividade da cultura (GONSALVES et al., 2011).

3.8 Principais sensores utilizados para determinar a evapotranspiração real-E_{Tr} (%), produtividade primária bruta-GPP e eficiência do uso da água-WP

Diversos sensores orbitais têm sido empregados na determinação da E_{Tr}, GPP e WP, destacando-se dentre eles, o TM- do Landsat 5, ETM+ do Landsat 7 (Gitelson et al., 2008), o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer – MODIS (Sakamoto et al., 2011) e o Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR (Kitamoto et al., 2007). Os satélites

da série LANDSAT e os sensores alternativos MODIS, tornaram-se as principais ferramentas utilizadas para a estimativa de elementos referentes às condições atmosféricas e terrestres, em virtude da regularidade de visitas, e por seus produtos serem frequentemente utilizadas como elemento base para determinação da produtividade das culturas agrícolas e eficiência do consumo hídrico. As imagens de ambos os sensores se encontram disponíveis gratuitamente, entretanto as cenas dos satélites da série Landsat proporcionam melhor acurácia dos dados e maior facilidade de interpretação dos resultados, devido a melhor resolução espacial, contribuindo assim para maior sensação de realidade (OLIVEIRA et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2014).

Em fevereiro de 2013 ocorreu o lançamento do LDCM (Landsat Data Continuity Mission) ou Landsat 8. Um satélite moderno, que apresenta algumas inovações e melhorias em comparação com os Landsat (5 e 7). Desta maneira, o Landsat 8 veio dar continuidade a esta importante missão, que possibilita fazer estimativas de evapotranspiração tanto de dados passados como futuro (MARKHAM et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2015). As imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS, adquiridas no site da USGS (*United States Geological Survey*) na plataforma “*Earth Explorer*”, constitui excelente fonte de dados para monitoramento dos eventos que ocorrem na superfície terrestre, uma vez que as cenas possuem boa representatividade das condições de cobertura do solo, excelente qualidade de processamento e são fornecidas sem custo para a comunidade científica (CLAVERIE et al., 2015).

3.8.1 Especificações técnicas e inovações presentes no Landsat 8

A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos imageadores: *Operational land Imager (OLI)* e *Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. Os produtos OLI consistem de nove bandas multiespectrais com resolução espacial de 30 metros (bandas de 1 a 7 e 9), a banda 8 do é a pancromática que possui resolução espacial de 15 metros (USGS, 2016). As faixas espectrais do Landsat 8 apresentam finalidades distintas, conforme se observa na Tabela 3. A faixa térmica da banda 10, por exemplo, presente no instrumento imageador TIRS, é bastante útil no fornecimento da temperatura de superfície de forma mais precisas, pois apresenta resolução espacial de 100 metros o pixel (MARKHAM et al., 2014).

As imagens obtidas com o Landsat 8 oferece aos seus usuários algumas inovações que antes não eram possíveis, a citar a possibilidade de fundir a banda PAN (tons de Cinza) de 15 metros de resolução espacial com outras bandas multiespectrais (coloridas) de 30 metros, a resolução espacial final da cena será 15 metros e resolução radiométrica 16 bits, o que permite

um maior e melhor fracionamento dos valores obtidos. Os produtos possuem projeção UTM, georreferenciados ao Datum WGS 1984. O período de revisita permanece de 16 dias, ou seja, o satélite leva 16 dias para realizar outra passagem pela mesma região (USGS, 2016).

Tabela 3. Descrições técnicas das bandas do satélite Landsat 8.

Bandas	Comprimento de Onda (μm)	Resolução (m)
Banda 1 – Aerossóis Costeiros	0.43 – 0.45	30
Banda 2 – Azul	0.45 – 0.51	30
Banda 3 – Verde	0.53 – 0.59	30
Banda 4 – Vermelho	0.64 – 0.67	30
Banda 5 – Infravermelho próximo (NIR)	0.85 – 0.88	30
Banda 6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
Banda 7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
Banda 8 – Pancromática	0.50 – 0.68	15
Banda 9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30
Banda 10 – Infravermelho Térmico (TIRS) 1	10.60 – 11.19	100
Banda 11 – Infravermelho Térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51	100

Fonte: Adaptado de Markham et al. (2014)

4- MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Velha, localizados na região sul do estado do Ceará, com as seguintes coordenadas geográficas: 7°19' de latitude Sul, 39°11' de longitude Oeste e elevação de 403 metros em relação ao nível do mar. Segundo classificação de Koppen-Geiger, o clima na localidade é do tipo quente e úmido (Aw), com regime de chuvas tropical austral (w) totalizando 1.075,8 mm de precipitação média anual, a temperatura média anual situa-se próximo de 24,9 °C, umidade relativa média entre 60 e 80%, taxa de insolação de 2.848 horas anual e velocidade média do vento próximo a 1,90 m s⁻¹, entretanto, a taxa evaporativa supera 2000 mm/ano (LIMA et al., 2017). As áreas utilizadas como parcelas amostrais, foram identificadas apenas com sigla (Figura 5), para preservar a identidade das empresas e manter o senso ético.

4.2 Dados utilizados na pesquisa

Utilizamos como parcelas amostrais os cultivos irrigados pertencentes a três unidades produtoras (SB, SPV e SDS). A unidade produtora (SB) possui 358 hectares, sendo 326,1 cultivados com a variedade Prata Anã e 32,5 hectares da variedade Nanica, dividido em três lotes, assim como a área de cultivo pertencente à empresa (SPV) com 460 hectares, sendo 446 cultivados com a variedade Prata Anã e 14 hectares da variedade Nanica, e o cultivo da empresa (SDS) com 162 hectares cultivados com a variedade Prata Anã. Em todas as unidades produtoras foram identificadas áreas com os seguintes tempo de cultivo: bananeira recém-implantada, bananeira cultivada há quatro anos, cultivo estabelecido entre quatro e dez anos e, por fim, cultivos estabelecidos entre dez e vinte anos.

Foram obtidas imagens geradas pelos sensores OLI/TIRS do satélite Landsat 8, órbita 217 e ponto 65, junto ao USGS (*United States Geological Survey*) na plataforma “*Earth Explorer*”, para os dias: 3 de março, 22 de maio, 9 de julho, 29 de outubro e 14 de novembro de 2016), a passagem do satélite sobre a área de estudo ocorreu aproximadamente às 12h GMT (Greenwich Mean Time) correspondente a 09h no tempo local. A escolha das imagens está condicionada a baixa cobertura de nuvens e excelente qualidade de processamento, atendendo perfeitamente aos requisitos da pesquisa, pois apresenta boa representatividade das condições de cobertura do solo, e do cultivo irrigado da banana no período chuvoso e seco do

ano de 2016, considerado crítico referente à baixa disponibilidade hídrica após cinco anos de seca.

Nos procedimentos para obtenção da evapotranspiração real diária, produtividade primária bruta e eficiência do uso da água do cultivo irrigado, são necessários dados tabulares da plataforma de coleta de dados meteorológicos automatizados (PCD's), como: temperatura do ar, velocidade do vento, temperatura do ponto de orvalho, pressão atmosférica, balanço de radiação, precipitação e outros utilizados nos processos de validação dos modelos e no cálculo da evapotranspiração de referência-ET_o, através do software Ref ET (ALLEN, 2010). Para realização da pesquisa foram adquiridas, junto ao Instituto Nacional de Meteorologia-INMET, informações climáticas coletadas pela Estação Meteorológica Automática-EMA em Barbalha, localizada nas seguintes coordenadas 7°18'45" Sul de Latitude, 39°16'10" Oeste de Longitude e 409,03 metros de altitude (INMET, 2016). A EMA se encontra a aproximadamente treze quilômetros das áreas cultivadas com banana.

O processamento dos modelos teve início após a obtenção, empilhamento e calibração das imagens. Foi realizada a composição com sete bandas espectrais, algumas com resolução espacial de 30 m (bandas 2, 3, 4, 5 e 7) e a (banda 10), banda termal com resolução de 100 m, como apresentado na Tabela 4. Para tanto, torna-se necessário à identificação de alguns parâmetros de ajuste utilizados no cômputo das diferentes componentes dos balanços de radiação e energia, apresentados na Tabela 5: Ângulo de elevação solar - E (degree), Cosseno do ângulo zenital - Cos Z (°), Temperatura do ar - Ta (°C), Umidade Relativa do ar - RU (%), Pressão atmosférica - Po (kPa), Transmitância Atmosférica - (τ_{oc}) e distância média entre a Terra e o Sol - dr em (unidade astronômica), para uma referida data no calendário Juliano (DJ). O processamento das imagens e dos modelos foi realizado no software ERDAS Imagine, versão 9.3, enquanto que a confecção das tabelas e dados prévios para processamento estatístico foi realizado no Excel 2010, e os mapas foram confeccionados através do software Qgis, versão 2.18.

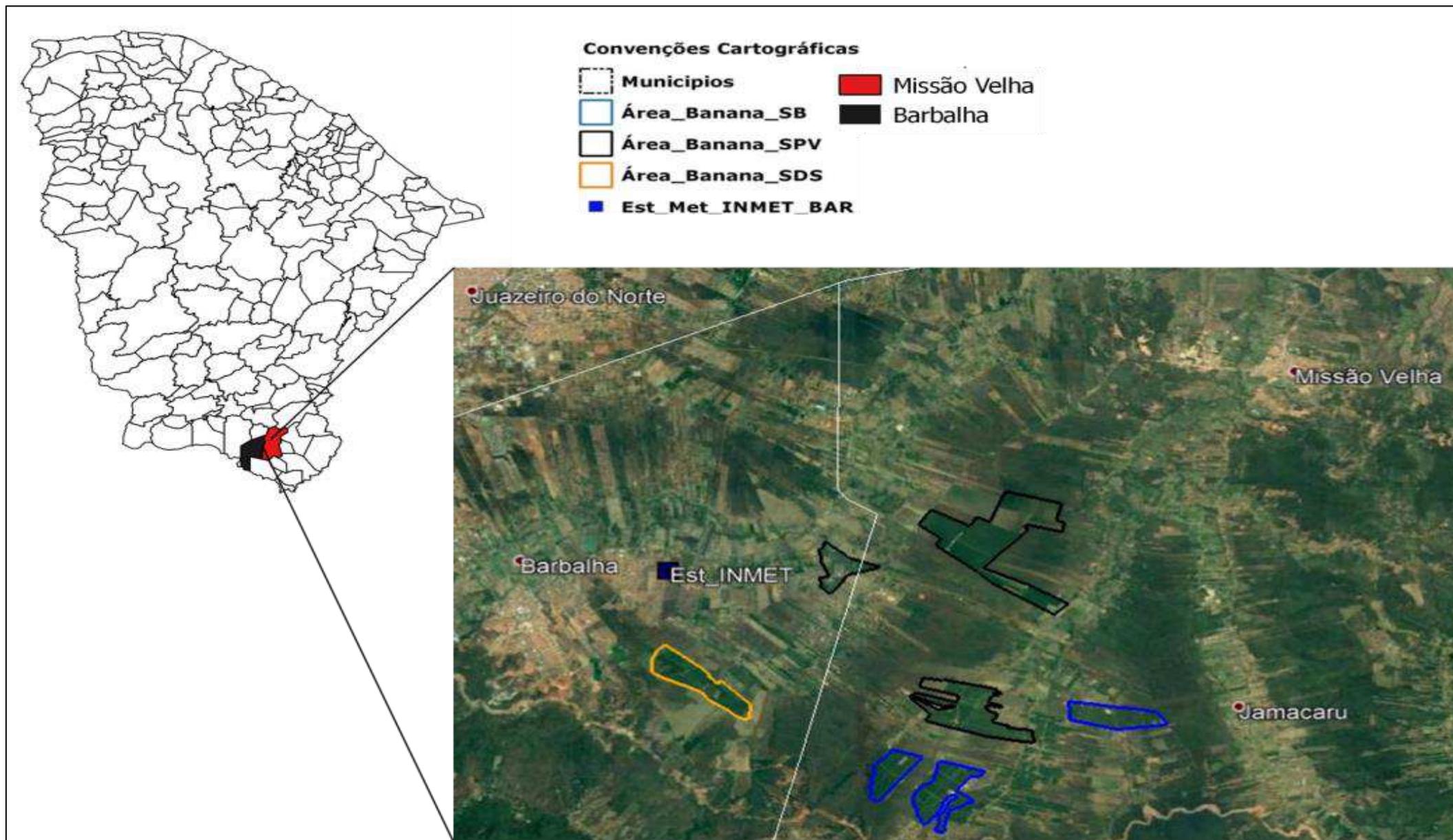


Figura 5. Localização da área em estudo, destacando o cultivo da bananeira nas unidades produtoras (SB, SPV e SDS), na divisa dos municípios de Barbalha e Missão Velha, Ceará, Brasil.

Fonte: Bezerra et al. (2017)

Tabela 4. Parâmetros da superfície obtidos a partir do processamento das imagens do Satélite Landsat 8 (OLI/TIRS).

Parâmetros	Bandas	Resolução Espacial (m)
Radiância	2 a 7	30
Reflectância	2 a 7	30
Albedo	2 a 7	30
NDVI	4 e 5	30
Temperatura	10	100

Fonte: Bezerra et al. (2017)

Tabela 5. Variáveis utilizadas para calcular a reflectância, transmitância e albedo, durante o cultivo da bananeira.

Data	DJ	E (Grau)	Cos Z	Ta (° C)	UR (%)	Po (KPa)	τ_{oc}	d_r
3/03/2016	63	59,29	0,86	28,25	53,5	96,6	0,742	0,9914
22/05/2016	143	51,43	0,78	27,9	50,0	96,8	0,737	1,0124
9/07/2016	191	48,85	0,75	26,5	52,2	97,0	0,736	1,0166
29/10/2016	303	65,74	0,90	28,85	43,0	96,6	0,768	0,9931
14/11/2016	319	64,11	0,89	30,45	45,5	96,2	0,754	0,9891

Fonte: Bezerra et al. (2017)

4.3 Variáveis analisadas

4.3.1 Cobertura do solo

Para analisar o grau de influência dos fatores edafoclimáticos sobre a evapotranspiração real, produtividade primária bruta e eficiência do uso da água do cultivo irrigado da banana, durante o período chuvoso e seco, foram confeccionados mapas de uso e ocupação do solo, com base na técnica de classificação supervisionada. Essa técnica permite correlacionar os valores espectrais dos pixels com as classes de cobertura no solo, de modo que o usuário indique várias regiões com características espectrais conhecidas e o algoritmo escolhido realiza a extrapolação e classificação do restante da imagem (ZHONG et al., 2016; EGOROV et al., 2015).

4.3.2 Evapotranspiração real (%)

A estimativa da evapotranspiração real-(ET_r %) foi obtida por meio do algoritmo de balanço de energia METRIC (Mapping evapotranspiration at high resolution and with internalized calibration). Esse modelo possui várias etapas sequenciais para o cômputo da

evapotranspiração com base nos elementos do balanço de energia na superfície. Em cada uma delas é realizado o cômputo de uma ou mais variáveis necessárias para as etapas seguintes (ALLEN et al., 2010). De forma resumida o fluxograma esquemático, apresentado na Figura 6, descreve como foi realizado o compilamento dos dados e o processamento do modelo para obtenção dos componentes do balanço de energia e taxa de evapotranspiração real do cultivo da banana.

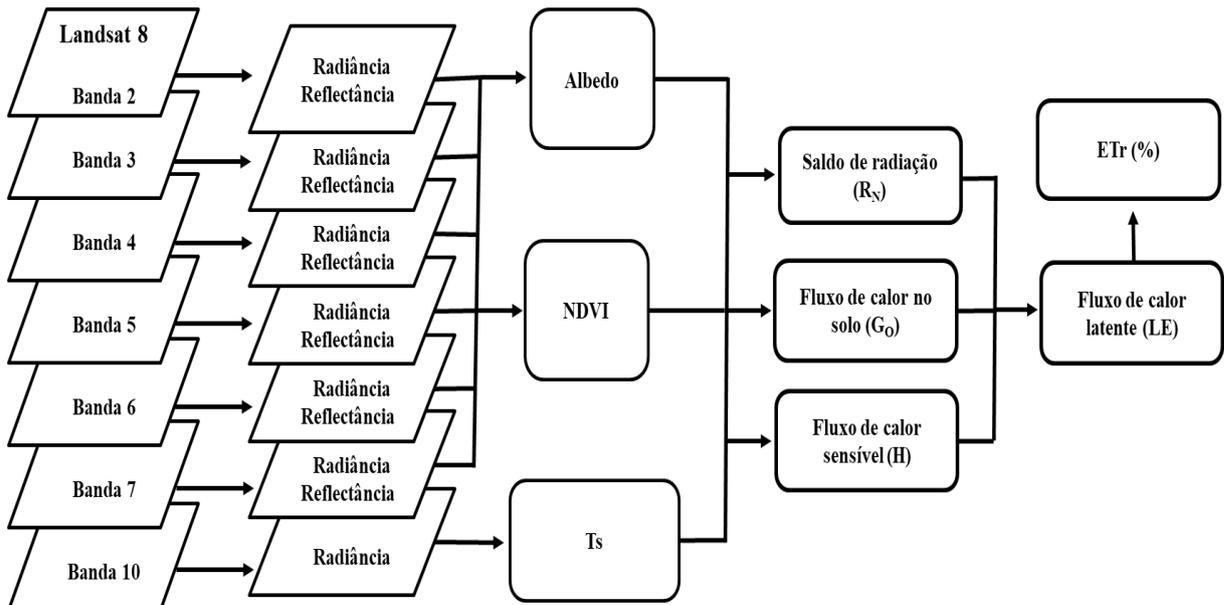


Figura 6. Fluxograma esquemático do METRIC, para obtenção dos elementos do balanço de energia e ETr %.

Fonte: Bezerra et al. (2017)

As etapas computacionais para obtenção dos elementos do balanço de energia da superfície, se encerra ao colocar o fluxo de calor latente (LE) em evidência e realizar a simples diferença entre o saldo de radiação (R_n), o fluxo de calor no solo (G₀) e o fluxo de calor sensível (H), conforme a Equação (1). Para se chegar a tal ponto, torna-se necessário transpor várias etapas sequenciais, as quais serão elucidadas no decorrer do manuscrito.

$$LE = R_n - G - H \quad (1)$$

em que:

R_n: Saldo de radiação (Wm⁻²);

G: Fluxos de calor para solo (Wm⁻²);

H: Fluxo calor sensível (Wm⁻²);

LE: Fluxo de calor latente (Wm⁻²).

Etapa 1 - Radiância

A radiância espectral de cada banda (L_b) é o início efetivo do cálculo do balanço de radiação e consiste em conversão do Nível de Cinza ou Número Digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática. Para as bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7, essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda. Já para a banda 10, segundo a equação de Chander & Markham (2009), representa a energia emitida por cada pixel. A radiância monocromática de cada uma das sete bandas é obtida segundo a equação 2. Os parâmetros de calibração utilizados para o cálculo da radiância espectral, apresentados na Tabela 6, são obtidos nos meta dados fornecidos junto com as imagens.

$$L_b = \left(\frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) \times (DN - Q_{calmin}) + L_{MIN} \quad (2)$$

em que:

L_b : Radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$);

L_{MIN} e L_{MAX} : Coeficientes de calibração (radiância espectral mínima e radiância espectral máxima) de cada banda em ($Wm^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$);

Q_{calmin} e Q_{calmax} : Valores quantizados e calibrados do nível de cinza para cada pixel (variando de 1 a 65365);

DN : Número digital de cada pixel na imagem.

Tabela 6. Coeficientes de calibração para as bandas do satélite Landsat 8 (OLI/TIRS).

Bandas	Coeficientes de Calibração ($w m^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$)		Quantizado e calibrado do pixel em nível de cinza (ND)		Irradiância Espectral ESUN_TOA ($w m^{-2} \mu m^{-1}$)
	LMIN	LMAX	Qcalmin	Qcalmax	
Banda 2	-65,4	791,7	1	65535	2006
Banda 3	-60,2	729,5	1	65535	1818
Banda 4	-50,8	615,2	1	65535	1553
Banda 5	-31,1	376,5	1	65535	1003
Banda 6	-7,7	93,6	1	65535	250,9
Banda 10	0,1	22,0	1	65535	1
Banda 7	-2,6	31,1	1	65535	89,59

Fonte: Bezerra et al. (2017)

Etapa 2 - Reflectância

A reflectância ($\rho_{t,b}$) monocromática (recebida pelo satélite) mede a capacidade de um objeto de refletir a energia radiante e é definida como sendo uma relação entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente, podendo ser medida pela equação (3):

$$\rho_{t,b} = \frac{\pi L_b}{ESUN_b \cdot \cos\theta \cdot d_r} \quad (3)$$

em que:

L_b : Radiância espectral de cada banda ($Wm^{-2} st^{-1} \mu m^{-1}$);

$ESUN_b$: Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$), apresentado na (Tabela 6);

θ : Ângulo zenital solar ($^\circ$)

d_r : Quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (unidade astronômica) em determinado dia do ano, de acordo com o calendário juliano (DJ), elementos fornecidos na Tabela 5.

Este último parâmetro (d_r) é determinado, segundo Tasumi (2003), pela equação (4):

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DJ \frac{2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

O ângulo zenital solar é obtido diretamente do cabeçalho da imagem, ou pode ser estimado pela equação (5):

$$\cos\theta = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad (5)$$

em que:

φ : Latitude do centro da imagem (radianos);

δ : Declinação solar (radianos);

ω : Ângulo horário do sol (radianos).

A refletância na superfície ($\rho_{s,b}$) para bandas de ondas curtas é corrigida banda por banda usando a seguinte equação (6), conforme Tasumi et al. (2005).

$$\rho_{s,b} = \frac{\rho_{t,b} - C_b(1 - \tau_{in,b})}{\tau_{in,b} \cdot \tau_{out,b}} \quad (6)$$

em que:

$\rho_{t,b}$: Refletância no satélite para banda b;

$\tau_{in,b}$ e $\tau_{out,b}$: Transmitância para radiação solar de chegada (in) e de saída (out).

Etapa 3 - Albedo

O albedo planetário (α_{toa}) representa o albedo de cada pixel na imagem sendo obtida pela combinação linear das refletâncias na superfície, qual seja a banda, conforme a equação (7):

$$\alpha = 0,254\rho_2 + 0,149\rho_3 + 0,147\rho_4 + 0,311\rho_5 + 0,103\rho_6 + 0,036\rho_7 \quad (7)$$

em que:

$\rho_2, \rho_3, \rho_4, \rho_5, \rho_6$ e ρ_7 são as reflectâncias monocromáticas das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 na superfície, respectivamente.

Etapa 4 - Índices de vegetação

Dentre os vários índices de vegetação existem, os mais indicados são: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF).

O NDVI é definido como sendo um indicativo da quantidade e condição da massa verde na superfície da vegetação e é obtido segundo Allen et al. (2010), pela equação (8). Os valores do NDVI variam de -1 a +1; no entanto, em superfícies vegetadas esses valores sempre são positivos, indo de 0 a +1 e em nuvens e espelhos d'água, os valores são geralmente negativos.

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (8)$$

em que:

ρ_{iv} : Refletividade da banda 5 (infravermelho próximo);

ρ_v : Refletividade da banda 4 (vermelho).

SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) é uma variação do NDVI, que consiste em amenizar os efeitos do solo sobre as características da vegetação local, e, portanto gerando dados de NDVI ajustados. Esse ajuste tem como objetivo principal estabelecer maior correlação entre áreas que possuem vegetação com características compatíveis (DOUGHTY et al., 2018). O SAVI pode ser obtido pela seguinte equação (9):

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv} - \rho_v)}{(L \rho_{iv} + \rho_v)} \quad (9)$$

em que:

ρ_{iv} : Refletividade da banda 5 (infravermelho próximo);

ρ_v : Refletividade da banda 4 (vermelha);

L: o fator de ajuste ao solo igual a 0,5.

IAF é definido como sendo a razão entre a área foliar de toda a vegetação pela unidade de área ocupada por ela, sendo “indicador da biomassa” de cada pixel na imagem. É obtido pela equação (10), segundo Allen et al. (2010).

$$IAF = \begin{cases} 11 \times SAVI^3 & \text{para } SAVI < 0,817 \\ 6 & \text{para } SAVI > 0,817 \end{cases} \quad (10)$$

em que:

IAF: Índice de área foliar;

SAVI: Índice da vegetação ajustado ao solo.

Etapa 5 - Emissividades

A emissividade de um corpo é definida como a razão entre a energia emitida pelo mesmo e a energia emitida por um corpo negro, ambos a uma mesma temperatura. Conforme Allen et al. (2010), no METRIC, as emissividades na faixa espectral da banda termal dos satélites da série LANDSAT- ϵ_{NB} e em todo domínio da radiação termal - ϵ_0 podem ser obtidas segundo as equações 11, 12, 13 e 14:

$$\text{Para NDVI} > 0 \text{ e } IAF \leq 3 \begin{cases} \epsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 \times IAF \\ \epsilon_0 = 0,97 + 0,01 \times IAF \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Para NDVI} > 0 \text{ e } IAF > 3 \begin{cases} \epsilon_{NB} = 0,98 \\ \epsilon_0 = 0,98 \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{Para NDVI} \leq 0 \text{ e } \alpha < 0,47 \begin{cases} \epsilon_{NB} = 0,99 \\ \epsilon_0 = 0,985 \end{cases} \text{ (Água)} \quad (13)$$

$$\text{Para NDVI} \leq 0 \text{ e } \alpha \geq 0,47 \begin{cases} \epsilon_{NB} = 0,99 \\ \epsilon_0 = 0,985 \end{cases} \text{ (Neve)} \quad (14)$$

em que:

IAF: Índice de área foliar.

Etapa 6 - Temperatura da superfície

A temperatura da superfície (T_s) é obtida com base na radiância espectral da banda termal (10) e emissividade (ϵ_{NB}), obtida na etapa anterior. A Equação (15) é usada para sua obtenção da temperatura em Kelvin (K).

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (15)$$

em que:

K1: 774,8853 ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) e K2: 1321,0789 (Kelvin) são constantes de calibração da banda termal do LANDSAT 8, presente nos meta dados das imagens (USGS, 2016);

Rc: Radiância termal da superfície corrigida.

Etapa 7 - Saldo de radiação (R_n)

O saldo de radiação à superfície é obtido utilizando a equação de balanço de radiação à superfície (ALLEN et al., 2010). Os componentes do balanço de radiação na superfície são obtidos segundo a equação (16), o desdobramento da mesma encontra-se no Apêndice A.

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\uparrow} - R_{L\downarrow} - (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (16)$$

em que:

$R_{s\downarrow}$: Radiação de onda curta incidente;

α : Albedo corrigido do pixel;

$R_{L\downarrow}$: Radiação de onda longa emitida pela atmosfera;

$R_{L\uparrow}$: Radiação de onda longa emitida pelo pixel;

ε_0 : Emissividade do pixel.

Simplificando a expressão anterior, obtemos a equação (17):

$$R_n = R_{s\downarrow}(1 - \alpha) - R_{L\uparrow} + \varepsilon_0 R_{L\downarrow} \quad (17)$$

Etapa 8 - Fluxo de calor no solo (G)

Bastiaanssen (2001) desenvolveu uma equação empírica, válida para o meio-dia, destinada ao cálculo do fluxo de calor no solo, segundo a equação (18):

$$G = [T_{s\downarrow}(0,0038 + 0,0074\alpha)(1 - 0,98NDVI^4)]R_n \quad (18)$$

Para a correção de valores do fluxo de calor no solo de acordo com o índice e vegetação, temperatura e umidade da superfície utilizam-se as equações 19, 20, 21 e 22 segundo (Allen et al., 2010):

$$\text{Para } NDVI < 0 \{G = 0,5 \times R_n \text{ (água)} \quad (19)$$

$$\text{Para } T_s < 4^\circ C \text{ e } \alpha > 0,47 \{G = 0,5 \times R_n \text{ (Neve)} \quad (20)$$

$$\text{Para } IAF > 0,5 \{G = (0,05 + 0,018e^{-0,521IAF}) \times R_n \quad (21)$$

$$\text{Para } IAF < 0,5 \left\{ G = \left(\frac{1,80 \times (T_s - 273,16)}{R_n + 0,084} \right) \times R_n \quad (22)$$

em que:

T_s : Temperatura da superfície (°C);

α : Albedo corrigido do pixel;

NDVI: Índice de vegetação por diferença normalizada;

IAF: Índice de Área Foliar;

R_n : Saldo de Radiação.

Etapa 9 - Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível (H) é obtido segundo a equação (23). No entanto, para consegui-lo, é necessário calcular antecipadamente alguns outros parâmetros, onde são necessários dados de estação meteorológica representativa da imagem, como a velocidade do vento ($m s^{-1}$) e a altura média da vegetação em torno da estação (adotado como igual a 0,3 m). O que torna necessária a caracterização de dois pixels importantes dentro da cena da imagem, sendo os mesmos denominados pixel quente (hot pixel) e pixel frio (cold pixel) e apresentando características distintas (Apêndice B).

$$H = \frac{(\rho \times C_p \times dT)}{r_{ah}} \quad (23)$$

em que:

ρ : Densidade do ar ($kg m^{-3}$);

C_p : Fluxo específico do ar ($1004 J kg^{-1}K^{-1}$);

dT: Variação de temperatura (T1-T2 em Kelvin) e elevações (z1 e z2);

r_{ah} : Fluxo de transporte e resistência aerodinâmico (sm^{-1}).

Etapa 10 - Fluxo de calor latente (LE)

Após obtenção dos valores do saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G) e fluxo de calor sensível (H), calculou-se o fluxo de calor latente (LE), através da equação (24):

$$LE = Rn - G - H \quad (24)$$

Etapa 11 - Evapotranspiração diária (ET24h)

Para a obtenção da evapotranspiração diária, necessita-se inicialmente obter a evapotranspiração instantânea (ET_{inst}), segundo a equação (25):

$$ET_{inst} = 3600 \times \frac{LE}{\lambda} \quad (25)$$

em que:

ET_{inst} : Evapotranspiração instantânea ($mm h^{-1}$);

LE: Fluxo de calor latente;

3600: Fator de conversão de segundos para horas;

λ : Calor latente de vaporização ou o calor absorvido quando um quilograma de água evapora ($J kg^{-1}$).

O calor latente de vaporização da água pode ser determinado segundo a equação (26):

$$\lambda = (2,501 - 0,00236(T_s - 273)) \times 10^6 \quad (26)$$

Posteriormente, obtém-se a fração da evapotranspiração de referência (ET_{rf}) horária, aproximadamente constante durante todo o dia, em casos onde a cultura encontra-se isenta de estresse hídrico ou sanitário a fração de evapotranspiração corresponde ao coeficiente de cultivo (K_c), obtida segundo a equação (27):

$$ET_{rf} \text{ ou } K_c = \frac{ET_{inst}}{ET_0} \quad (27)$$

em que:

ET_{inst}: Evapotranspiração instantânea (mm h⁻¹);

ET₀: Evapotranspiração de referência (mm h⁻¹).

Considerando que a fração de evapotranspiração de referência instantânea é igual à fração de evapotranspiração de referência de 24 horas, obtém-se a ET_{rf} de acordo com a equação (28):

$$ET_{rf} = ET_{rf_{24h}} = \frac{ET_{inst}}{ET_{0_{inst}}} = \frac{ET_{24h}}{ET_{0_{24h}}} \quad (28)$$

em que:

ET_{rf_{24h}}: Fração de evapotranspiração de referência de 24 horas;

ET_{24h}: Evapotranspiração real de 24 horas;

ET_{0_{24h}} : Evapotranspiração de referência em 24 horas.

Assim sendo, a evapotranspiração acumulada (24 horas) pode facilmente ser obtida através da seguinte equação.

$$ET_{24h} = ET_{rf} \times ET_{0_{24h}} \quad (29)$$

em que:

ET_{24h}: Evapotranspiração (mm dia⁻¹) acumulado em 24 horas;

ET_{rf}: Fração de evapotranspiração;

ET_{0_{24h}} : Evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹) em 24 horas.

A evapotranspiração de referência de 24 hora (ET_{0_{24h}}) foi obtida pelo método da PenmanMonteith-FAO56, que define a ET₀ em função de uma cultura de referência hipotética de altura 0,12 m, um valor fixo de resistência da superfície (70 s m⁻¹) e albedo (0.23). O valor da ET₀ horária é válido para o horário entre 9:00 h a 10:00 h (horário local), compreendendo o intervalo de passagem do Landsat 8 sobre a área em estudo. O desdobramento dos componentes da equação PenmanMonteith-FAO56, encontra-se no Apêndice C.

$$ET_{0_{24h}} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (30)$$

em que:

ET_{0_{24h}}: Evapotranspiração da cultura de referência (mm d⁻¹);

Rn: Radiação líquida na superfície da cultura ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);
 G: Fluxo de calor do solo ($\text{Mj.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$);
 T: Temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
 U₂: Velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1});
 e_s - e_a: Déficit da pressão de vapor (Kpa);
 Δ: Variação da declividade da curva da pressão de vapor (Kpa);
 γ: Constante psicométrica ($\text{Kpa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);
 900: Fator de conversão.

Etapa 12 – Determinação evapotranspiração real-ETr(%)

A evapotranspiração real-ETr(%), corresponde a variação percentual da evapotranspiração real-ETr, observada para o cultivo agrícola irrigado ou sequeiro e para vegetação nativa, em relação à ETr máxima, referente ao cultivo irrigado. Por tanto, a ETr(%) foi determinada pela relação entre a ETr_{local} e ETr_{máx}, segundo a equação (31):

$$\text{ETr (\%)} = \frac{\text{ETr}_{\text{Local}}}{\text{ETr}_{\text{máx}}} \times 100 \quad (31)$$

em que:

ETr (%): Variação percentual da evapotranspiração real;

ETr_{Local}: Evapotranspiração real local;

ETr_{Máx}: Evapotranspiração real máxima observada para o cultivo irrigado.

4.3.3 Produtividade primária bruta (GPP)

A produtividade primária bruta, do inglês (Gross Primary Productivity-GPP) corresponde à fotossíntese bruta, parâmetro crítico para as pesquisas relacionadas ao ciclo do carbono e às mudanças climáticas, podendo ser usada para mensurar a quantidade total de energia ou carbono produzida pela planta em um período de tempo, através da fotossíntese (DELGADO et al., 2018b).

A sua determinação com sensoriamento remoto pode ser realizada através do compilamento dos modelos de estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela vegetação-RFAA, proposto por Monteith (1972), e eficiência do uso da luz, do inglês (Light Use Efficiency-LUE) na fotossíntese de Field et al. (1995), adaptado por Bastiaanssen e Ali (2003), que sugerem o emprego da fração evaporativa-FE como elemento quantificador do status da água pela vegetação (DOUGHTY et al., 2018).

Para estimar o acúmulo de biomassa da vegetação para um dado período, utiliza-se a equação (32), proposta por Bastiaanssen e Ali (2003).

$$GPP = \varepsilon \times \sum (APAR(t)t) \quad (32)$$

em que:

GPP: Produtividade primária bruta (kg m^{-2});

ε : Eficiência do uso da luz (g MJ^{-1});

APAR: Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (W m^{-2});

t: Tempo (dias, mês e ano).

A APAR foi calculada a partir das equações (33 e 34) segundo Bastiaanssen e Ali, (2003):

$$APAR = f \times PAR \quad (33)$$

em que:

PAR: Radiação fotossinteticamente ativa de grande escala (W m^{-2}) calculado através da equação (34):

$$PAR = a \times R_{s_24h} \quad (34)$$

em que:

a: Porcentagem da R_{s_24h} referente à radiação fotossinteticamente ativa, usada para ativação da clorofila foliar no processo de fotossíntese. Segundo Silva et al. (2013) o valor de (a) indicado para as condições semiáridas brasileiras é 0,48.

f: Fração da radiação fotossinteticamente ativa, interceptada pela área foliar da planta. Segundo Bastiaanssen e Ali. (2003) pode ser obtida pela equação (35):

$$f = (-0,161 + 1,257 \times \text{NDVI}) \quad (35)$$

em que:

NDVI: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada;

1,257 e -0,161: Coeficientes de ajuste da equação, obtidos por regressão, referentes à mistura de culturas irrigadas encontradas na área de interesse (TEIXEIRA et al., 2014).

A eficiência do uso de luz - ε (g C MJ^{-1}), ou eficiência real do uso da luz, varia ao longo da estação de crescimento da planta, portanto será menor do que o valor ε máximo. Embora, dependa de outros elementos da comunidade vegetal, pode ser quantificada pelo modelo de Field *et al.* (1995), modificado por Bastiaanssen e Ali (2003), através da equação (36):

$$\varepsilon = \varepsilon' \times T1 \times T2 \times W \quad (36)$$

em que:

ϵ' : Fator de conversão máximo da luz para produção de biomassa acima do solo quando as condições ambientais são ótimas, no caso do cultivo da banana classificada como C3, considerou-se o valor de 2,5 (g MJ⁻¹), indicado por Bastiaanssen e Ali, (2003), para maioria das plantas (C3, e C4);

Os termos T1 e T2 da equação 36 refletem a contribuição da temperatura na eficiência de uso da luz pelas plantas, podendo ser calculados pelas equações 37 e 38.

$$T_1 = 0,8 + 0,02T_{opt} - 0,0005T_{opt}^2 \quad (37)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2T_{opt} - 10 - T_{dia})} \times \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{dia})]} \quad (38)$$

em que:

T_{opt}: Temperatura média do ar (°C) do mês de máximo NDVI;

T_{dia}: Temperatura média diária do ar (°C).

A fração evaporativa – W, representa a contribuição da água na fotossíntese e pode ser determinada com base nos valores instantâneos de R_n, G e LE calculados anteriormente utilizando o algoritmo METRIC (ALLEN *et al.*, 2010), modificado por (BASTIAANSSEN E ALI, 2003), calculado pela equação (39):

$$W = \Lambda = \frac{LE}{R_n - G_0} \quad (39)$$

4.3.4 Eficiência do uso da água (WP)

A eficiência do uso da água de irrigação, do inglês (water productivity-WP), expressa em Kg m⁻³, consiste da relação existente entre a produtividade primária bruta-GPP, representando a quantidade de carbono fixado pela vegetação, por unidade de área, em um dado período de tempo e a quantidade de água fornecida via irrigação com base na evapotranspiração real da cultura (ETr). Assim, determinando-se quantos metros cúbicos de água foram utilizados para se fixar um quilograma de carbono (TEIXEIRA *et al.*, 2014).

A estimativa da eficiência do uso da água, relacionada a culturas irrigadas e vegetação natural, pode ser obtida através de técnica de sensoriamento remoto por imagens de satélite, segundo Teixeira *et al.* (2013), a partir da equação 40:

$$WP = \frac{GPP}{ETr} \quad (40)$$

em que:

WP: Eficiência do uso da água (Kg m⁻³);

GPP: Produtividade primária bruta (Kg m⁻²);

ETr: Evapotranspiração real da cultura (mm).

4.4 Análises estatísticas

Tendo em vista que é um cultivo irrigado, não havendo grandes variações no suprimento hídrico à cultura, realizou-se um experimento em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3x3 (três unidades produtoras e três tempos de cultivo), com 5 repetições (avaliações no tempo: 3 de março, 22 de maio, 9 de julho, 29 de outubro e 14 de novembro de 2016). As variáveis foram submetidas à análise de variância pelo teste F e quando significativas, foram submetidas ao teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o software estatístico SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2011).

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise espaço-temporal da cobertura do solo

A disposição dos dados climáticos auxilia no entendimento da íntima relação existente entre as condições edafoclimáticas locais e as variações decorrentes na superfície do solo durante o ano de 2016. Na Figura 7, pode-se observar valores médios mensais de precipitação e as temperaturas máxima e mínima para o período de avaliação. Com base nessa figura, pode-se inferir que os meses mais quentes foram outubro e novembro, com temperatura máxima média em torno de 35 °C, enquanto que nos meses de julho e agosto, observam-se baixa temperatura média mínima, com valores em torno de 20 °C.

Em relação à precipitação, houve predominância de chuvas no início do ano, com destaque para os meses de janeiro, fevereiro e março, com variações entre dois e oito milímetros, corroborando com a literatura consultada, uma vez que Medeiros et al. (2013), confirmou a predominância de déficit hídrico na região metropolitana do Cariri, cearense durante maioria dos meses do ano.

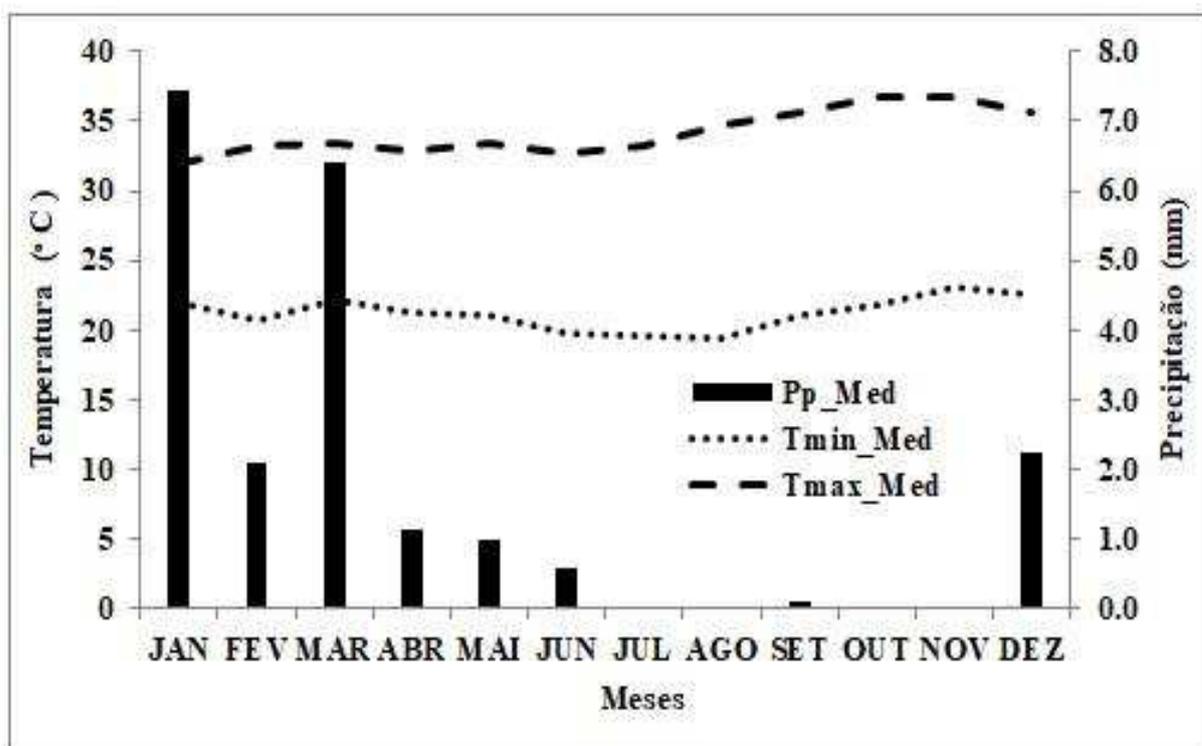


Figura 7. Valores médios mensais da precipitação e temperaturas do ar, para a região metropolitana do Cariri, cearense durante o período de janeiro a dezembro de 2016.

Através da técnica da classificação supervisionada, foram confeccionados mapas de uso e ocupação do solo (Figura 8), possibilitando analisar o grau de influência exercido pelos

fatores edafoclimáticos sobre a vegetação nativa e cultivo irrigado da bananeira das três unidades produtoras, em diferentes cenários no decorrer do ano de 2016. A vegetação no entorno das parcelas amostrais foi dividida em três classes, denominadas como vegetação densa com exemplares arbustivos, semi-densa com exemplares arbóreos e rala contemplando a pastagem nativa ou cultivada, constituída principalmente por gramíneas e plantas rasteiras, corroborando com Brandão et al. (2012).

Já o cultivo irrigado da banana foi dividido de acordo com o tempo de implantação, onde se podem observar áreas recém-implantadas, áreas com cultivos estabelecidos há quatro anos, áreas com período de cultivo entre quatro e dez anos, e por fim, áreas cultivadas com mais de vinte anos. Nas imagens foram identificadas ainda, informações típicas de solo exposto, água, nuvens e sombra das nuvens.

A baixa disponibilidade hídrica entre os meses de abril e novembro (Figura 8) compromete a retenção de umidade do solo, deixando a vegetação nativa à mercê do déficit hídrico. Como mecanismo de adaptação, a vegetação da caatinga, tende a perder suas folhas, deixando o solo relativamente exposto, com destaque para as Figuras 8C, 8D e 8E, elevando a incidências dos raios solares sobre a superfície e, conseqüentemente, a temperatura do solo, fato esse que influencia diretamente na taxa de evapotranspiração das áreas irrigadas.

Apesar do advento da baixa disponibilidade hídrica, no decorrer dos meses do ano de 2016, as áreas cultivadas com banana permaneceram praticamente intactas, ressaltando a importância do fornecimento hídrico via irrigação para manutenção das atividades fisiológicas da cultura, assim como descrito por Silva et al. (2012). Na imagem do dia 14 de novembro de 2016 (Figura 8 E) é possível observar a presença de nuvens, em decorrência do aumento da nebulosidade sobre a localidade o que tende a amenizar a sensação térmica. Tal fato ocorre devido às proximidades do início do período chuvoso, transcorrendo entre os meses de dezembro a maio, corroborando com (MEDEIROS et al., 2013).

Os municípios produtores de banana na Região Metropolitana do Cariri cearense apresentam aptidão agrícola para o desenvolvimento do cultivo irrigado, tendo em vista, a localização geográfica e as condições edafoclimáticas ser favoráveis, preenchendo quase todos os requisitos necessários ao desenvolvimento da cultura. Entretanto, a expansão das áreas de cultivo nas unidades produtoras, encontra-se limitada pelo fator água, uma vez que o volume anual de chuvas precipitado não é suficiente para atender o requerimento hídrico total da cultura durante todo o período de safra, portanto, se fazendo necessária a retirada de água

do lençol freático para complementação da demanda hídrica através da irrigação, como apresentado na Figura 9.

Por tanto, constata-se que os fatores edafoclimáticos não exercem efeito deletério sobre a taxa de evapotranspiração real, produtividade primária bruta e eficiência do uso da água do cultivo irrigado, tendo em vista que o fornecimento da demanda hídrica ocorre controladamente independente do período do ano. Infelizmente não se pode dizer o mesmo referente ao cultivo de sequeiro ou da vegetação nativa, uma vez que os mesmos padecem severamente durante o período de restrição hídrica ou de seca.

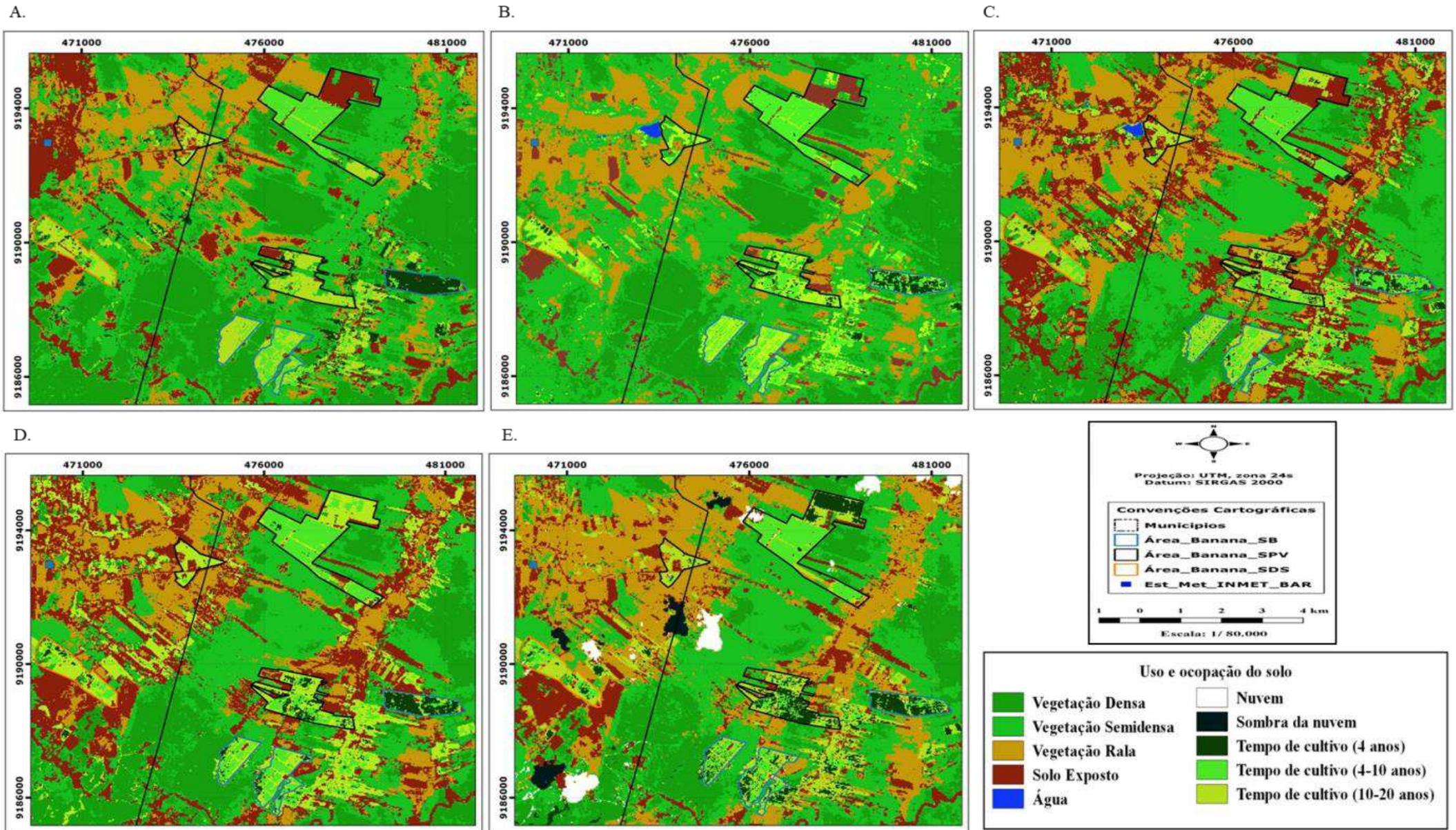


Figura 8. Uso e ocupação do solo da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

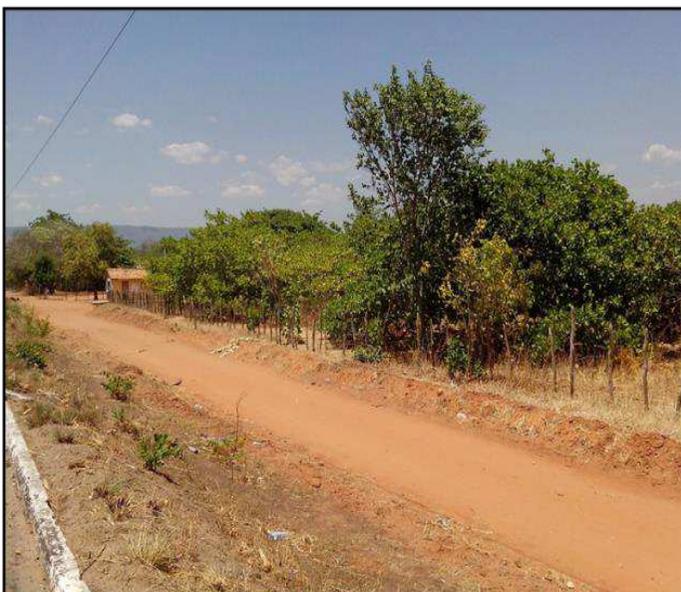


Figura 9. Fotos das modificações ocorridas no entorno das unidades produtoras de banana para o período chuvoso e seco do ano de 2016.

5.2 Análise espaço-temporal da evapotranspiração real (ETr %)

O cultivo irrigado e sequeiro, assim como a vegetação nativa no entorno das unidades produtoras (SB, SPV e SDS) apresenta ETr % entre 90 e 100% como observado nas Figuras 11A e 11B. A variação observada corresponde a 10% da ETr do cultivo irrigado com valor de referencia 7 a 8 mm, como apresentado na Figura 10. A variação observada para ETr % está diretamente relacionado ao período chuvoso, alta umidade do solo, ocorrência de nebulosidade, presença de cobertura vegetal e temperaturas amenas, indicando nível de estresse hídrico baixo, indo de acordo com Shapland (2016).

Com o passar dos meses de julho, outubro e novembro (Figuras 11C, 11D e 11E), a baixa pluviometria contribuiu para a redução da umidade do solo e consequentemente do índice de área foliar (Figura 13) e o solo descoberto favorece o aumento da temperatura da superfície. Nesse cenário, a produtividade do cultivo de sequeiro e da vegetação no entorno do cultivo irrigado encontra-se comprometida, tendo em vista apresentar variação da ETr entre 40 a 60% em relação a ETr de 7 ou 8 mm referente ao cultivo irrigado, como apresentado na Figura 10.

A variação de ETr observada entre o cultivo irrigado, sequeiro e vegetação nativa, indica níveis de estresse hídrico extremo. Esse resultado se assemelha ao encontrado por Shapland (2016), ao afirmar que variações da ETr abaixo de 65% tende a comprometer a sanidade, atividade fotossintética, produção de biomassa e produtividade das culturas que esboçam elevada sensibilidade ao déficit hídrico.

Quando analisado isoladamente, percebe-se que o cultivo irrigado da bananeira dentro das unidades produtoras (SB, SPV e SDS) apresenta valores de ETr (%) entre 70 e 90%, para aos meses de março, maio e julho (Figura 9A, 9B e 9C) e 90 a 100% durante os meses de outubro e novembro (Figura 9D e 9E), assim como verificado por (BEZERRA et al., 2017). Tais resultados evidenciam variação de aproximadamente 30% da ETr máxima de 7 a 8 mm referente ao cultivo irrigado, indicando que o cultivo da bananeira em ambas as unidades produtores encontra-se saudável, em pleno potencial produtivo, e sobre nível de estresse hídrico baixo, corroborando com Shapland (2016).

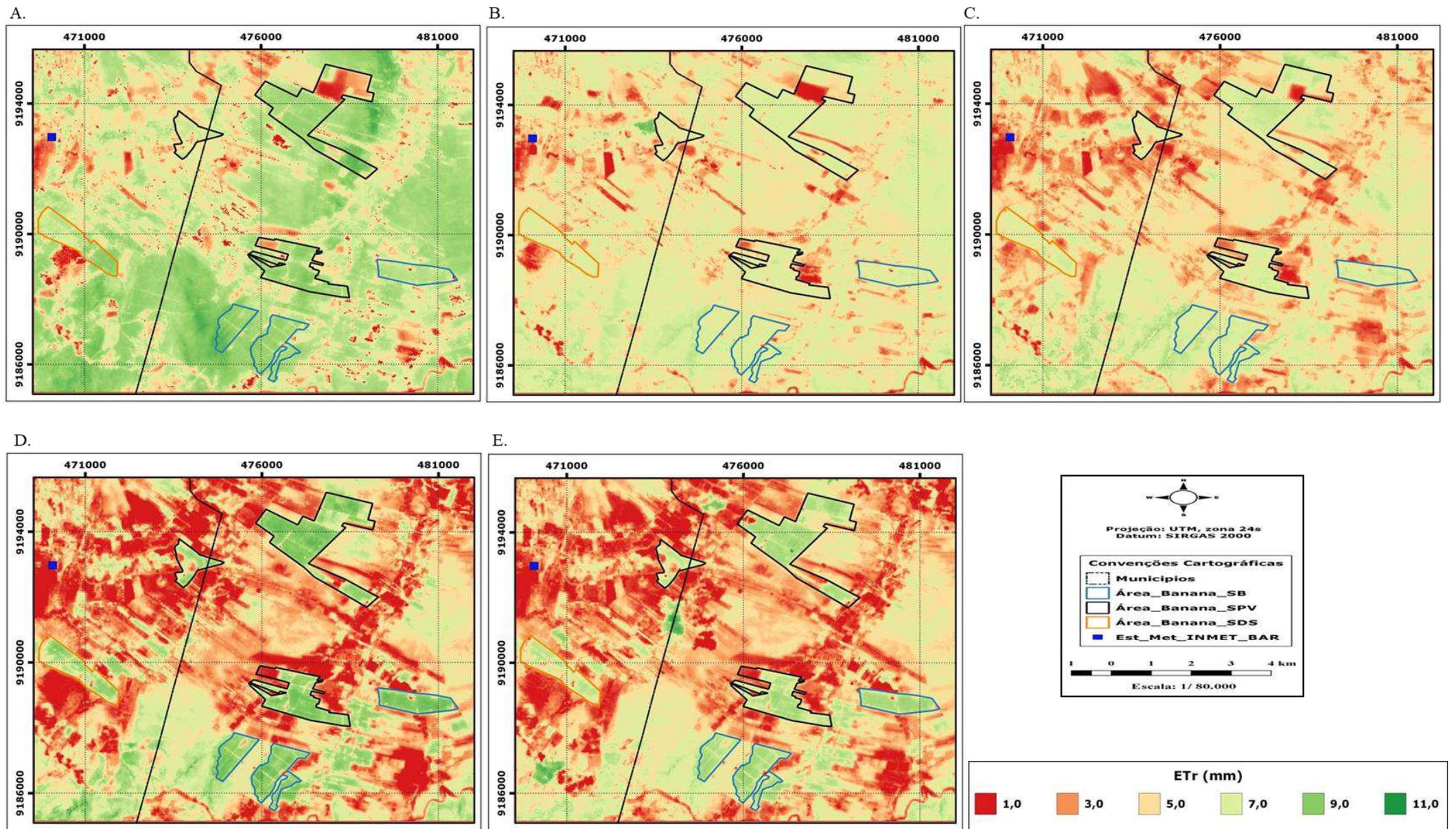


Figura 10. Espacialização dos valores da evapotranspiração real (mm) da área de estudo, no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

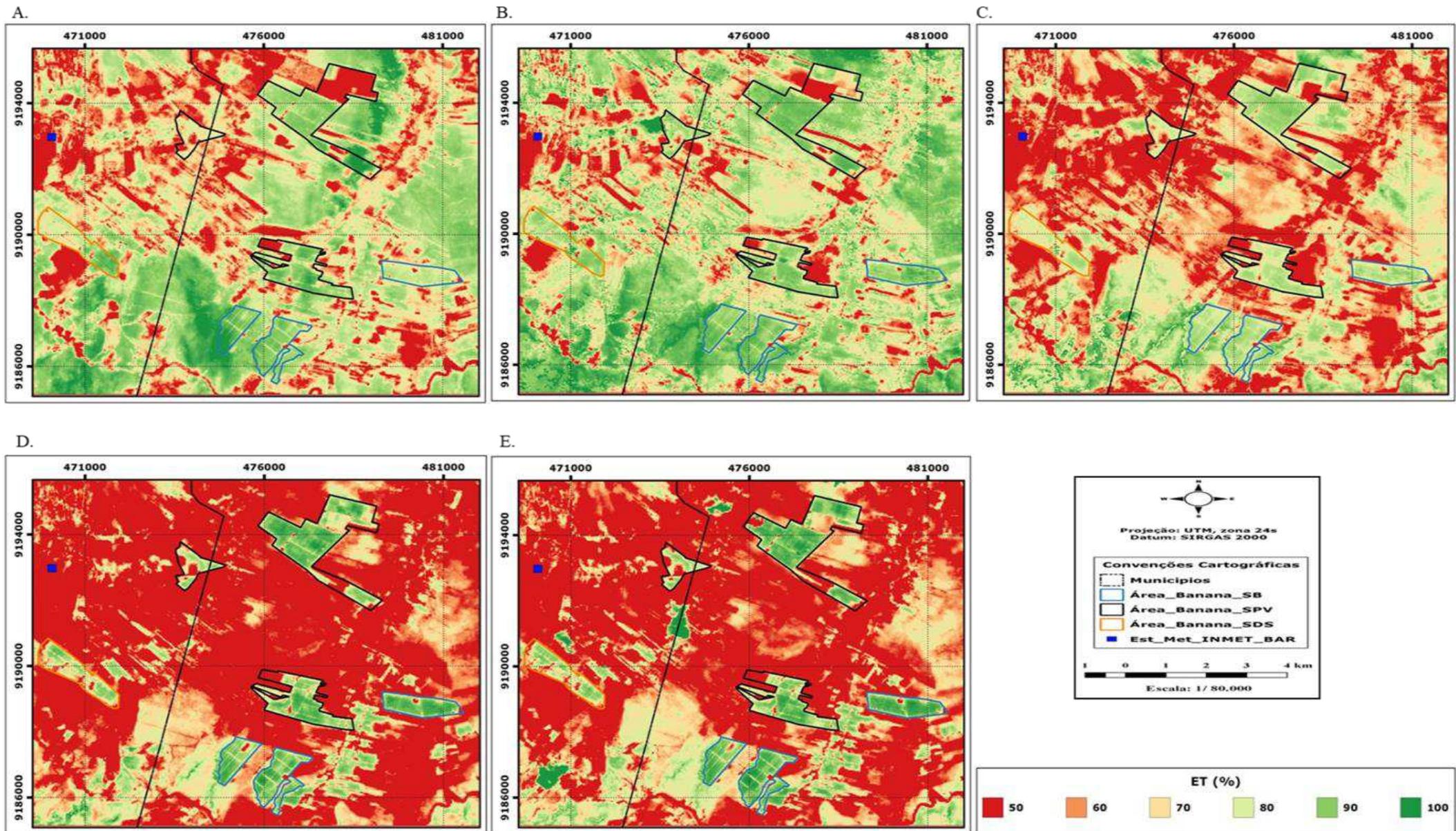


Figura 11. Espacialização da variação percentual dos valores da evapotranspiração real (%) da área de estudo, no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

5.3 Análise espaço-temporal da produtividade primária bruta (GPP)

Para determinação da produtividade primária bruta ou GPP, faz-se necessário a identificação previa de alguns parâmetros relevantes como temperatura e umidade relativa máxima e mínima, mês com maior valor médio do NDVI, além dos valores referentes à radiação fotossinteticamente ativa, temperatura média do ar do mês de máximo NDVI e a temperatura média do ar para o referido dia, apresentado na Tabela 7. O vigor do cultivo e o nível de sanidade vegetal foram determinados com base nos valores do NDVI e IAF sendo os mesmos indicativos da capacidade fotossintética e produção de biomassa das plantas.

O mês de maio foi utilizado como referência, por apresentar o maior valor médio de NDVI (0,864), como verificado na Figura 12. A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) varia de 9 a 13 ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), o menor valor observado foi no dia 9 de julho ($9,96 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), possivelmente em razão da presença de nuvens, já que se trata do inverno. Já o maior valor médio de RFA, observado no dia 29 de outubro ($13,4 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), pode estar relacionado com a baixa cobertura de nuvens em decorrência do outono e início do verão, período caracterizado pela elevação das temperaturas e redução da umidade relativa do ar.

Tabela 7. Datas das imagens do OLI/TIRS, temperaturas do ar máximo – Tmax ($^{\circ}\text{C}$) e mínima- Tmin ($^{\circ}\text{C}$), umidades relativas máxima – U_{rmax} (%) e mínima – U_{rmin} (%), NDVI médio, radiação fotossinteticamente ativa– RFA ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), valores de T1 e T2, referentes a temperatura média do ar para o mês com maior NDVI e dias selecionados para a pesquisa

Data	Tmax	Tmin	URmax	URmin	RFA	NDVI	T1	T2
3 de março	35,3	21,2	79	28	11,45	0,827	0,974	0,956
22 de maio	34,7	21,1	75	25	10,98	0,864	0,974	0,951
9 de julho	32,8	20,2	77	28	9,96	0,860	0,974	0,956
29 de outubro	37,7	20,0	61	14	13,40	0,832	0,974	0,947
14 de novembro	36,8	24,1	67	24	11,07	0,807	0,974	0,893

As áreas onde o cultivo da banana encontra-se bem estabelecido com plantas nos estágios de desenvolvimento e produção, o valor do NDVI se situa próximo de 0,86, o IAF observado varia entre 2,4 e 4,8 $\text{m}^2 \text{ m}^2$, como observado nas Figuras 12 e 13 e a GPP entre 7,5 e 10,0 ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), como observado nas Figuras 14A, 14B, 14C e 14D. Variações dos valores de NDVI podem estar relacionadas com o tempo de implantação do pomar, haja vista que podem ser encontradas áreas de cultivo recentemente implantadas e outras com mais de vinte anos, corroborando em tese com Teixeira et al. (2013), que ao explicar a variabilidade

dos valores de NDVI em cultivos perenes pode está diretamente relacionado com a dinâmica de produção e colheita.

Os resultados obtidos ratificam Allen et al. (2010), ao afirmarem que o NDVI e o IAF, estão diretamente relacionados com a capacidade fotossintética da planta, onde valores baixos indicam ocorrência de possível estresse hídrico, sanitário e ou nutricional, já valores elevados denotam que a cultura agrícola encontra-se saudável, ou seja, com atividade metabólica normal e potencial produtivo máximo, como verificado na Figura 15.

Os valores do IAF, encontrados para o cultivo da banana referente a área em estudo são superiores, em comparação com os valores verificados por Santos et al. (2014), ao analisarem cultivares de banana Prata Anã e BRS cultivadas sobre Latossolo Vermelho-Amarelo na Bahia, encontraram IAF máximo de 2,7 m² m² aos 270 dias após o plantio e valor mínimo de 0,1 m² m², observados durante o início e fim do primeiro ciclo de cultivo. Na Figura 10E, referente ao mês de novembro de 2016, percebe-se uma redução no valor da GPP, variando entre 5,0 e 7,5 (g C m⁻² dia⁻¹) para todas as unidades produtoras da área cultivada.

De acordo com Silva et al. (2012), esse cenário é considerado normal, uma vez que, em resposta ao déficit hídrico a bananeira realiza o fechamento dos estômatos. Entretanto, este mecanismo de defesa interfere negativamente na absorção de CO₂ da atmosfera e, conseqüentemente, na produtividade final da cultura.

Os valores do NDVI e GPP, obtidos para o cultivo irrigado da bananeira, encontram-se inseridos na faixa de valores observados por Silva et al. (2013), ao analisarem as referidas variáveis tendo como área de estudo o perímetro irrigado de São Gonçalo, localizado no município de Souza-PB. Os autores salientam para o fato dos valores da GPP próximos de 10 (g C m⁻² dia⁻¹) resultarem da combinação, entre elevada radiação solar, alto índice de vegetação e elevada fração evaporativa e fornecimento da demanda hídrica de forma adequada, reforçando a importância da irrigação para manutenção das atividades metabólicas, fixação de CO₂ e aumento da produtividade do cultivo irrigado, concordando com (COELHO et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2013).

A GPP observada para a vegetação nativa no entorno do cultivo irrigado da bananeira, varia entre 5,0 e 7,5 (g C m⁻² dia⁻¹) no período chuvoso (Figuras 14A e 14B) e no período seco ficando abaixo de 2,5 (g C m⁻² dia⁻¹), como observado nas Figuras 14C, 14D e 14E. Segundo Almeida et al. (2018), esses valores são relativamente baixos quando comparados com outros ecossistemas como Floresta (8,5 a 9,8 g C m⁻² dia⁻¹), Savana (7,7 g C m⁻² dia⁻¹) e Pastagem (7,0 g C m⁻² dia⁻¹). Entretanto, corroborando em tese com Silva et al. (2013),

Teixeira et al. (2013) e Delgado et al. (2018), que ao analisarem o aporte de biomassa para vegetação nativa (Caatinga e ou floresta de transição) e irrigada, encontraram valores semelhantes ao presente estudo.

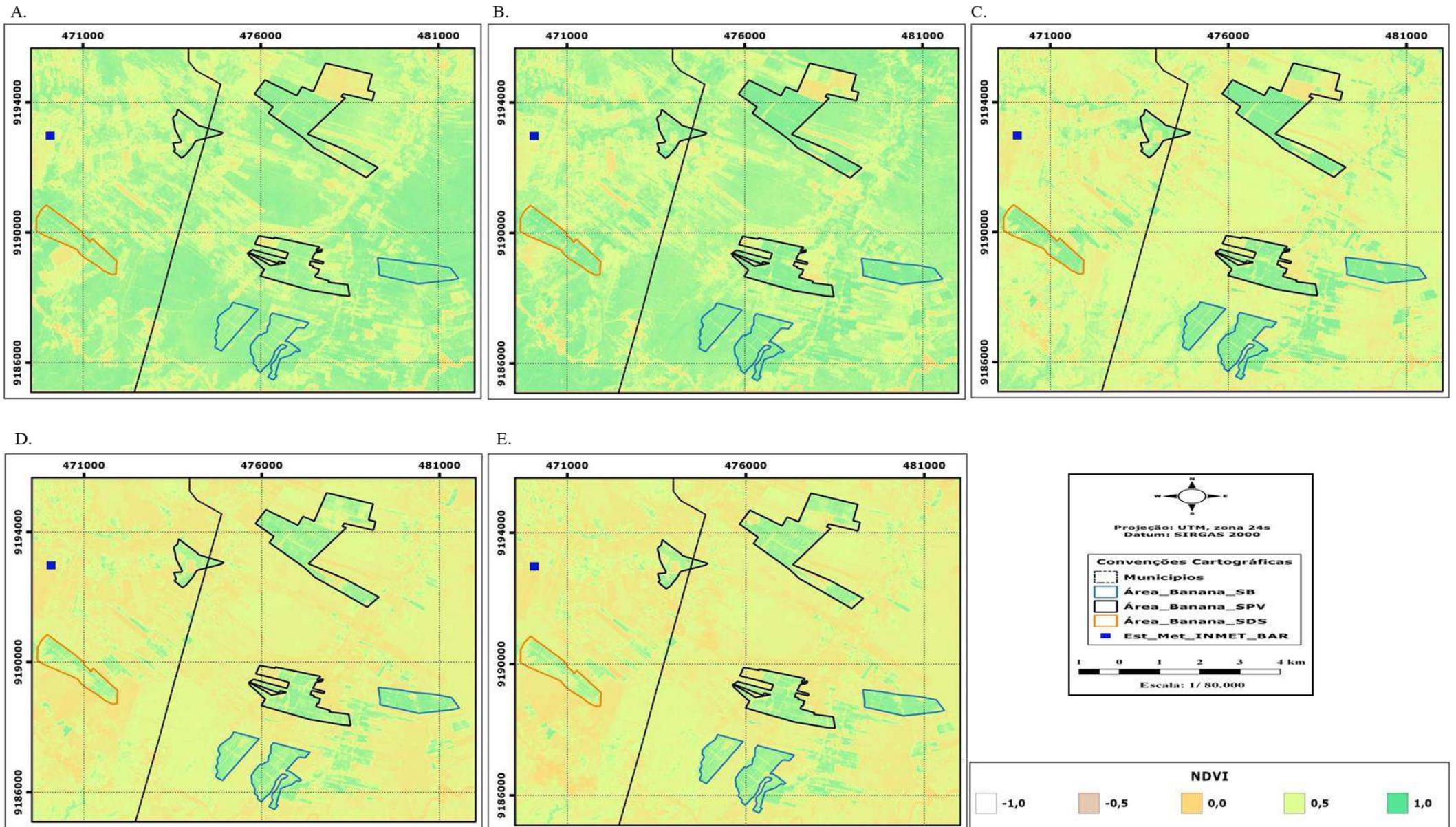


Figura 12. Espacialização dos valores de NDVI da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

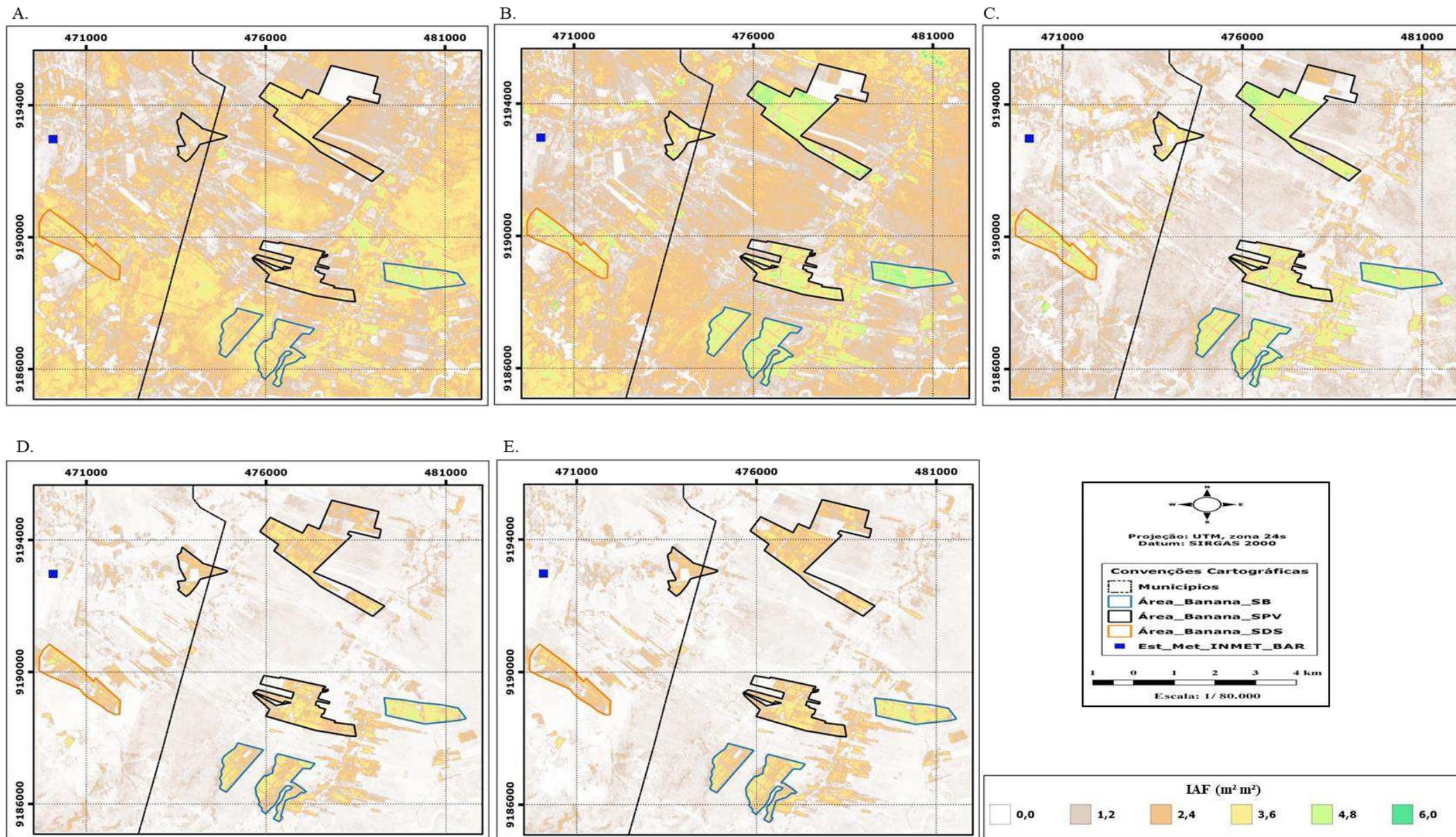


Figura 13. Espacialização dos valores de IAF (m² m²) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

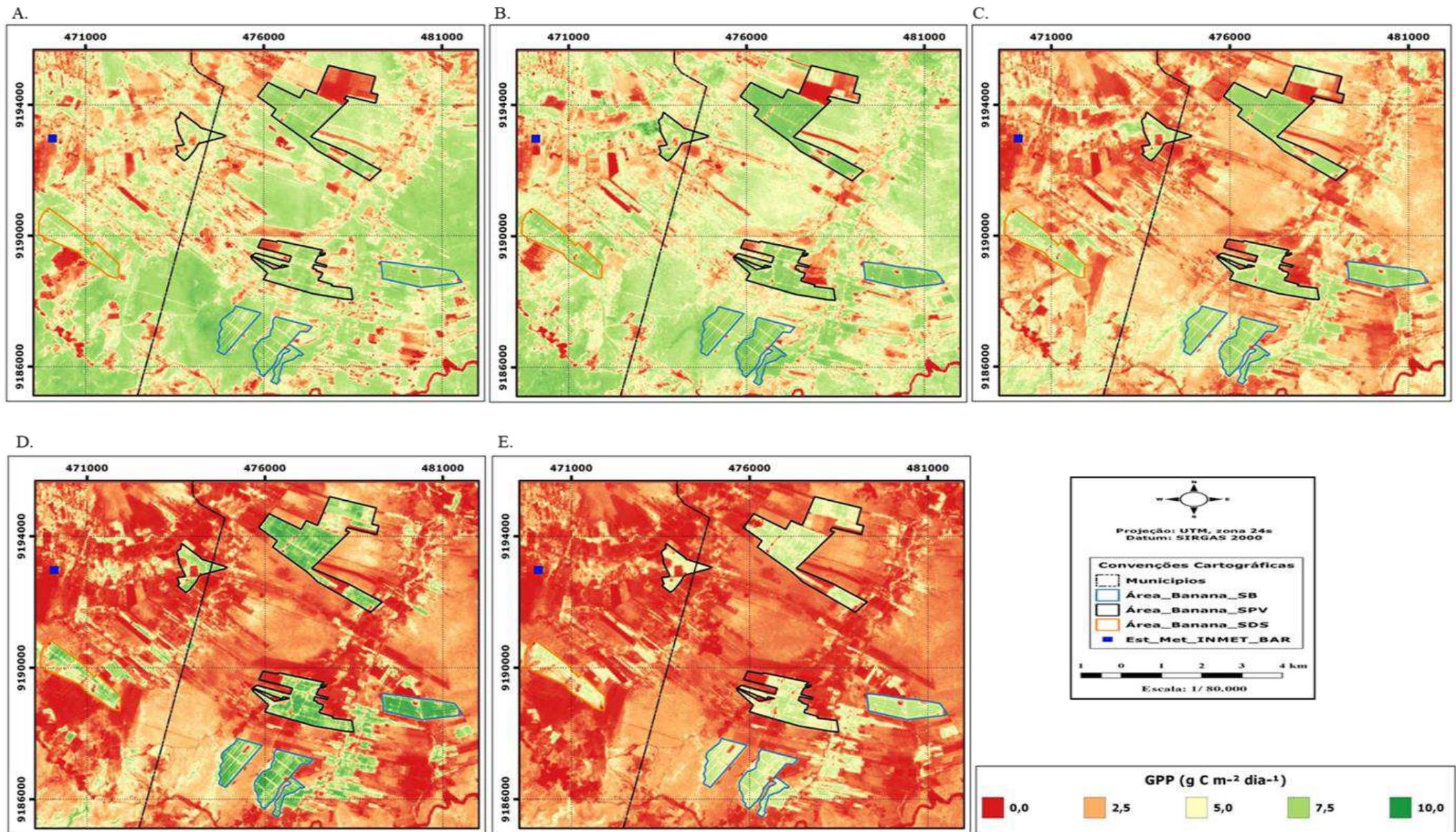


Figura 14. Espacialização dos valores de produtividade primária bruta ($\text{g C m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.



Figura 15. Fotos do sistema de irrigação, matéria morta e variações do estágio de crescimento da bananeira das unidades produtoras, localizada na divisa dos municípios de Barbalha e Missão, Ceará, Brasil.

5.4 Análise espaço-temporal da eficiência do uso da água (WP)

Na Figura 16 observa-se as variações referentes à eficiência do uso da água para o cultivo irrigado da banana, no decorrer dos diferentes cenários para o ano de 2016. Os valores variam entre 0,8 a 1,1 Kg m⁻³ para o mês de março (Figura 16 A), atingindo valor superior a 1,1 Kg m⁻³ em maio (Figura 16 B), provavelmente em decorrência da elevada ETr da cultura, e GPP, em consonância com o baixo nível de estresse hídrico, ao qual o cultivo esteve submetido. Já nos demais cenários, os valores da eficiência do uso da água apresenta redução, entre 0,8 e 1,1 Kg m⁻³ para o mês de julho (Figura 16 C) e outubro (Figura 16 D), entretanto, ficando abaixo de 0,8 Kg m⁻³ em novembro (Figura 16 E). Esses valores podem estar diretamente relacionados com a redução da umidade do solo mesmo no cultivo irrigado, além da elevação das temperaturas e estabelecimento do período seco.

Os valores de eficiência do uso da água obtidos para o cultivo irrigado da bananeira, para a referida área em estudo, são relativamente baixos em comparação com 4,15 e 4,54 kg m⁻³, obtidos por Kissel et al. (2015) ao analisarem o cultivo da bananeira. Assim como, os valores obtidos para as culturas da uva de mesa e manga (2,8 e 3,4 kg m⁻³), todavia, próximos aos valores (1,6 e 2,2 kg m⁻³), referente aos cultivos irrigados, encontrados em Petrolina-PE e (1,0 a 1,6 kg m⁻³), para os demais cultivos em Juazeiro-BA, relatados por (TEIXEIRA et al., 2013).

Pesquisas realizadas com objetivo de determinar a eficiência do uso da água para vários cultivos em condições de clima semiárido evidenciam variações similares aos valores observados nessa pesquisa, como por exemplo, os cultivos da aveia (1,1 a 1,3 kg m⁻³), girassol (1,5 a 2,6 kg m⁻³), legumes (0,5 a 1,1 kg m⁻³) e batata (3,1 a 4,4 kg m⁻³) na Mongólia. Assim como o cultivo de oleaginosas (1,9 a 2,3 kg m⁻³) na Índia e o cultivo de trigo (0,52 a 1,42 kg m⁻³) produzido mundialmente (ADAK et al., 2013; YUAN et al., 2013; ZWART et al., 2010).

O sistema de irrigação utilizado em todas unidades produtoras é do tipo microaspersão automatizado. Esse tipo de sistema de irrigação, quando bem calibrado, pode apresentar eficiência superior a 85 %, fornecendo água na dosagem, quantidade e momento exato. O abastecimento do sistema ocorre com água captada do aquífero, sendo a mesma retirada via sistema de bombeamento acoplado em poços tubulares. O número de poços perfurados e em pleno funcionamento nas unidades produtoras varia entre oito e doze, com vazão média de 60 a 80 m³ s⁻¹.

O manejo da irrigação na unidade produtora SB é realizado com base nos valores da evapotranspiração de referência- ET_0 , calculado a partir de dados climáticos obtidos pela miniestação meteorológica presente na própria área de cultivo. A avaliação da umidade no perfil do solo é realizada por meio de tradagem, semanalmente. Já as unidades produtoras SPV e SDS, realizam o manejo da irrigação, apenas com base no teor de umidade do solo, obtido por tradagem realizada semanalmente. Apesar das diferenças observadas no manejo da irrigação, a lâmina de irrigação aplicada em ambos os cultivos foi de aproximadamente 7 e 8 mm dia^{-1} , durante o período em estudo. Os demais tratos culturais realizados são os mesmos convencionalmente aplicados na bananicultura.

Nossos resultados indicam que, a unidade produtora SB apresenta melhor eficiência no uso da água, em comparação com as demais unidades SPV e SD, uma vez que apresenta taxa de evapotranspiração real próximo de 100%, produtividade primária bruta entre 6 e 8 g C m^{-2} dia^{-1} , durante todo o período em análise, independente do tempo de cultivo. Em ambas as unidades produtoras o cultivo encontra-se consolidado e estável há mais de dois anos, apresentando parâmetros biofísicos (NDVI, IAF, e ET_{24h}) dentro da normalidade e taxa evaporativa compreendida no intervalo entre 75% e 100%. Esses resultados indicam que o cultivo de ambas as unidades produtoras esteve submetido a níveis de estresse hídrico baixo, demonstrando o papel fundamental do manejo adotado na complementação hídrica via água de irrigação e, para a manutenção dos processos fisiológicos, resultando em produtividade média dentro do aceitável em quase todas as unidades produtoras.

A unidade produtora SDS apresentou produtividade média inferior em comparação com a unidade SB e SPV respectivamente, apesar de estarem pareadas no que diz respeito ao nível de estresse hídrico, taxa de evapotranspiração real, manejo e lâmina de irrigação aplicada. No que tange a produtividade primária bruta e eficiência do uso água da irrigação, nota-se que houve alternância entre as demais unidades produtoras SPV e SDS, independente das datas analisadas e do tempo de cultivo. Assim sendo, no tocante ambiental e econômico, a unidade SDS apresenta menor eficiência do uso da água.

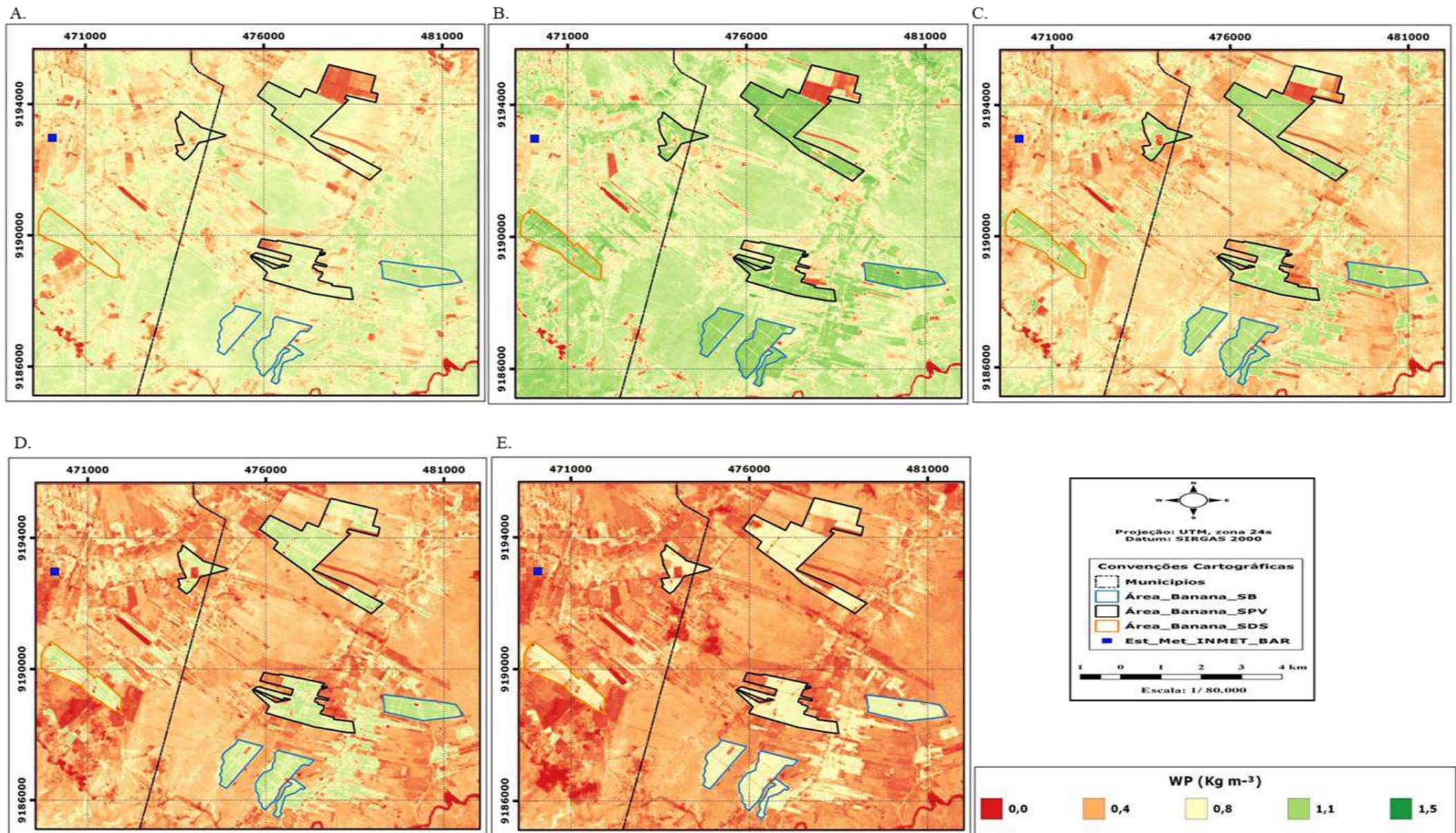


Figura 16. Espacialização dos valores de eficiência do uso da água (Kg m^{-3}) da área de estudo no decorrer das datas: 3 de março (A), 22 de maio (B), 9 de julho (C), 29 de outubro (D) e 14 de novembro (E) de 2016.

5.5 Análises estatísticas

No primeiro cenário, referente ao dia 3 de março de 2016 (Tabela 8), verifica-se que no geral à unidade produtora SB obteve as melhores medias, em todos os tempos de cultivo e em todas as variáveis analisadas, com exceção apenas da WP no tempo de cultivo de dez a vinte anos. Em relação ao tempo de cultivo observou-se que em geral, de quatro a dez anos apresentou maiores medias nas três unidades produtoras, com exceção da variável WP para a unidade SB.

No segundo cenário, referente ao dia 22 de maio de 2016 (Tabela 9), verifica-se que no geral à unidade produtora SB obteve as melhores medias, em todos os tempos de cultivo e em todas as variáveis analisadas, com exceção apenas da WP no tempo de cultivo de dez a vinte anos. Em relação ao tempo de cultivo observou-se que no geral, de quatro a dez anos apresentou maiores medias nas três unidades produtoras, com exceção da variável WP, que apresentou melhor média para as unidades SB e SPV no tempo de cultivo de quatro anos.

No terceiro cenário, referente ao dia 9 de julho de 2016 (Tabela 10), verifica-se que no geral à unidade produtora SB obteve as melhores medias, em todos os tempos de cultivo e em todas as variáveis analisadas, com exceção apenas da WP no tempo de cultivo de quatro anos. Em relação ao tempo de cultivo observou-se que no geral, de quatro a dez anos apresentou maiores medias nas três unidades produtoras, com exceção da variável WP, que apresentou melhor media para SPV no tempo de cultivo de quatro anos.

No quarto cenário, referente ao dia 29 de outubro de 2016 (Tabela 11), verifica-se que no geral à unidade produtora SB obteve as melhores medias, em todos os tempos de cultivo e em todas as variáveis analisadas. Em relação ao tempo de cultivo observou-se que no geral, de quatro anos apresentou maiores medias nas três unidades produtoras, com exceção da variável ETr % para a unidade produtora SDS no tempo de cultivo de quatro anos.

No quinto cenário, referente ao dia 14 de novembro de 2016 (Tabela 12), verifica-se que no geral à unidade produtora SB obteve as melhores medias, em todos os tempos de cultivo e em todas as variáveis analisadas. Em relação ao tempo de cultivo observou-se que no geral, de quatro e quatro a dez anos apresentou maiores medias nas três unidades produtoras, com exceção da variável WP para a unidade produtora SDS no tempo de cultivo de dez a vinte anos.

Tabela 8. Análise estatística para evapotranspiração real-ETr (%), Produtividade primária bruta-GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Eficiência do uso da água-Wp (Kg m^{-3}) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 3 de março de 2016.

Unidade Produtora	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo
	4 anos	4 - 10 anos	10 - 20 anos
ETr (%)			
SB	80,17 aB \pm 6,22	89,60 aA \pm 0,85	90,10 aA \pm 0,08
SPV	77,25 bC \pm 8,21	87,80 bA \pm 1,17	82,70 cB \pm 0,11
SDS	74,82 cC \pm 10,51	88,08 bA \pm 1,37	87,12 bB \pm 0,13
GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)			
SB	7,09 aB \pm 0,85	7,42 aA \pm 0,26	6,95 aC \pm 0,75
SPV	6,28 bC \pm 1,17	7,25 bA \pm 0,29	6,50 cB \pm 0,73
SDS	5,78 cC \pm 1,37	7,29 aA \pm 0,35	6,83 bB \pm 0,66
WP (Kg m^{-3})			
SB	0,93 aA \pm 0,08	0,87 aB \pm 0,03	0,81 bC \pm 0,05
SPV	0,84 bB \pm 0,11	0,87 aA \pm 0,04	0,83 aC \pm 0,06
SDS	0,80 cC \pm 0,13	0,87 aA \pm 0,03	0,83 aB \pm 0,05

Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 9. Análise estatística para evapotranspiração real-ETr (%), Produtividade primária bruta-GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Eficiência do uso da água-Wp (Kg m^{-3}) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 22 de maio de 2016.

Unidade Produtora	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo
	4 anos	4 - 10 anos	10 - 20 anos
ETr (%)			
SB	87,84 aC \pm 4,40	90,51 aA \pm 2,74	88,33 aB \pm 4,00
SPV	84,16 cB \pm 3,25	88,74 bA \pm 2,44	84,71 cB \pm 3,89
SDS	86,47 bB \pm 3,87	90,66 aA \pm 2,67	85,85 bC \pm 4,17
GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)			
SB	7,84 aB \pm 0,41	7,91 aA \pm 0,21	7,28 aC \pm 0,61
SPV	7,52 bA \pm 0,39	7,62 bA \pm 0,23	7,00 cB \pm 0,62
SDS	7,41 bB \pm 0,49	7,91 aA \pm 0,23	7,10 bA \pm 0,57
WP (Kg m^{-3})			
SB	1,18 aA \pm 0,04	1,15 aB \pm 0,02	1,10 bC \pm 0,06
SPV	1,18 aA \pm 0,05	1,13 bB \pm 0,03	1,10 abC \pm 0,07
SDS	1,13 bB \pm 0,07	1,15 aA \pm 0,03	1,10 aC \pm 0,07

Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 10. Análise estatística para evapotranspiração real-ETr (%), Produtividade primária bruta-GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Eficiência do uso da água-Wp (Kg m^{-3}) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 9 de julho de 2016.

Unidade Produtora	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo
	4 anos	4 - 10 anos	10 - 20 anos
ETr (%)			
SB	80,94 aB ± 4,68	84,10 aA ± 3,01	80,54 aB ± 5,15
SPV	76,83 bB ± 2,43	80,74 bA ± 4,52	76,54 cB ± 5,56
SDS	76,62 bC ± 7,50	84,23 aA ± 4,35	77,95 bB ± 6,44
GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)			
SB	6,98 aB ± 0,65	7,38 aA ± 0,27	6,53 aC ± 0,76
SPV	6,83 aA ± 0,56	6,98 bA ± 0,33	6,23 bB ± 0,77
SDS	6,14 bB ± 0,89	7,31 aA ± 0,39	6,12 cB ± 0,82
WP (Kg m^{-3})			
SB	1,04 bB ± 0,07	1,05 aA ± 0,02	0,97 aC ± 0,08
SPV	1,07 aA ± 0,08	1,04 bB ± 0,03	0,97 aC ± 0,08
SDS	0,96 cB ± 0,10	1,04 bA ± 0,03	0,94 bC ± 0,10

Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 11. Análise estatística para evapotranspiração real-ETr (%), Produtividade primária bruta-GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Eficiência do uso da água-Wp (Kg m^{-3}) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 29 de outubro de 2016.

Unidade Produtora	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo
	4 anos	4 - 10 anos	10 - 20 anos
ETr (%)			
SB	91,56 aA ± 5,14	90,71 aB ± 4,69	79,74 aC ± 9,83
SPV	86,69 bA ± 5,13	86,48 bA ± 4,30	74,73 cB ± 9,94
SDS	87,96 bB ± 6,97	90,96 aA ± 5,13	77,32 bC ± 10,53
GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)			
SB	8,74 aA ± 0,64	8,18 aB ± 0,75	6,12 aC ± 1,47
SPV	8,09 bA ± 0,58	7,61 cB ± 0,60	5,72 cC ± 1,41
SDS	8,09 bA ± 1,01	8,01 bA ± 0,71	5,90 bB ± 1,57
WP (Kg m^{-3})			
SB	0,97 aA ± 0,04	0,92 aB ± 0,04	0,77 aC ± 0,12
SPV	0,95 bA ± 0,04	0,90 bB ± 0,04	0,77 aC ± 0,11
SDS	0,94 bA ± 0,07	0,90 bB ± 0,05	0,77 aC ± 0,14

Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 12. Análise estatística para evapotranspiração real-ETr (%), Produtividade primária bruta-GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e Eficiência do uso da água-Wp (Kg m^{-3}) para o cultivo irrigado da bananeira, referente à data 14 de novembro de 2016.

Unidade Produtora	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo	Tempo de Cultivo
	4 anos	4 - 10 anos	10 - 20 anos
ETr (%)			
SB	92,95 aA \pm 4,84	92,69 aA \pm 4,09	82,13 aB \pm 9,25
SPV	87,31cA \pm 5,02	87,85 cA \pm 2,66	75,13 cB \pm 8,88
SDS	88,82 bB \pm 6,12	92,33 aA \pm 3,88	77,53 bC \pm 8,70
GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)			
SB	6,31 aA \pm 0,57	6,01 aB \pm 0,52	4,71 aC \pm 1,06
SPV	5,62 bA \pm 0,67	5,53 cA \pm 0,39	4,18 cB \pm 0,93
SDS	5,50 bB \pm 0,88	5,87 bA \pm 0,48	4,39 bC \pm 1,09
WP (Kg m^{-3})			
SB	0,72 aA \pm 0,12	0,70 aB \pm 0,13	0,71 aAB \pm 0,10
SPV	0,59 cA \pm 0,19	0,61 cA \pm 0,18	0,58 bA \pm 0,19
SDS	0,66 bA \pm 0,15	0,66 bA \pm 0,15	0,59 bB \pm 0,19

Médias seguidas por mesmas letras maiúsculas na linha e minúsculas na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As variações observadas para as variáveis ETr (%), GPP e WP, verificadas nas unidades produtoras, estão relacionadas com o período em análise, uma vez que, no início do ano de 2016, observa-se temperaturas amenas, maiores precipitações e umidade do solo (figura 2). O compilado desses fatores resulta em maiores taxas de evapotranspiração, produção de biomassa e melhor eficiência do uso da água de irrigação, empregada no cultivo da banana. Outro fator determinante para obtenção da melhor eficiência do uso da água está relacionado com o manejo empregado em cada cultivo e o tempo de implantação do mesmo. Tendo em vista que o cultivo recém-implantado apresenta menor aporte de biomassa, quando comparado a uma área com tempo de cultivo próximo de dez anos. Entretanto, áreas cultivadas com banana a mais de vinte anos, tende a estar esgotadas, pois foi superado o período limite de dez anos, recomendado para realizar a substituição do pomar (SILVA et al., 2012).

As variações atípicas observadas para as variáveis ETr, GPP e WP principalmente para as unidades produtoras SPV e SDS, no decorrer dos diferentes cenários, podem ser explicadas pelo fato de ambos os cultivos estarem em expansão, além da erradicação de algumas plantas em decorrência de problemas ocasionados por ataque de pragas, a ocorrência da doença conhecida como mal do Panamá causada pela ação do fungo (*Fusarium oxysporum f.sp. cubense*) e paralização da irrigação por alguns dias por causa de problemas com o conjunto moto bomba da unidade produtora SPV, corroborando com Coelho et al. (2013), ao explicar que o manejo inadequado da irrigação, associado com o estresse de origem biótica, pode

ocasionar problemas fisiológicos e morfológicos, comprometendo o crescimento e o desenvolvimento do cultivo, considerando que o déficit severo dificulta o lançamento da roseta foliar ou até mesmo impede o lançamento da inflorescência, assim diminuindo a produtividade da cultura da bananeira.

De acordo com a unidade produtora SB, a produtividade média obtida durante o período de 01 de março a 31 de novembro de 2016, foi de aproximadamente 25,09 ton ha⁻¹, valor considerado estável, uma vez que se encontra inserido no intervalo recomendado por Silva et al. (2012). No mesmo período a ETr (%) apresenta valores entre 80% e 100%, corroborando em com Shapland (2016), ao afirmar que taxas de evapotranspiração entre 75% e 100%, indicam nível de estresse hídrico baixo, mantendo a produtividade normal.

O cultivo de banana da unidade produtora SPV, apresentou taxa de evapotranspiração entre 70% e 90%, em quase totalidade das áreas avaliadas. Na presente unidade a produtividade média foi de aproximadamente 35,00 ton ha⁻¹, tendo em vista que maior parte da área cultivada com bananeira se encontra com tempo de cultivo de quatro a dez anos. Esse resultado corrobora com Shapland (2016), mas diverge do de Silva et al. (2012). O cultivo pertencente à unidade produtora SDS apresentou taxa evaporativa entre 70% e 90% o que indica nível de estresse hídrico baixo. Entretanto a produtividade média foi de aproximadamente 16 ton ha⁻¹, valor considerado baixo por (SOUZA et al., 2017; SANTOS et al., 2014; SILVA et al., 2012).

6- CONCLUSÃO

Em termos gerais a unidade produtora SB apresenta melhor eficiência no uso da água, em comparação com as demais, uma vez que a taxa de evapotranspiração real encontra-se próximo de 100% e a produtividade primária bruta foi superior a $8\text{g C m}^{-2}\text{ dia}^{-1}$ durante o período de maior demanda hídrica. Notoriamente o manejo adotado no solo e na irrigação influenciou para que a SB obtivesse maior produtividade. Referente aos tempos de cultivo nota-se que as variáveis analisadas nas áreas cultivadas entre quatro a dez anos foram superiores em relação aos demais tempos.

REFERÊNCIAS

- ADECE-AGÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DO ESTADO DO CEARÁ S/A. Perfil da Produção de Frutas Brasil e Ceará. *In: FRUTAL*, 20., 2013, Fortaleza. **Palestra...** Fortaleza: FRUTAL, 2013. Disponível em: <http://www.adece.ce.gov.br/phocadownload/Agronegocio/perfil_da_producao>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- ADAK, T.; KUMAR, G.; CHAKRAVARTY, N.V.K.; KATIYAR, R.K.; DESHMUKH, P.S. Biomass and biomass water use efficiency in oilseed crop (*Brassica. Inceae. L.*) under semi-arid microenvironments. *Biomass Bioenergy*, v. 51, p.154–162, 2013.
- AINSWORTH, E.A., ORT, D.R. How do we improve crop production in a warming world? *Plant Physiol.* V. 154, p.526–530, 2010.
- ALLEN, R.G. REF-ET: Reference Evapotranspiration Calculation Software. 2002. Disponível em: <<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/>>. Acesso em: 12 nov. 2018.
- ALLEN, R.G. *et al.* Mapping evapotranspiration at high resolution, application manual for Landsat satellite imagery. Version 2.0.7. **University of Idaho, Kimberly**, p. 248, 2010.
- ALMEIDA, C. T. ; *et al.* Improvements of the MODIS Gross Primary Productivity model based on a comprehensive uncertainty assessment over the Brazilian Amazonia. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. July, p. 1–16, 2018.
- BAGUSKAS, S. A.; CLEMESHA, R. E. S.; LOIK, M. E. Coastal low cloudiness and fog enhance crop water use efficiency in a California agricultural system. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 252, n. November 2017, p. 109–120, 2018.
- BAI, Y. *et al.* Remote Sensing of Environment A remote sensing-based two-leaf canopy conductance model : Global optimization and applications in modeling gross primary productivity and evapotranspiration of crops. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, n. September 2017, p. 411–437, 2018.
- BARROSO, A. A. F. *et al.* Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira cv. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.4, n.1, p.23-30, 2010.
- BASTIAANSEN, W. G. M. *et al.* Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 15, p. 53-79, 2001.
- BASTIAANSEN, W. G. .; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 94, p. 321–340, 2003.
- BEER, C. *et al.* Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, v. 329, p. 834-838, 2010.

- BEZERRA, A. E. et al. Eficiência do uso da água de irrigação no cultivo de banana (*Musa sp. L.*). *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.11, n.7, p. 1966 – 1974, 2017.
- BORGES, A.L. *et al.* Sistema de Produção: Cultivo da Bananeira 'BRS Platina'. **Embrapa Mandioca e Fruticultura**, Versão Eletrônica, 2ª ed. Cruz das Almas: 2014. Disponível em: <<https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo>> Acesso em: 20 nov. 2016.
- BRANDÃO, Z. N. SOUZA, J. Y. B. de. BARBOSA, M. P. ZONTA, J. H. BEZERRA, J. R. C. Zoneamento de áreas de plantio e mapeamento de APPS e RLS usando imagens ALOS. *In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésias e Tecnologias da Geoinformação*, 4., 2012, Recife. **Anais...** Recife: UFPE, 2012. p. 001-006.
- BRUTSAERT, W. *Evaporation Into the Atmosphere: Theory, History and Applications*. D. Reidel Pub, Co, 299 p. 1982.
- CABRAL, O. M. R. et al. Fluxes of CO₂ above a plantation of Eucalyptus in southeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.151, p.49–59, 2011.
- CAITANO, R. F.; LOPES, F. B.; TEIXEIRA, A. dos S. Estimativa da aridez no Estado do Ceará usando Sistemas de Informação Geográfica. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR*, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 8904.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 5, p. 893-903, 2009.
- CLAVERIE, M.; VERMOTE, E. F.; FRANCH, B.; MASEK, J. G. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM + surface reflectance products. **Remote Sensing of Environment**. v. 169, p. 390403, 2015.
- COELHO, E. F. *et al.* Produtividade e eficiência de uso de água das bananeiras “prata anã e grand naine sob irrigação no terceiro ciclo no norte de minas gerais. **Revista Irriga-Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**, ISSN 1808-3765, v.11, Nº 4, P. 460-468, dez. 2006.
- COELHO E. F. *et al.* Necessidades hídricas de bananeira tipo Terra em condições de tabuleiros costeiros, doi:10.1590/s0100-204x2013000900010. **Revista de Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.9, p.1260-1268, set. 2013.
- CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, **Acompanhamento da safra brasileira de grãos, Safra 2016/17 - Primeiro levantamento**, ISSN 2318-6852, v. 4, p. 1-164, Brasília, out. 2016.
- COSTA, S.C. Níveis de irrigação e doses de potássio aplicados por gotejamento na cultura da bananeira para a região da Chapada do Apodi-CE. 2009. 132p. Tese (Doutorado em engenharia agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.
- DELGADO, R. C. ; et al. Improvements of the MODIS Gross Primary Productivity model based on a comprehensive uncertainty assessment over the Brazilian Amazonia. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, n. July, p. 1–16, 2018.

DOUGHTY, R. et al. Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010–2016, Oklahoma, USA. **Agricultural Water Management**, v. 204, n. November 2017, p. 47–59, 2018.

EGOROV, A. V.; HANSEN, M. C.; ROY, D. P.; KOMMAREDDY, A.; POTAPOV, P. V. Image interpretation-guided supervised classification using nested segmentation. *Remote Sensing of Environment*. v.165, p. 135–147, 2015.

FAO-Agricultural Organization of the United Nations. **Irrigation and Drainage Paper N° 24**, Rome, Italy. 1977. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

FAO-AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistical Databases**. Disponível em: <<http://www.fao.org>>. Acesso em: 24 nov. 2018.

FIELD, C.B., RANDERSON, J.T., MALMSTROM, C.M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. **Remote Sensing of Environment**. v. 51, p.74–88, 1995.

FUNCEME-FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Mapas de levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos da Mesorregião do Sul Cearense**, p.98. Fortaleza-CE, 2012.

FU, X. et al. Comparative analysis of pigments in red and yellow banana fruit. **Food Chemistry**, v. 239, p. 1009–1018, 2018.

GARCÍA-VILA, M., FERERES, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal of Agronomy**. v. 36, p. 21–31, 2012.

GITELSON, A. A.; VIÑA, A.; MASEK, J. G.; VERMA, S. B.; SUYKER, A.E. Synoptic Monitoring of Gross Primary Productivity of Maize Using Landsat Data. **IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters**, v.5, n.2, p.133-137, 2008.

GONSALVES, M. V. I. *et al.* Leaf area index and fruit yield of seedless watermelon depending on spacing between plants and N and K applied by fertigation. **Revista Científica**. v.39, n.1/2, p.25-33, Jaboticabal. 2011.

GUIMARÃES, M. J. M. *et al.* Estimation of leaf area index of banana orchards using the method IAF-LUX. **Water Resources and Irrigation Management**, ISSN 2316-6886. v.2, n.2, p.71-76. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB. Aug. 2013.

HONDA, B.; JORGE, L. A. C. Computação aplicada à agricultura de precisão. **Revista Científica Eletrônica UNISEB**, v.1, n.1, p.111-132, Ribeirão Preto-Sp, jun. 2013.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2010**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 24 nov. 2018.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php? r=bdmep/bdmep](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep)>. Acesso em: 20 set. 2018.

JIN, Y. et al. Agricultural and Forest Meteorology Spatially variable evapotranspiration over salt affected pistachio orchards analyzed with satellite remote sensing estimates. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 262, n. September 2017, p. 178–191, 2018.

KALFAS, J. L. et al. Modeling gross primary production of irrigated and rain-fed maize using MODIS imagery and CO₂ flux tower data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.151, p.1514-1528, 2011.

KHALIFA, M. et al. Spatio-temporal variations in climate, primary productivity and efficiency of water and carbon use of the land cover types in Sudan and Ethiopia. *Science of the Total Environment*, v. 624, p. 790–806, 2018.

KIM, D.; KALUARACHCHI, J. Validating FAO AquaCrop using Landsat images and regional crop information. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 143–155, 2015.

KISSEL, E.; *et al.* Transpiration efficiency versus growth: Exploring the banana biodiversity for drought tolerance. **Scientia Horticulturae** v.185 p.175–182, 2015.

KITAMOTO, T.; UEYAMA, M.; HARAZONO, Y.; IWATA, T.; YAMAMOTO, S. Applications of NOAA/AVHRR and observed fluxes to estimate 3 regional carbon fluxes over black spruce forests in Alaska. **Journal of Agricultural Meteorology**, v.63, p.171-183, 2007.

LASP. PESQUISA MENSAL DE PREVISÃO E ACOMPANHAMENTO DAS SAFRAS AGRÍCOLAS NO ANO CIVIL. LEVANTAMENTO SISTEMÁTICO DA PRODUÇÃO AGRÍCOLA, v. 30, p. 1–81, 2017.

LIMA, M. T. V.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C. W.; NASCIMENTO, M. T. B. Koppen-Geiger and Thornthwaite climatic classification for the metropolitan region of the Cariri, Ceará. *Revista GEAMA*, v. 3, 136-143, 2017.

MADUGUNDU, R. *et al.* Estimation of gross primary production of irrigated maize using Landsat-8 imagery and Eddy Covariance data. **Saudi Journal of Biological Sciences**, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sjbs.2016.10.003>. 2016.

MARKHAM, B. *et al.* Landsat-8 Operational Land Imager Radiometric Calibration and Stability, doi:10.3390/rs61212275. **Journal Remote Sensing**, ISSN 2072-4292, v.6, p.12275-12308, 2014.

MEDEIROS, R. M. de *et al.* Balanço hídrico climatológico e classificação climática para a área produtora da banana do município de Barbalha, CE. doi: 10.7127/rbai.v7n400018 **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, ISSN 1982-7679 (On-line), v.7, n°. 4, p. 258-268, Fortaleza, 2013.

MONTEITH, J.L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of Applied Ecology**. V. 9, p.747–766. 1972.

MONTENEGRO, A. A. T. *et al.* Evapotranspiração e coeficiente de cultivo da bananeira para a região litorânea do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 39, n. 02, p. 203-208, 2009.

OLIVEIRA, C. W.; BEZERRA, A. E.; RODRIGUES, L. G. Estimativa e caracterização das diferentes zonas de evapotranspiração no estado do Ceará. *In*: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 3., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2015. p. 2150-2158.

OLIVEIRA, C. W.; COSTA, S. C.; SÁ, J. A.; SILVA, V. de P. R. Evapotranspiração estimada por balanço de energia METRIC e SAFER. *In*: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING. 2., 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2015. p. 2230-2236.

PÔÇAS, I. *et al.* Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data, doi:10.3390/rs70302373. **Remote Sensing**, v.7, p.2373-2400. 2015.

QUEIROZ, I. da S. Região Metropolitana do Cariri cearense, a metrópole fora do eixo. **Mercator-UFC**, ISSN 1984-220, Fortaleza, v. 13, n. 3, p. 93-104, dez. 2014.

ROMÁN, M. O. *et al.* Assessing the coupling between surface albedo derived from MODIS and the fraction of diffuse skylight over spatially-characterized landscapes. **Remote Sensing of Environment**, v.114, n.4, p.738-760, 2010.

SANTOS, C. N.; OLIVEIRA, I. C. P.; DONATO, S. L. R.; ARANTES, A. de M.; ROSA, R. C. C. Área e índice de área foliar de bananeiras 'prata-anã' e 'BRS platina' submetidas à adubação orgânica. CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA. 22., Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: 2014. p.720-724.

SAKAMOTO, T.; GITELSON, A.; WARDLOW, B. D.; VERMA, S. B.; SUYKER, A. E. Estimating daily gross primary production of maize only on MODIS WDRVI and shortwave radiation data. **Remote Sensing of Environment**, v.115, p.3091-3101, 2011.

SHAPLAND, T. **FieldStat: A Superpower for Growers**. Disponível em:< <https://www.tuletechnologies.com/blog/fieldstat-a-superpower-for-growers>> Acesso em 24 nov. 2018.

SHARMA, T. *et al.* A 100-year conservation experiment: impacts on forest carbon stocks and fluxes. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p.242-255, 2013.

SILVA, A. J. P. *et al.* Circular técnico: Irrigação da bananeira, **EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Mandioca e Fruticultura**, ISBN 978-85-7035-106-7, p. 280. Brasília-DF, 2012.

SILVA, B. B. *et al.* Determinação por sensoriamento remoto da produtividade primária bruta do perímetro irrigado são Gonçalo-PB. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, n.1, p.57-64, 2013.

SILVA, E.B. *et al.* Deficiências de macronutrientes no estado nutricional de mudas de bananeira tipo Prata. **Bioscience Journal**, v.30, n.1, p.82-92, 2014.

SONG, S. *et al.* Plant Physiology and Biochemistry Identification of a novel promoter from banana aquaporin family gene (MaTIP1 ; 2) which responses to drought and salt-stress in transgenic Arabidopsis thaliana. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 128, n.3, p. 163–169, 2018.

SOUZA, M. C. *et al.* Estimation of gross primary production of the Amazon-Cerrado transitional forest by remote sensing techniques. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. 1, p. 01-12, 2014.

SOUZA, G. *et al.* Análise socioambiental da produção de banana no município de Cariús-CE, Brasil. **Ciência e Sustentabilidade - CeS**, p. 119–144, 2017.

TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. 2003. v.64, p357, Dissertation (Ph.D em engenharia de biosistemas)- Universit of Idaho, Moscow, 2003.

TASUMI, M. *et al.* Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U. S. **Irrigation and Drainage Systems**, v.19, p.355-376, 2005.

TEIXEIRA, A. H. de C. *et al.* Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p. 28-32. Campina grande, PB. 2001.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. de C.; BOLF, E. L. Irrigation performance assessments for corn crop with landsat images in the são paulo state, brazil. *In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING*. 2., 2014, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: INOVAGRI, 2014. p.739-748.

TEIXEIRA, A. H. DE C.; *et al.* Large-Scale Water Productivity Assessments with MODIS Images in a Changing Semi-Arid Environment: A Brazilian Case Study. **Remote Sensing**. v. 5, p. 5783-5804, 2013.

TEIXERA, A. H. C. *et al.* IRRIGATION PERFORMANCE ASSESSMENTS FOR CORN CROP WITH LANDSAT. II INOVAGRI International Meeting, 2014.

TELES, V. O.; SÁ, J. A.; OLIVEIRA, C. W.; SILVA, V. DE P. R.; BEZERRA, A. E. Estimativa de variáveis biofísicas e do saldo de radiação em um pomar de banana no Cariri cearense por sensoriamento remoto. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO-SBSR*, 16., 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 0735-0741.

TRINDADE, A. V. *et al.* Circular técnico: O cultivo da bananeira. **EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Mandioca e Fruticultura**, ISBN 85-7158-010-3, p.279, Cruz das Almas-BA, 2004.

USGS (United States Geological Survey). Imagens LANDSAT 8 OLI/TIRS. Disponível em: < <https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 20 out. 2018.

VAN ASTEN, P.J.A., FERMONTE, A.M., TAULYA, G.: Drought is a major yield loss factor for rainfed East African highland banana. **Agricultural Water Management**. v98, p541–552. 2011.

VIEIRA, M. *et al.* Aptidão climática para o cultivo da banana em Caruaru-PE, Brasil. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v3, p. 265–274, 2018.

YUAN, M.; ZHANG, L.; GOU, F.; SU, Z.; SPIERTZ, J.H.J.; VAN DER WERF, W. Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in the semi-arid Inner Mongolia. **Agricultural Water Management**, v.122, p.28–38. 2013.

ZHANG, Q. *et al.* Estimation of crop gross primary production (GPP): fAPARchl versus MOD15A2 FPAR. **Remote Sensing of Environment**, v.153, p.1-6. 2014.

ZWART, S.J.; BASTIAANSEN, W.G.M.; DE FRAITURE, C.; MOLDEN, D.J. WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat. **Agricultural Water Management**, v.97, p. 1628–1636. 2010.

APÊNDICE A - CÔMPUTO DOS COMPONENTES DO SALDO DE RADIAÇÃO À
SUPERFÍCIE (R_n)

Radiação de onda longa emitida ($R_{L\uparrow}$)

Este parâmetro pode ser obtido através da equação de Stefan-Boltzmann como segue:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o \sigma T^4 \quad (17.1)$$

em que:

ε_o : Emissividade de cada pixel;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

T : Temperatura do ar (K).

Radiação de onda curta incidente ($R_{S\downarrow}$)

A radiação de onda curta incidente foi considerada como sendo constante em toda a cena selecionada, e para condição de céu claro, Allen et al. (2002) sugerem a seguinte expressão para a sua determinação:

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cdot \cos\theta \cdot d_r \tau_{sw} \quad (17.2)$$

em que:

G_{SC} : Constante solar (1.367 Wm^{-2});

θ : Ângulo zenital solar (degres);

d_r e τ_{sw} : Transmissividade atmosférica, calculada somando-se o índice de transmissividade da radiação direta e o índice da transmissividade da radiação difusa.

Radiação de onda longa incidente ($R_{L\downarrow}$)

Assim como a radiação de onda curta incidente, a radiação de onda longa incidente também foi considerada constante para toda a cena estudada. Em seu cálculo, novamente fez-se uso da equação de Stefan-Boltzmann qual seja:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (17.3)$$

em que:

ε_a : Emissividade atmosférica obtida por $\varepsilon_a = 0,85 (-\ln(\tau_{sw}))^{0,09}$;

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$);

Ta: Temperatura do ar (K).

APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO DO PIXEL QUENTE (HOT PIXEL) E PIXEL FRIO
(COLD PIXEL) NA CENA DA IMAGEM

O pixel quente (hot pixel) representa o pixel onde a temperatura se apresenta mais elevada (área agrícola desmatada, por exemplo) e onde o fluxo de calor sensível é máximo. O pixel frio (cold pixel), contrariamente ao pixel quente, representa o local, onde a temperatura é mais amena (Área agrícola em plena atividade, por exemplo), onde o fluxo de calor sensível (H) é próximo de zero e a partir desses dois elementos, determina-se a variação de temperatura (dT) e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor (r_{ah}).

Inicialmente, é preciso computar o coeficiente de rugosidade (z_{0m}) e a velocidade de fricção (u^*) na estação meteorológica. Para o cálculo do coeficiente de rugosidade local z_{0m} (m), utilizou-se a equação de Brutsaert (1982), conforme segue:

$$Z_{0m} = 0,12 \times h \quad (23.1)$$

em que:

h: Altura da vegetação em torno da estação meteorológica.

Para o cálculo da velocidade de fricção u^* (ms^{-1}), usou-se a equação do perfil logaritmo do vento para a condição de estabilidade neutra, qual seja:

$$u^* = \frac{k \cdot u_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (23.2)$$

em que:

k : Constante de Von Karman (0,41);

u_x : Velocidade do vento (ms^{-1});

z_x : Altura em que foi tomado o valor da velocidade do vento, considerado 200 m;

z_{0m} : Coeficiente de rugosidade local.

Posteriormente, ainda assumindo a atmosfera em equilíbrio neutro e assumindo que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis, pode-se estimar a velocidade do vento a 200 m de altitude, altura esta chamada de “blending heigh”, segundo expressão:

$$u_{200} = u_* \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (23.3)$$

em que:

k: Constante de Von Karman (0,41);

u^* : Velocidade de fricção (ms^{-1});

z_{0m} : Coeficiente de rugosidade local (m).

Obtida a velocidade do vento a 200 m (u_{200}), se calcula uma nova velocidade de fricção (u^*), ajustada, para cada pixel. A nova velocidade de fricção (u^*), para cada pixel da imagem, é dada pela seguinte equação:

$$u^* = \frac{k \cdot u_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)} \quad (23.4)$$

em que:

u_{200} : Velocidade do vento (m.s-1) a 200 m;

z_{om} : Velocidade de fricção pixel a pixel;

k : Constante de Von Karman (0,41).

No METRIC, o cômputo do z_{om} também pode ser obtido a partir de um mapa de uso do solo, sendo computado um novo coeficiente de rugosidade (z_{om}), desta vez para cada pixel, em função do IAF, segundo Allen et al. (2010) utilizando a equação (23.5).

$$Z_{om} = 0,018 \times \text{IAF} \quad (23.5)$$

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor r_{ah} (ms^{-1}), ainda considerando a estabilidade neutra da atmosfera, pode ser computada inicialmente, para cada pixel, através da seguinte expressão:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^*k} \quad (23.6)$$

em que:

z_1, z_2 : Altura a acima da superfície (0,1 e 2 m respectivamente);

u^* e k : Foram definidos anteriormente.

A partir deste momento, pode-se iniciar o processo iterativo com o objetivo de calcular o verdadeiro valor de H, uma vez que este está sujeito às variações da condição inicial de cada pixel. O processo iterativo inicia-se com o cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície dT (°C), para cada pixel e é representado pela seguinte equação:

$$dT = a + b^{T_s} \quad (23.7)$$

em que:

a e b : São constantes de calibração da diferença de temperatura;

T_s : Temperatura da superfície (°C).

Para a obtenção das variáveis “a” e “b”, partiu-se da seguinte situação, para o desenvolvimento do dT versus T_s . Para o pixel frio, o valor do fluxo de calor sensível (H) no METRIC é $H_{cold} = R_n - G - LE_{cold}$, oposto ao SEBAL que o considera igual a zero, e o fluxo de calor latente (LE) é considerado para área agrícola onde é esperada uma ET_{cold} de 5 a 10 % superior ao valor da ET_o , sendo dado pela seguinte equação ($ET_{cold} = 1,05 \times ET_o$). Assim o fluxo de calor sensível para pixel frio é dado como $H_{cold} = R_n - G - 1,05 \times \lambda ET$, e o dT_{cold} , como:

$$dT_{cold} = \frac{H_{cold} \times r_{ah,cold}}{(r_{cold} \times c_p)} \quad (23.8)$$

Em que: r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível ($s.m^{-1}$), r é a densidade do ar ($1,15 \text{ kg.m}^{-3}$) e c_p o calor específico do ar ($1004 \text{ J.kg}^{-1} .K^{-1}$).

Para o pixel quente (hot)w, $H_{hot} = R_n - G - \lambda ET_{hot}$, onde ET_{hot} é assumida como sendo próxima de zero, para solo agrícola sem vegetação verde e com a camada superficial seca. Mesmo nesta condições uma evaporação residual ainda persiste para solo seco várias semanas seguindo um evento de umedecimento como chuva, assim uma taxa de 0,05 a 0,15 da evapotranspiração é esperada. Assim, $\lambda ET_{hot} \cong 0,05 \lambda ET_o$ a $0,15 \lambda ET_o$, desta maneira o dT_{hot} será:

$$dT_{hot} = \frac{H_{hot} \times r_{ah,hot}}{(r_{hot} \times c_p)} \quad (23.9)$$

Assim, os coeficientes a e b são computados

$$a = \frac{dT_{hot} - dT_{cold}}{T_{s,hot} - T_{s,cold}}$$

(23.10)

$$b = dT_{hot} - a \cdot T_{s,hot} \quad (23.11)$$

Assim, tem-se duas equações com duas incógnitas, o que possibilita a obtenção dos valores iniciais de “a” e “b”. Estes valores, em cada iteração, vão mudando até que se atinja uma condição de constância.

O valor inicial de H não é representativo, vez que foi obtido para uma condição atmosférica que geralmente não corresponde à realidade, servindo apenas como ponto de partida para o processo iterativo, onde em suas etapas subseqüentes, se considera a real condição de estabilidade de cada pixel. Devido aos efeitos turbulentos aquecerem a superfície

e afetarem as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica, aplica-se a teoria da similaridade de Monin-Obukhov, obtendo-se o comprimento Monin-Obukhov (L) em metros, que é utilizado para identificar a condição de estabilidade da atmosfera e que é computado pela seguinte expressão:

$$L = \frac{r \cdot c_p \cdot u_*^3 \cdot T_s}{k \cdot g \cdot H} \quad (23.12)$$

Em que: r, c_p, u*, T_s e k já foram definidos anteriormente; g é o módulo do campo gravitacional terrestre (9,81 m.s⁻²) e H o fluxo de calor sensível (W.m⁻²).

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum (ψ_m) e de calor (ψ_h) deverão ser considerados. Estas variáveis irão auxiliar a nova modalidade de cálculo da velocidade de fricção (u*) e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor (rah), continuando o processo iterativo. Para isto, utilizam-se das seguintes fórmulas (ALLEN *et al.*, 2010).

I - Se L < 0 (condição de instabilidade):

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (23.13)$$

$$x_{(2 m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (23.14)$$

$$x_{(200m)} = \left(1 - 16 \frac{200}{L}\right)^{0,25} \quad (23.15)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad (23.16)$$

$$\Psi_{h(2 m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (23.17)$$

$$\Psi_{m(200m)} = 2 \ln \left(\frac{1+x_{(200m)}}{2}\right) + \ln \left(\frac{1+x_{(200m)}^2}{2}\right) - 2 \cdot \text{ARCTAN}(x_{(200m)}) + 0,5 \cdot \pi \quad (23.18)$$

II - Se L > 0 (condição de estabilidade):

$$\Psi_{h(0,1 m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L}\right) \quad (23.19)$$

$$\Psi_{h(2 m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right) \quad (23.20)$$

$$\Psi_{m(200 m)} = -5 \left(\frac{2}{L}\right) \quad (23.21)$$

Note que na última equação foi usado o valor 2 m ao invés de 200 m, por que é assumido que para condições estáveis a altura da camada inercial estável é da ordem de alguns metros. Usar um valor maior que 2 m para esta altura pode causar uma condição de instabilidade numérica no modelo.

III - Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\psi_m = 0$ e $\psi_h = 0$

Após esse procedimento, obteve-se o valor da velocidade de fricção corrigida pela seguinte equação:

$$u_* = \frac{u_{200} \cdot k}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right) - \psi_m(200m)} \quad (23.22)$$

Posteriormente, obteve-se o valor da resistência aerodinâmica corrigida ao transporte de calor (r_{ah}) pela (equação 46). De posse desses dados, inicia-se uma nova iteração, recalculando-se os valores de “a” e “b”, dT , H , L , ψ_m , ψ_h , u^* e r_{ah} , até que os valores de “a” e “b” se mostrem constantes.

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right) - \psi_h(z_2) + \psi_h(z_1)}{u_* \cdot k} \quad (23.23)$$

Em que: z_2 e z_1 correspondem a 2 m e 0,1 m respectivamente e $\psi_h(z_2)$ e $\psi_h(z_1)$ são as condições de estabilidade para o transporte de calor sensível a 2,0 m e 0,1 m respectivamente.

APÊNDICE C - CÔMPUTO DOS COMPONENTES DA EQUAÇÃO DE
PENMANMONTEITH-FAO56

Quando se calcula o déficit de pressão de vapor diário ($e_s - e_a$) para uso na equação combinada, vários métodos podem ser usados. Partindo da equação base tem-se pelo menos quatro métodos de cálculo do déficit de pressão de vapor. A equação base citada para uso na equação FAO Penman - Monteith é a seguinte (Allen *et al.*, 1998):

$$e(T) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27 \times T}{T+273.3}\right) \quad (30.1)$$

$$e_s = \frac{e(T_{\max})+e(T_{\min})}{2} \quad (30.2)$$

$$e_a = \frac{e(T_{\min})\frac{UR_{\max}}{100}+e(T_{\max})\frac{UR_{\min}}{100}}{2} \quad (30.3)$$

A constante psicrométrica é determinada pela fórmula:

$$\gamma = \frac{c_p P}{\lambda \varepsilon} \quad (30.4)$$

Para nosso caso ε pode ser simplificado para:

$$\gamma = 0.655 \times 10^{-3} P \quad (30.5)$$

em que:

γ : Constante psicométrica ($\text{Kpa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

c_p : Calor específico a pressão constante do ar seco $1,013 \times 10^{-3}$ ($\text{MJ kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$);

P : Pressão atmosférica (Kpa)

λ : Calor latente de vaporização $2,45$ (MJ.Kg^{-1});

ε : Razão da massa de vapor d'água pela massa do ar seco ($0,622$) e a pressão atmosférica pode ser calculada assumindo para temperatura de 20°C .

$$P = 101,3 \left(\frac{293-0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (30.6)$$

em que:

z : Altitude do local, acima do nível médio dos mares.

A declividade da curva de pressão de vapor (Δ) é determinada pela equação:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 \times T}{237,3 + T}\right) \right]}{(237,3+T)^2} \quad (30.7)$$

B574e Bezerra, Antônio Erivando.
Estimativa da eficiência do uso da água no cultivo irrigado da banana (Musa sp. L.), através de sensoriamento remoto / Antônio Erivando Bezerra. – Campina Grande, 2019.
90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. João Miguel de Moraes Neto, Prof. Dr. Carlos Wagner Oliveira".

Referências.

1. Banana – Cultura. 2. Irrigação – Banana. 3. Sensoriamento Remoto. 4. Demanda Hídrica. 5. Evapotranspiração. 6. Saldo de Radiação. I. Moraes Neto, João Miguel de. II. Oliveira, Carlos Wagner. III. Título.

CDU 634.771:631.67(043)



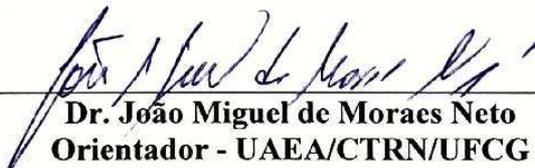
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

ANTÔNIO ERIVANDO BEZERRA

**“ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO IRRIGADO
DA BANANA (*Musa sp. L.*), ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO REMOTO”**

APROVADO (A): 18 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA



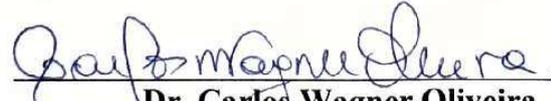
Dr. João Miguel de Moraes Neto
Orientador - UAEA/CTRN/UFCC



Dr. Juarez Paz Pedroza
Examinador - UAEA/CTRN/UFCC



Dr. Bernardo Barbosa da Silva
Examinador - UACA/CTRN/UFCC



Dr. Carlos Wagner Oliveira
Examinador - CCAB/UFCA