



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Botucatu



LEANDRO MOSCÔSO ARAUJO

**INDICADORES AGROMETEOROLÓGICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL
SUL**

BOTUCATU

2018

LEANDRO MOSCÔSO ARAUJO

**INDICADORES AGROMETEOROLÓGICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL
SUL**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem).

Orientador: Dr. Luís Henrique Bassoi.

Co-orientador: Dr. Antônio Heriberto de Castro Teixeira.

BOTUCATU

2018

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

A663i Araujo, Leandro Moscôso, 1986-
Indicadores agrometeorológicos no Perímetro Irrigado Pontal Sul / Leandro Moscôso Araujo. - Botucatu: [s.n.], 2018
166 p.: ils. color., grafs. color., tabs.

Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018
Orientador: Luís Henrique Bassoi
Coorientador: Antônio Heriberto de Castro Teixeira
Inclui bibliografia

1. Água na agricultura. 2. Caatinga. 3. Sensoriamento remoto. 4. Solos - Uso. 5. Irrigação. I. Bassoi, Luís Henrique. II. Teixeira, Antônio Heriberto de Castro. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO


TÍTULO: INDICADORES AGROMETEOROLÓGICOS NO PERÍMETRO IRRIGADO PONTAL SUL

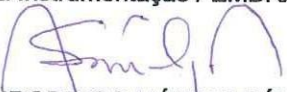
AUTOR: LEANDRO MOSCOSO ARAÚJO

ORIENTADOR: LUÍS HENRIQUE BASSOI

COORIENTADOR: ANTÔNIO HERIBERTO DE CASTRO TEIXEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. LUÍS HENRIQUE BASSOI
Embrapa Instrumentação / EMBRAPA


Prof. Dr. RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN
Depto de Engenharia Rural / UNESP - Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu


Prof. Dr. FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ
Depto de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR
Depto de Agronegócios e Agrossistemas / Faculdade de Tecnologia de Botucatu


PROF. DR. JANICE FREITAS LEIVAS
SENSORIAMENTO REMOTO / EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE

Botucatu, 06 de abril de 2018.

DEDICO

Aos meus pais *Guilherme A. Limeira Araújo* e *Rilma T. Moscôso Araújo*, pelos ensinamentos e pelo amor que tenho por eles.

À minha esposa *Janielly S. Costa Moscôso*, por todo o amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meus caminhos e me dar forças para continuar em busca dos objetivos.

Aos meus pais, Guilherme A. Limeira Araújo e Rilma T. Moscôso Araújo por todo o apoio necessário para a conclusão deste curso.

À minha esposa, Janielly S. Costa Moscôso por todo o carinho e apoio.

Ao Professor Dr. Luís Henrique Bassoi, pela amizade, orientação, paciência, compreensão e incentivo expressado na realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Antônio Heriberto de Castro Teixeira, pelos conhecimentos concedidos e pela amizade.

À Professora Dr. Célia Regina Lopes Zimback, pela amizade, apoio e incentivo durante o doutorado.

A todos os amigos que fiz em Botucatu, em especial ao Alexandre, Jannaylton, Élvis, Álvaro, Ana Claudia e Marcos, pelo companheirismo e pelo apoio.

Ao GEPAG, pelo apoio técnico, por todo conhecimento que obtive e pelas amizades que fiz.

A Todos os meus colegas de curso...

A Embrapa Semiárido pelo fornecimento de parte dos dados utilizados no trabalho.

A CAPES, por ter me concedido a bolsa de estudos que me permitiu realizar este trabalho.

A Faculdade de Ciências Agronômicas (FCA) da UNESP por contribuir com a minha formação acadêmica.

RESUMO

O questionamento sobre o uso da água na agricultura torna-se cada vez mais constante, diante do contexto das mudanças climáticas e da necessidade de aumentar a produção de biomassa para alimentação, transformação ou processamento. O Perímetro Irrigado Pontal Sul, localizado na bacia hidrográfica do Rio Pontal, na região semiárida do estado de Pernambuco, está em início de operação. Assim, a avaliação do fluxo de água entre a superfície terrestre e a atmosfera e da produtividade da água podem contribuir para a gestão hídrica em escala regional. Para isso, imagens MODIS (Terra) e dados de estações agrometeorológicas no período entre 2000 a 2015 foram utilizadas conjuntamente com o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) para a estimativa da evapotranspiração real (ET_r), da biomassa (BIO) e da produtividade da água (WP) no Perímetro Irrigado Pontal Sul. A ET_r apresentou valor médio de $0,91 \text{ mm dia}^{-1}$ na área com vegetação natural - Caatinga (VN), e de $1,50 \text{ mm dia}^{-1}$ na área com agricultura irrigada (AI) durante os 16 anos de avaliação. A BIO média para o mesmo período foi de $30,50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ na VN e $49,32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ na AI. A WP apresentou valor médio de $2,06 \text{ kg m}^{-3}$ na VN e $2,43 \text{ kg m}^{-3}$ na AI. Os menores valores médios de ET_r , BIO e WP foram registrados em 2013 ($0,40 \text{ mm dia}^{-1}$, $9,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $1,53 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente), enquanto os maiores valores médios observados em 2009 ($1,81 \text{ mm dia}^{-1}$, $66,48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $2,79 \text{ kg m}^{-3}$ respectivamente). A área de AI condiciona um incremento às médias diárias dos parâmetros estudados. A VN apresentou resultados relevantes nas regiões em que a Caatinga é mais densa. As estimativas da ET_r , BIO e WP permitem compreender de maneira mais ampla a demanda hídrica em escala regional no decorrer do período avaliado, relacionando seus resultados aos efeitos causados pelo uso e ocupação da terra e as possíveis mudanças climáticas da região.

Palavras-chave: SAFER, MODIS, sensoriamento remoto, produtividade da água, Caatinga.

ABSTRACT

Questioning of water use in agriculture is becoming more and more frequent, given the context of climate change and the need to increase biomass production for food or processing. The Pontal Sul Irrigated Scheme, located in the Pontal River basin, in the semi-arid region of the state of Pernambuco, Brazil, is in the beginning of operation. Thus, the assessment of water flow between the land surface and the atmosphere and water productivity can contribute to water management on a regional scale. For this, MODIS images and data from weather stations between 2000 and 2015 were used together the Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving (SAFER) to estimate actual evapotranspiration (ET_r), biomass (BIO), and water productivity (WP) in the Pontal Sul Irrigated Scheme. ET_r presented a mean value of 0.91 mm day^{-1} in areas with natural vegetation - Caatinga (VN) and 1.50 mm dia^{-1} in areas with irrigated agriculture (AI) during the 16 years of evaluation. The average BIO for the same period was $30.50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in VN and $49.32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ in AI. The WP presented a mean value of 2.06 kg m^{-3} in VN and 2.43 kg m^{-3} in AI areas. The lowest mean values of ET_r , BIO and WP were recorded in 2013 (0.40 mm day^{-1} , $9.95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and 1.53 kg m^{-3} , respectively), while the highest mean values was observed in 2009 (1.81 mm day^{-1} , $66.48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$ and 2.79 kg m^{-3} respectively). In AI area it was observed an increase in the daily averages of the studied parameters. The VN presented relevant results in areas where the Caatinga is denser. The ET_r , BIO and WP estimates allow a broader understanding of water demand on a regional scale during the period evaluated, relating their results to the effects caused by land use and occupation and possible climatic changes in that region.

Key words: SAFER, MODIS, Remote Sensing, Water Productivity, Caatinga.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.	Localização geográfica do Perímetro Irrigado Pontal Sul.....	47
Figura 2.	Localização geográfica das estações agrometeorológicas automáticas.....	49
Figura 3.	Fluxograma estrutural para a estimativa da ET_r , BIO, WP e BH em escala regional.....	53
Figura 4.	Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2000.....	61
Figura 5.	Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2005.....	62
Figura 6.	Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2015.....	63
Figura 7.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	66
Figura 8.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	67
Figura 9.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	68
Figura 10.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	69
Figura 11.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	70
Figura 12.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	71
Figura 13.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	72
Figura 14.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	73

Figura 15.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	74
Figura 16.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	75
Figura 17.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	76
Figura 18.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	77
Figura 19.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	78
Figura 20.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	79
Figura 21.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	80
Figura 22.	Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	81
Figura 23.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.....	83
Figura 24.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.....	83
Figura 25.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.....	84
Figura 26.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.....	84
Figura 27.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.....	84
Figura 28.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul,	

	Petrolina-PE, ano de 2005.....	84
Figura 29.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.....	85
Figura 30.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.....	85
Figura 31.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.....	85
Figura 32.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.....	85
Figura 33.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010.....	86
Figura 34.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.....	86
Figura 35.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.....	86
Figura 36.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.....	86
Figura 37.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.....	87
Figura 38.	Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.....	87
Figura 39.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média \pm Desvio Padrão (DP).	89
Figura 40.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média \pm Desvio Padrão (DP).	90
Figura 41.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média \pm Desvio Padrão (DP).	91
Figura 42.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média \pm Desvio Padrão (DP).	92

Figura 43.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média \pm Desvio Padrão (DP).	93
Figura 44.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média \pm Desvio Padrão (DP).	94
Figura 45.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média \pm Desvio Padrão (DP).	95
Figura 46.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média \pm Desvio Padrão (DP).	96
Figura 47.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média \pm Desvio Padrão (DP).	97
Figura 48.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média \pm Desvio Padrão (DP).	98
Figura 49.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média \pm Desvio Padrão (DP).	99
Figura 50.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média \pm Desvio Padrão (DP).	100
Figura 51.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média \pm Desvio Padrão (DP).	101
Figura 52.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média \pm Desvio Padrão (DP).	102
Figura 53.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média \pm Desvio Padrão (DP).	103
Figura 54.	Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média \pm Desvio Padrão (DP).	104
Figura 55.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.....	106
Figura 56.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.....	106
Figura 57.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.....	107
Figura 58.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.....	107
Figura 59.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e	

	ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.....	107
Figura 60.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2005.....	107
Figura 61.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.....	108
Figura 62.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.....	108
Figura 63.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.....	108
Figura 64.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.....	108
Figura 65.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010.....	109
Figura 66.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.....	109
Figura 67.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.....	109
Figura 68.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.....	109
Figura 69.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.....	110
Figura 70.	Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.....	110
Figura 71.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	112

Figura 72.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média ± Desvio Padrão (DP).....	113
Figura 73.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média ± Desvio Padrão (DP).....	114
Figura 74.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média ± Desvio Padrão (DP).....	115
Figura 75.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média ± Desvio Padrão (DP).....	116
Figura 76.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média ± Desvio Padrão (DP).....	117
Figura 77.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média ± Desvio Padrão (DP).....	118
Figura 78.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média ± Desvio Padrão (DP).....	119
Figura 79.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média ± Desvio Padrão (DP).....	120
Figura 80.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média ± Desvio Padrão (DP).....	121
Figura 81.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média ± Desvio Padrão (DP).....	122
Figura 82.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média ± Desvio Padrão (DP).....	123
Figura 83.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média ± Desvio Padrão (DP).....	124
Figura 84.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média ± Desvio Padrão (DP).....	125

Figura 85.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	126
Figura 86.	Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média \pm Desvio Padrão (DP).....	127
Figura 87.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.....	129
Figura 88.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.....	129
Figura 89.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.....	130
Figura 90.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.....	130
Figura 91.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.....	130
Figura 92.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2005.....	130
Figura 93.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.....	131
Figura 94.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.....	131
Figura 95.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.....	131
Figura 96.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.....	131
Figura 97.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010.....	132

Figura 98.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.....	132
Figura 99.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.....	132
Figura 100.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.....	132
Figura 101.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.....	133
Figura 102.	Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.....	133

LISTA DE SÍMBOLOS

ET	Evapotranspiração (mm dia ⁻¹)
ET _r	Evapotranspiração real (mm dia ⁻¹)
BIO	Biomassa (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)
WP	Produtividade da água (kg m ⁻³)
ET ₀	Evapotranspiração de referência (mm dia ⁻¹)
T _a	Temperatura do ar (°C)
RG	Radiação global (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
P	Precipitação pluviométrica (mm)
ET _r /ET ₀	Razão entre a ET _r e a ET ₀
R ²	Coefficiente de correlação
α ₀	Albedo da superfície
α ₁	Banda do infravermelho próximo
α ₂	Banda do vermelho
α ₂₄	Albedo diário
NDVI	Índice de vegetação por diferença normalizada
R _n	Saldo de radiação (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
a _L	Coefficiente de regressão da radiação líquida de ondas longas
T _{sw}	Transmissividade atmosférica
Z	Elevação das estações agrometeorológicas
G	Fluxo de calor no solo (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R _a	Radiação de ondas longas atmosférica (W m ⁻²)
ε _a	Emissividade da atmosfera
R _s	Radiação de ondas longas da superfície (W m ⁻²)
RR	Radiação solar de ondas curtas refletidas (W m ⁻²)
T _s	Temperatura da superfície (K)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (5,67 x 10 ⁻⁸ W m ⁻² K ⁻⁴)
H	Fluxo de calor sensível (W m ⁻²)
λE	Fluxo de calor latente (W m ⁻²)
APAR	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (W m ⁻²)
ε _{max}	Eficiência máxima da luz (2,50 g MJ ⁻¹)

E_f	Fração evapotranspirativa
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa ($W\ m^{-2}$)
f_{PAR}	Fator de correção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
2	REVISÃO DE LITERATURA	28
2.1	Uso e ocupação do solo	28
2.2	Geoprocessamento	29
2.2.1	Sensoriamento remoto.	30
2.2.2	Sensores remotos	32
2.3	Balanco de energia	34
2.4	Evapotranspiração (ET)	36
2.4.1	Evapotranspiração de referência (ET ₀)	37
2.4.2	Evapotranspiração real (ET _r)	39
2.4.3	Evapotranspiração estimada por algoritmos	40
2.5	Biomassa (BIO)	42
2.6	Produtividade da água (WP)	44
2.7	Algoritmo SAFER	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1	Área de estudo	47
3.2	Clima da região.....	48
3.3	Vegetação	48
3.4	Dados meteorológicos	49
3.5	Processamento digital das imagens de satélite	50
3.5.1	Uso e ocupação do solo	50
3.5.2	Descrição do algoritmo SAFER	52
3.5.3	Albedo da superfície (α_0)	54
3.5.4	Saldo de radiação (R _n)	55
3.5.5	Fluxo de calor no solo (G)	56
3.5.6	Radiação de ondas longas atmosféricas (R _a)	56
3.5.7	Radiação de ondas longas da superfície (R _s)	56

3.5.8	Temperatura da superfície (T_s)	57
3.5.9	Fluxo de calor sensível (H)	57
3.5.10	Evapotranspiração real (ET_r)	58
3.5.11	Biomassa (BIO)	58
3.5.12	Produtividade da água (WP)	60
4	RESULTADOS	61
4.1	Uso e ocupação do solo no Perímetro Irrigado Pontal Sul	61
4.2	Parâmetros climáticos	64
4.3	Evapotranspiração real (ET_r)	66
4.4	Biomassa (BIO)	88
4.5	Produtividade da água (WP)	111
5	DISCUSSÃO	135
5.1	Uso e ocupação do solo no Perímetro Irrigado Pontal Sul	135
5.2	Caracterização climática do Perímetro Irrigado Pontal Sul	136
5.3	Comportamento da Evapotranspiração real (ET_r) no Perímetro Irrigado Pontal Sul	137
5.4	Comportamento da Biomassa (BIO) no Perímetro Irrigado Pontal Sul.....	141
5.5	Comportamento da Produtividade da água (WP) no Perímetro Irrigado Pontal Sul	144
6	CONCLUSÕES	148
	REFERÊNCIAS	149

1 INTRODUÇÃO

O uso racional da água na agricultura é um tema que vem sendo cada vez mais discutido em eventos ao redor do mundo, devido às possíveis crises hídricas e a necessidade de produzir alimentos em grande quantidade, levando em consideração o exponencial crescimento populacional ao longo dos anos. Por este motivo, coloca-se em pauta os diferentes manejos de uso da água, para que sejam mais eficientes em termos de racionalização e potencialização da produção agrícola.

O Brasil é o país com maior quantidade de água por pessoa no mundo, no entanto, os últimos anos (2012-2017) foram marcados com uma forte seca, causadas por fenômenos naturais, aliadas a uma série de falhas de planejamento administrativo, provocando uma verdadeira crise hídrica, principalmente nas regiões Nordeste e Sudeste, sendo que nessa última se concentra a maior população do país. No Nordeste, mais especificamente no Semiárido, a atividade agrícola desempenha um papel de grande importância na economia da região, necessitando a cada dia aumentar a oferta de água para a agricultura irrigada.

O Perímetro Irrigado Pontal Sul, localizado na região semiárida de Pernambuco, faz parte de um projeto produzido pela CODEVASF que visa o desenvolvimento da região semiárida por meio da agricultura irrigada, respeitando as condições hídricas da região. Este projeto se encontra em fase inicial de operação, demandando informações cruciais que possam contribuir para o manejo adequado da irrigação levando em consideração a baixa precipitação pluvial, a distribuição irregular das chuvas e elevada taxa de evaporação, fenômenos característicos da região, evitando assim a diminuição da oferta de água para a agricultura e outros setores (geração de energia, uso urbano, uso industrial, prestação de serviços, e outros), também usuários desse recurso natural.

Diante da progressiva demanda por água e dos fatores adversos (manejo inadequado, períodos de estiagem, entre outros), há a necessidade de estudos que contemplem as mudanças climáticas e as ações antrópicas em áreas de âmbito agrícola. Portanto, a utilização da bacia hidrográfica como objeto de pesquisa se torna muito importante quando se trata de estudos relacionados ao manejo hídrico, por ser uma região captadora de água de precipitação e que a conduz para cursos d'água. Isso torna a bacia hidrográfica uma área de grande relevância para o ciclo

hidrológico, principalmente tendo por finalidade a implantação e/ou ampliação de atividades agrícolas.

Levando em consideração as constantes alterações climáticas, torna-se importante a utilização de meio que contabilizem a produtividade da água (WP) sendo, portanto, necessário a estimativa da evapotranspiração (ET) e da biomassa vegetal (BIO), essenciais neste meio. A ET, processo biofísico que associa a evaporação da água presente no perfil do solo com a água transpirada pelos vegetais, é um importante componente do ciclo hidrológico utilizado para mensurar o balanço hídrico. É um parâmetro indispensável para realizar o manejo de irrigação de acordo com as necessidades hídricas das culturas que serão implantadas e as condições meteorológicas da região, sendo estimado por meio de métodos que expõem diferentes finalidades.

No entanto, os métodos atuais de estimativa da ET não são exatos quando aplicados em escala regional, podendo elevar a quantidade de erros na sua determinação, pois não apresentam meios que diferenciem os elementos heterogêneos da superfície terrestre. A implantação de estações meteorológicas em diferentes pontos na região é uma das medidas utilizadas para diminuir estes erros, tornando os resultados mais exatos em termos de espaço e tempo. Porém, os custos de aquisição e instalação são muito elevados, inviabilizando a sua prática. Entretanto, torna-se necessário a utilização de ferramentas e/ou técnicas que realizem a estimativa da ET de forma mais detalhada, apresentando o mínimo de imprecisão e baixos custos.

Desta forma, o sensoriamento remoto orbital (SRO) apresenta-se como uma ferramenta indispensável, contendo um conjunto de dados da superfície do globo terrestre obtidos por sensores presentes em satélites, e disponibilizados gratuitamente por meio de imagens orbitais. Assim, esta técnica associada a dados meteorológicos, com o auxílio de ferramentas que possibilitem o processamento destes dados como o Sistema de Informações Geográficas (SIG) e o emprego de modelos matemáticos, são de fundamental importância, principalmente quando houver limitação de recursos financeiros e de infraestrutura para a realização dessa análise.

O algoritmo SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) é um conjunto de modelos matemáticos simplificados com o objetivo de estimar a ET em larga escala por meio de imagens orbitais, sendo associado à dados de estações meteorológicas (agrometeorológicas, convencionais, automáticas e analógicas) e auxiliado pelo SIG. Este algoritmo vem apresentando bons resultados nos últimos anos, expressando grande aceitação por não exigir condições extremas e classificação de culturas. Além da estimativa da ET_r , o SAFER realiza a avaliação de uma série histórica do balanço de energia, BIO e WP, tornando-se uma poderosa ferramenta a ser utilizado no manejo da irrigação em grandes escalas e no planejamento do uso da água na agricultura.

Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo modelar os componentes do balanço de energia por meio da estimativa da evapotranspiração, bem como da biomassa e da produtividade da água, levando em consideração o uso e ocupação da terra na área do Perímetro Irrigado Pontal Sul, localizado na bacia hidrográfica do Rio Pontal, semiárido pernambucano, utilizando imagens orbitais do sensor MODIS, satélite Terra.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Uso e ocupação do solo

O conhecimento a respeito do uso e da cobertura da superfície da terra contribui para o planejamento das atividades que serão implantadas, visto que proporciona um diagnóstico e análises com relação aos elementos nelas presentes, considerando as constantes alterações sofridas pela paisagem por meio dos fenômenos naturais e das ações antrópicas.

As interações entre a superfície e a atmosfera podem sofrer alterações devido a oscilação da troca de energia entre eles, provocado pelas práticas de uso e modificações na superfície da Terra, causando transformações de pequena e larga escala de forma positiva ou negativa nos componentes que regulam o clima da Terra (FOLEY et al., 2005). Desta forma, o planejamento inadequado do uso da terra e as modificações na sua cobertura podem causar danos na biodiversidade, alterações do albedo terrestre, da composição química da atmosfera, do ciclo biogeoquímico, do balanço energético e, posteriormente, gerar mudanças no clima (LAMBIN; GEIST; LEPERS, 2003).

De acordo com Araújo-Filho, Meneses e Sano (2007), os mapas de uso e cobertura da terra são fundamentais na criação de projetos para o crescimento da agricultura, pois apresentam recursos que favorecem o desenvolvimento sustentável e ambiental em grandes áreas. O mesmo pode ser utilizado de forma individual ou associado a informações relacionadas à meteorologia e a características da superfície, tornando-se indispensável para o planejamento de manejo, de desenvolvimento, de expansão local e regional, e para o controle e monitoramento de atividades.

Clark et al. (2010) afirmaram que a utilização de mapas voltados as pesquisas relacionadas ao uso e cobertura do solo são muito importantes no monitoramento, compreensão e prevenção dos efeitos das complexas interações entre o homem e a natureza, os quais abrangem escalas locais, regionais e globais. Os mesmos autores explicaram que as práticas do uso destes mapas proporcionam a representação espacial da terra, estimando o desmatamento para a prática de agricultura, pastagens e mudanças na superfície, possibilitando o desenvolvimento

de estratégias para a proteção da biodiversidade e o entendimento de como a globalização afeta as tendências de uso da terra local e regional. Os mapas são elaborados a partir da interpretação das imagens de satélite, utilizando softwares de Sistema de Informações Geográficas (SIG), objetivando representar tematicamente objetos, formas e fenômenos presentes na superfície, demarcando áreas que apresentem as mesmas características ou as mesmas respostas espectrais. De posse dos mapas, pode-se realizar o monitoramento pela análise dos resultados, permitindo a percepção das alterações ocorridas, as quais servirão como subsídio para estudos ambientais futuros da área, criando-se um banco de dados que servirão para identificar a evolução dos possíveis danos causados ao meio ambiente. Pode-se também criar um planejamento para solucionar as questões do crescimento desordenado, tornando-se um pré-requisito para a recuperação de áreas e para a melhoria da qualidade de vida (DEFRIES et al., 2007).

2.2 Geoprocessamento

Com o avanço das tecnologias de observação e detecção da superfície da Terra, o volume de dados geocientíficos aumentou consideravelmente na última década, graças à evolução dos sistemas de exploração dos satélites que adquirem dados de teledetecção de alta resolução, e aos novos sistemas de incentivo a pesquisa, que disponibilizam dados *in situ* e apoiam as pesquisas (ZHAO; FOERSTER; YUE, 2012).

Estas pesquisas estão relacionadas ao uso de geotecnologias, denominadas de geoprocessamento, tratando-se da utilização de um conjunto de ferramentas que envolvem o processamento de imagens de satélite com o intuito de monitorar os diferentes tipos de fenômenos naturais e antrópicos sobre a superfície terrestre, visando evitar ou minimizar os danos causados ao meio ambiente (ZHAO; FOERSTER; YUE, 2012).

O geoprocessamento também pode ser definido como um instrumento computacional de extrema eficiência no que diz respeito à aquisição, armazenamento, análise, simples resgate, criação, transformação e exibição de informações espaciais georreferenciadas ao redor do mundo (BURROUGH, 1986; EASTMAN, 1997; HAMADA e GONÇALVES, 2007). As técnicas geotecnológicas

fundamentais que compõe a transcrição das informações geográficas são o Sistema de Informação Geográfica (SIG), o sensoriamento remoto, a topografia, a cartografia, a fotogrametria, a geoestatística e o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

De acordo com Zhao, Foerster e Yue (2012), a interoperabilidade e a acessibilidade destas técnicas melhoram o desenvolvimento de pesquisas em vários campos, ajudando a aumentar o conhecimento geoespacial disponível para a sociedade.

Conforme Donha et al. (2006), as pesquisas que envolvem o monitoramento da superfície requerem uma imensa gama de informações que compreenda a análise de dados físicos como solos, superfície da água, vegetação e outros, permitindo identificar as alterações sobre a superfície, possibilitando prever as avaliações futuras. Ainda segundo os mesmos autores, o SIG possibilita realizar um planejamento de atividades sobre a área objeto, evitando ao máximo os danos que podem ocorrer no local, enfatizando-o como uma ferramenta que permite a interação do meio ambiente com as práticas realizadas pelo homem.

O uso do geoprocessamento na agricultura permite a elaboração de mapas temáticos, apresentando delimitações de uso e ocupação da terra, estruturas fundiárias de diferentes localidades, áreas de reserva legal e preservação permanente, assim como, fenômenos antropogênicos e ambientais relacionados - erosão do solo, alagamento, áreas degradadas e vazantes, tornando-se indispensável para o planejamento para a implantação de práticas agrícolas em extensas áreas (PAZ; FRANÇA; LOCH, 2009).

2.2.1 Sensoriamento Remoto

A aplicação de técnicas atuais no processamento de imagens de satélite e análise através do Sistema de Informações Geográficas (SIG) tornam mais prestativo o supervisionamento e o diagnóstico da cobertura terrestre permitindo compreender a atividade superficial terrestre em diversas escalas que irão contribuir para uma tomada de decisão correta e significativa (TONELI; CARVALHO; ACERBI JUNIOR, 2009). Por este motivo, as imagens orbitais tornaram-se fundamentais para a avaliação ambiental e dos inúmeros ecossistemas presentes na superfície terrestre (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A associação destas técnicas denominadas de sensoriamento remoto (SR) permite a obtenção de registros relacionados ao fluxo de energia radiante refletida ou emitida pela superfície da terra através de sistemas ópticos complexos (MENESES; ALMEIDA, 2012). Para acompanhar as transformações e criar planos de manejo sustentável para a agricultura, o uso de técnicas de SR vem sendo utilizadas, criando meios que possam suprir o déficit hídrico. Esta técnica se destaca por cobrir extensas áreas além de conter ferramentas indispensáveis ao planejamento deste recurso (MÄTZLER, 2008).

Com a evolução desta tecnologia, composta por um conjunto de ferramentas capacitadas para capturar imagens da superfície em larga escala, foram criados diferentes conceitos relacionados ao SR, contudo, a definição clássica e mais adotada por pesquisadores é de referir-se a técnicas para coleta de informações sobre objetos da superfície terrestre por meio de instrumentos que não apresentam interações entre os sensores e os objetos da superfície (AVERY; BERLIN, 1992; MENESES; NETO, 2001; MÄTZLER, 2008).

Porém, de acordo com Meneses e Almeida (2012), o melhor conceito empregado cientificamente ao SR é que se trata de uma ciência destinada ao aperfeiçoamento de técnicas de obtenção de imagens da superfície da terra, pela identificação e quantificação dos resultados da interação entre a radiação eletromagnética e os materiais terrestres.

O SR é uma ferramenta de grande relevância no monitoramento e no cômputo de diferentes fenômenos meteorológicos e ambientais, importante recurso no acompanhamento das alterações climáticas, auxiliando na condução da preservação do meio ambiente (MOREIRA, 2007). Esta ferramenta proporciona a obtenção de informações geográficas importantes e suas características altamente detalhadas para serem usadas no manejo hídrico de bacias hidrográficas (STISEN et al., 2008).

De acordo com Bastiaanssen et al., (1998a), com o surgimento do SR, pode-se realizar o monitoramento espacial e temporal dos diferentes biomas presentes na superfície da terra e detectar, em tempo real, as alterações que possam haver na mesma, causadas por modificações antrópicas e/ou naturais.

O SR espacial fornece periodicamente e espacialmente informações contínuas sobre superfícies da terra com máxima resolução, que é útil para a parametrização

das variáveis biofísicas da superfície, sendo reconhecido mundialmente por apresentar meio mais adequado para o mapeamento da distribuição espacial da ET (WANG et al., 2016), graças as suas ferramentas de previsão que têm a vantagem de necessitar de poucos dados de entrada em comparação com outras abordagens bem conhecidas, tais como Penman-Monteith (PM) da Food and Agriculture Organization (FAO56). No entanto, é aconselhável uma revisão por meio do processo de avaliação da transferência regional de calor pela equação de Makkink, para que seja utilizado na gestão da água de irrigação em escala regional (CRUZ-BLANCO; LORITE; SANTOS, 2014).

Muitas pesquisas têm sido realizadas sobre as maneiras de criar mapas usando dados de SR, as quais incluem o uso de índices de vegetação derivados de bandas visíveis e de infravermelho próximo e a inclusão de bandas do infravermelho termal (FRENCH et al., 2015).

2.2.2 Sensores Remotos

Os registros de imagens da superfície da terra são realizados através da energia eletromagnética refletida por objetos e captados por sensores remotos, que irão transformá-los em sinais elétricos e corrigi-los para que possam ser arquivados e enviados em tempo real. Logo em seguida, são transformados em dados que representam as diferentes composições da superfície terrestre. Mais precisamente, um sensor remoto pode medir bandas estreitas de energia radiante e, quanto maior for o número dessas bandas, maior será a sua resolução espectral, sendo capaz de interagir com a radiação, absorvendo e refletindo determinados comprimentos de onda (KING; HERRING, 2001).

Para uma utilização bem-sucedida de análises de alterações da superfície terrestre utilizando dados de sensoriamento remoto, deve-se levar em consideração os sistemas de sensores remotos, características ambientais, e métodos de processamento de imagem. A evolução conquistada por meio de novos sensores pode ser observada no aperfeiçoamento das resoluções temporais, espectrais, espaciais e radiométricas, possibilitando o mapeamento, os cálculos e pesquisas relacionadas aos fenômenos geomorfológicos e climáticos com agilidade e exatidão nunca antes alcançada (FLORENZANO, 2005). As resoluções dos dados de

sensoriamento remoto têm um impacto relevante sobre o sucesso de projetos relacionados à detecção de mudança na superfície.

Em 1 de Março de 1984, a National Aeronautics and Space Administration (NASA) lançava o Landsat 5, projetado e construído ao mesmo tempo que o Landsat 4, sendo que o primeiro orbitou o planeta mais de 150.000 vezes durante 29 anos, transmitindo mais de 2,5 milhões de imagens das condições da superfície da Terra ao redor do mundo, entre elas os impactos de riscos naturais, variabilidade e mudanças climáticas, práticas de uso da terra, desenvolvimento e urbanização, evolução do ecossistema, a crescente demanda por recursos hídricos e energéticos, mudanças nas demandas agrícolas em todo o mundo, o esgotamento da floresta tropical, grandes incêndios florestais e inundações, a produção mundial de culturas, expansão das plataformas de gelo e o seu recuo, o que ajudou a aumentar a nossa compreensão e consciência do impacto dos seres humanos sobre a Terra (United States Geological Survey - USGS, 2013).

O LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*), como é conhecido o Landsat 8, foi lançado em 11 de Fevereiro de 2013 e é o mais recente satélite a contribuir com o USGS, em conjunto com o programa Landsat liderado pela NASA, estabelecendo e executando estratégias de aquisição de dados que garantem a obtenção de observações sobre a massa terrestre do planeta, apoiando o trabalho na agricultura, geologia, silvicultura, educação, mapeamento, bem como registrar a longo prazo as mudanças naturais e induzidas pelo homem na superfície da terra (USGS/ESA, 2015).

O MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) é um sensor de cunho científico lançado em 1999 a bordo da plataforma Terra (Earth Observing System - EOS AM), e em 2002 a bordo da plataforma Aqua (EOS PM), orbitando toda a superfície da Terra entre 1 e 2 dias de forma sincronizada. O Terra percorre de Norte a Sul pelo Equador, passando sobre o Brasil, na parte da manhã (10:30h), enquanto o Aqua percorre na parte da tarde (13:30h), ao longo do Equador, do Sul para o Norte (USGS, 2016c).

O sensor MODIS possui dados em 36 bandas espectrais que variam em comprimento de onda de 0,4 nm para 14,4 nm e em diferentes resoluções espaciais (bandas 1-2 em 250 m, bandas 3-7 em 500 m e bandas 8-36 em 1 km),

possibilitando a melhoria na compreensão da dinâmica global e dos processos que ocorrem na cobertura de nuvens, no balanço de radiação, na superfície, nos oceanos e na baixa atmosfera, prevendo alterações globais com alta precisão (USGS, 2016c).

Song et al. (2011) propuseram que o uso de dados de outros sensores remotos em conjunto pode fornecer informações preciosas, como a vegetação e informações texturais, propriedades dielétricas da superfície capazes de penetrar em nuvens (sensor de radar), detecção e variação de luz (LiDAR) de resolução mais grosseira, e altas resoluções temporais dos sensores (sensor MODIS).

2.3 Balanço de Energia

A estimativa da transferência de energia e de massa no sistema solo-água-planta-atmosfera, por meio de pesquisas relacionadas ao saldo de radiação, é denominado de balanço de energia (FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1991).

O mesmo é caracterizado como o delineamento das interações entre a superfície e os diferentes tipos de energia, permitindo quantificar o fluxo de energia responsável pela evaporação da água e por alterações na temperatura da superfície, considerando que os fluxos de umidade e energia ocorrem por condução e convecção pelo deslocamento dos fluidos (GOMES, 2009). É possível ainda avaliar as variações microclimáticas da vegetação por meio das alterações atmosféricas, das condições do solo e do ciclo evolutivo das culturas (FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1991).

Os parâmetros que compõem o balanço energético não são constantes em virtude das condições que se encontram a meteorologia, o solo, o relevo e o ciclo fenológico das plantas (FOKEN et al., 2006; BORMA et al., 2009). A interação entre a superfície terrestre e a atmosfera, pela troca de calor e massa, pode causar interferência nas atividades microbianas do solo, na germinação das sementes e nos cultivos agrícolas; portanto, estudos relacionados ao balanço energético ganham expressiva importância no planejamento de atividades agrícolas, visando obter bons rendimentos (FOKEN et al., 2006; BORMA et al., 2009).

Conforme Campos e Campos (2004), as pesquisas relacionadas ao balanço de energia computam os pontos energéticos concentrados, fundamentais para identificar a procura e a eficiência energética, retratada pela compensação líquida e pela interação saída-entrada, resultando na quantificação dos elementos empregados e gerados que serão convertidos em fração de energia. Os principais equações dos algoritmos existem para estimar o balanço energético da superfície espacialmente distribuídos em extensas áreas, que são resumidas e compostas em dados de sensoriamento remoto (BASTIAANSSEN et al., 1998a).

De acordo com Villa Nova (1973), o uso do balanço de energia pode ser considerado como um procedimento para a determinação da evapotranspiração na superfície, capaz de mensurar a quantidade de energia que está disponível em um ambiente natural e destacar a porção utilizada em diversos processos, alcançando resultados satisfatórios.

Bowen (1926) foi o precursor das pesquisas relacionadas ao balanço de energia em ambientes naturais, realizando a estimativa da relação entre o fluxo de calor sensível irradiado pela superfície da água, ao longo dos processos da evaporação e o fluxo de calor latente, devido aos gradientes de temperatura e pressão de vapor sobre a superfície, intitulado Razão de Bowen.

As metodologias comumente utilizadas na estimativa dos elementos que integram o balanço de energia são pontuais e correspondem apenas a escalas de nível local, não permitindo expandí-las para áreas mais extensas, em virtude da diversidade da superfície e do desenvolvimento natural dos procedimentos da transferência de calor, o que faz do sensoriamento remoto a única técnica plausível e de prática acessível, proporcionando significativas estimativas das variáveis físicas em escalas superiores (ARAÚJO, 2014).

Conforme Maldonado, Santos e Graça (2007), a agilidade de acesso as informações climáticas oferecidas pelos sensores orbitais facilitam a compreensão dos fatores climáticos do ecossistema, o que proporciona melhor eficiência do manejo hídrico na agricultura irrigada.

Um possível mapeamento mais exato da ET em escala regional e sazonal por meio dos componentes do balanço energético vêm demonstrando ser viável,

validando os dados meteorológicos junto aos dados de sensoriamento remoto em resoluções espaciais e temporais adversas (ROCCHINI; NETELER, 2012).

Allen et al. (2011) afirmaram que o cômputo da ET em escala regional retrata a importância de pesquisas relacionadas a troca de energia entre a biosfera e a atmosfera, exaltando a utilização de imagens de satélite e algoritmos na transformação de grandezas em dados diários.

2.4 Evapotranspiração (ET)

Segundo Moura et al. (2013), o manejo sustentável dos recursos hídricos na agricultura exige o conhecimento básico dos componentes do balanço hídrico, principalmente, em regiões onde a escassez de água é acentuada, como na região semiárida, que apresenta intensa oscilação espaço-temporal da precipitação. A evapotranspiração (ET) é um desses componentes, sendo seu estudo de fundamental importância para o manejo hídrico agrícola regional e para a implementação de projetos agrícolas.

A ET pode ser definida como o conjunto da evaporação da água na superfície do solo junto com a transpiração dos vegetais (ALLEN et al., 1998), exercendo sua função na atividade climática em escala regional e global, ligando energia, clima e hidrologia, bem como, na produção primária dos ecossistemas da terra que representam a transferência de massa e energia da superfície terrestre para a atmosfera (RUHOFF et al., 2012).

Allen et al. (1998) complementaram ainda que a estimativa da ET é primordial para o ciclo hidrológico, pois o seu cálculo possibilita realizar a quantificação de água a ser aplicada na agricultura, sendo seus resultados influenciados pelas condições do manejo utilizado, das culturas implantadas, das características do ambiente e dos fatores meteorológicos como a temperatura, umidade do ar, radiação solar e velocidade do vento.

No ciclo hidrológico, a precipitação pluvial e a ET são parâmetros de sentidos antagônicos representados em milímetros e contabilizados no balanço hídrico, onde irão fornecer informações acerca do déficit e do excedente hídrico, fundamental para

a realização de pesquisas relacionadas à agrometeorologia e agricultura irrigada (THORNTHWAITE, 1948).

Conforme Mendoza e Menezes (2014), o cômputo da ET não só demonstrou ser fundamental para o desenvolvimento da modelagem hidrológica, como também auxiliou no manejo de bacias hidrográficas e no gerenciamento dos recursos hídricos locais, tornando-se imprescindível no manejo hídrico sustentável de cultivos irrigados.

Para Costa (2003), em estudos relacionados a bacias hidrográficas, a estimativa da ET é menos precisa quando se trata dos constituintes do ciclo hidrológico, sendo de igual importância quando comparada aos deflúvios e a precipitação pluvial de uma bacia.

De acordo com Brutsaert (1982), os estudos relacionados à ET em bacias hidrográficas apresentam grande relevância na predição de estiagens e enxurradas, pois o acúmulo de água na superfície, proveniente da precipitação, depende do teor de água que o perfil do solo apresenta e da evapotranspiração que ocorreu na área de estudo.

O cômputo da ET vem ganhando escala regional por meio da utilização de algoritmos associados a imagens orbitais e várias outras técnicas de sensoriamento remoto conforme é demonstrado em trabalhos desenvolvidos por Bastiaanssen et al. (1998a) e Teixeira (2012), devido a limitações que os métodos tradicionais apresentam e por haver necessidade de caracterizar e quantificar a vegetação e os processos hidrológicos.

2.4.1 Evapotranspiração de referência (ET_0)

Em amplas superfícies cobertas naturalmente por vegetação de pequeno porte em sua totalidade, como o cultivo de grama ou alfafa, dependendo do clima da região, em pleno desenvolvimento, apresentado tamanhos iguais e bem supridas de água, pode-se estimar a evapotranspiração potencial (ET_p), tendo por base o volume de água transferido para a atmosfera por unidade de área (THORNTHWAITE; WILM, 1944; PENMAN, 1956).

Para Camargo e Camargo (2000), a passagem da água da superfície para a atmosfera, através de um espaço uniformemente gramado, sem limitações hídricas para suprir os processos de transpiração da vegetação e a evaporação do solo, é denominada de ET_p representando, assim, a quantidade de água necessária a ser aplicada. A ET_p e a chuva são componentes do ciclo hidrológico de caminhos contrários, contabilizados em milímetros, gerando informações a respeito de déficit e de superávit hídrico, muito importantes para a realização de trabalhos e pesquisas relacionadas a agrometeorologia (THORNTHWAITE, 1948).

Ainda que se cumpra as exigências hídricas e de manejo necessárias para a sua estimativa, o padrão proposto não é atingido com frequência para a obtenção da ET_p , sendo proposto um novo conceito que mudaria a sua designação para evapotranspiração de referência (ET_0), sendo então amplamente empregado em trabalhos de pesquisa. Da união entre o balanço de energia e o método de transferência de massa realizado em 1948, Penman criou uma equação para determinar a evaporação de uma superfície com água utilizando dados meteorológicos representativos como temperatura e umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação, sendo mais tarde denominado de método combinado, desenvolvido por diversos pesquisadores e expandido para áreas cultivadas com a introdução de parâmetros de resistência (ALLEN et al., 1998) que, logo após a sua parametrização, passou a se chamar equação de PM-FAO56.

Com base nas modificações propostas, a ET_0 é definida como a evapotranspiração de uma cultura hipotética de referência com altura de 12 cm, bem supridas de água, cobrindo integralmente a superfície de solo, apresentando tolerância de 70 s m^{-1} de sua cobertura ao deslocamento de vapor de água, com albedo equivalente a 0,23, caracterizando a evapotranspiração de um gramado verde (ALLEN et al., 1998).

O termo ET_0 é mais apropriado para projetos de manejo de irrigação, em virtude da evapotranspiração da cultura (ET_c) ser determinada, normalmente, em suas fases distintas, empregando o coeficiente de ajuste k_c na ET_0 (CARVALHO et al., 2011a).

Estão à disposição diferentes métodos para a estimativa da ET_0 , contudo, a utilização destes são limitadas devido às condições climáticas brasileiras, sendo de extrema importância a compreensão das restrições que cada método apresenta,

permitindo indicar qual o melhor modelo a ser aplicado em sua pesquisa (CARVALHO et al., 2011a). A equação de PM tornou-se o modelo padrão da FAO e mundialmente utilizado para a estimativa da ET_0 , por ser considerada a que apresenta maior fundamentação física, obtendo excelentes resultados em diferentes cenários climatológicos (CARVALHO et al., 2011b).

2.4.2 Evapotranspiração Real (ET_r)

A ET_r trata-se do montante de água que é transferido para a atmosfera por meio da evaporação e da transpiração nas reais condições atmosféricas e de umidade do solo (MATZENAUER, 1992).

A ET_r independe das condições em que se encontra a vegetação, ou seja, não depende da distribuição espacial da vegetação, da umidade do solo e nem do tamanho da área (KLOSOWSKI; GALVANI, 1997). O seu uso pode auxiliar no controle da demanda hídrica e permite fazer relação entre o uso do solo com o uso da água (UDA; CORSEUIL; KOBIYAMA, 2014).

Compreender a variabilidade espaço-temporal da ET_r é de grande importância para o entendimento dos processos eco-hidrometeorológicos de paisagens complexas (LUO et al., 2010). As avaliações precisas de ET_r são importantes para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas (BASTIAANSSEN et al., 2005).

Para Jhorar et al. (2009), a ET_r é um dos componentes mais importantes em ambas as equações do balanço hídrico e de energia, e sua quantificação é importante para as pesquisas em hidrologia, agronomia, silvicultura e ciências ambientais, tais como a gestão de recursos hídricos, o planejamento de iniciativas de reservação de água em áreas irrigadas e impacto das alterações climáticas sobre os recursos hídricos.

A ET_r pode ser estimada, em nível local, por meio da medição direta por lisimetria e de aferição da umidade do solo; em escala regional utilizando imagens de sensores orbitais, determinando a ET_r pixel a pixel com o auxílio de modelos desenvolvidos para o estudo do saldo de radiação e fluxo de calor do solo; e para grandes áreas com dados agrometeorológicos. A modelagem da ET_r viabiliza a coleta de dados de vastas áreas em pequenos espaços de tempo e permite

mensurar, através de imagens com alta resolução espaço-temporal, as características físicas da superfície da terra (TEIXEIRA, 2012).

2.4.3 Evapotranspiração estimada por algoritmos

A utilização do sensoriamento remoto para determinar o fluxo de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera é aceita quando é realizado primeiramente a estimativa do fluxo de calor sensível (H) para, em seguida, estimar o fluxo de calor latente (λE), de forma a considerá-lo como um componente indispensável para o modelo do balanço de energia, e também quando a determinação da quantidade de água relativamente evaporada é realizada por meio de índices, pelas de equações combinadas (SU, 2002).

Ainda que a utilização de algoritmos para mensurar a interação entre a superfície e a atmosfera apresente bons resultados em larga escala (CHOUDHURY; REGINATO; IDSO, 1986), este método apresenta alguns entraves quanto a geometria espacial e a heterogeneidade termal permanente, apresentando empecilhos maiores quando a área de pesquisa é cada vez mais elevada (ZHAN; KUSTAS; HUMES, 1996).

Conforme Sellers et al. (1995), os diferentes algoritmos recentemente utilizados para se estimar o balanço de energia, balanço hídrico e balanço de carbono na superfície são fundamentados em dados captados por sensores de satélites, os quais apresentam modelos que realizam a predição de alterações climáticas globais, necessitando, deste modo, de validação através da coleta de dados de campo da área de estudo.

No entanto, a grande vantagem de se aplicar algoritmos por meio do sensoriamento remoto é que os seus resultados são obtidos pelo próprio balanço de energia, ou seja, dispensando informações a respeito da cobertura vegetal (coeficiente de cultura) e da umidade do solo (déficit hídrico), e abrangendo extensas áreas sem custos adicionais (SCHERER-WARREN, 2012).

Os algoritmos destinados à estimativa da ET utilizando sensores remotos podem ser classificados como modelos residuais de balanço de energia, sendo alguns deles o TSEB (*Two-Source Energy Balance*), SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm*

for Land), S-SEBI (*Simplified Surface Energy Balance Index*) e SEBS (*Surface Energy Balance System*), combinando relações empíricas e módulos físicos (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2005).

Estes modelos podem ser determinísticos, os quais se baseiam em processos mais complexos como a interação solo-vegetação-atmosfera (SVAT) que calcula os diferentes componentes do balanço energético; modelos de índice de vegetação que consideram a estimativa da ET potencial ou de referência a partir de medições do solo; e modelos empíricos diretos que utilizam dados de sensoriamento remoto introduzidos em modelos semi-empíricos para a determinação da ET (usando a relação simplificada entre as bandas termais do infravermelho) e dados meteorológicos (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2005).

O modelo TSEB foi desenvolvido pontualmente para o estudo da interação solo-vegetação, permitindo estimar o H e o λE por meio da temperatura da superfície e de brilho pelas imagens de satélite, tendo por base a determinação do fluxo de calor sensível através de dados de solos, cobertura vegetal e a variação de temperatura entre a superfície e a atmosfera (NORMAN; KUSTAS; HUMES, 1995).

Já o modelo reproduzido por Bastiaanssen et al. (1998a), em pesquisas relacionadas ao balanço de energia por meio de sensoriamento remoto, foi capaz de estimar a quantidade de água perdida para a atmosfera com extrema exatidão. Apresentando-se com o SEBAL, este algoritmo tem como principal função determinar a ET por meio da estimativa do λE , a partir dos componentes do balanço de energia, utilizando uma quantidade reduzida de dados meteorológicos e radiâncias espectrais registradas em imagens de satélite.

Utilizando técnicas do algoritmo SEBAL para a estimativa do gradiente de temperatura da superfície (dT), o *mapping evapotranspiration at high resolution with internalized calibration* (METRIC) é um modelo de estimativa de ET descrito por Allen, Tasumi e Trezza (2007) que se baseia no balanço de energia como uma função indexada da temperatura radiométrica da superfície, eliminando assim a necessidade de uma temperatura superficial absolutamente precisa ou de medições da temperatura do ar. Conforme os mesmos autores, o METRIC é autocalibrado para cada imagem de satélite usando cálculos baseados na ET_0 da alfafa de acordo com dados meteorológicos horários.

O algoritmo S-SEBI objetiva estimar a interação entre reflectância máxima e mínima, assim como suas temperaturas em condições úmidas e secas do solo, fracionando o H e o λE , tomando por base a temperatura de momento da superfície (SU, 2002). Tem como vantagem não requerer a utilização de dados meteorológicos para a sua aplicação, e apresentar resultados diversificados com relação a dados de temperatura para condições adversas por meio de imagens de reflectância (ROERINK; SU; MENENTI, 2000).

Para Su (2002), o conjunto de instrumentos utilizados para a estimativa de parâmetros biofísicos que ocorrem na superfície da Terra, como a temperatura, o albedo, a emissividade, a cobertura da vegetação, entre outros, presentes no modelo SEBS desenvolvido pelo mesmo, são de extrema importância para o cálculo da ET a partir de imagens de radiância e reflectância, permitindo determinar o comprimento de onda na transferência de calor e a fração evaporativa para o cálculo do balanço de energia.

Na tentativa de compreender os processos de transferência de calor entre a superfície e a atmosfera, Ma et al. (1998) criaram o modelo determinístico SVAT, fundamentado nos componentes dos processos físicos da relação solo-vegetação-atmosfera, como a pressão de vapor do ar e o coeficiente de troca de vapor de água, calculando a evaporação do solo e a transpiração das plantas separadamente, e tornando os resultados de ET mais realísticos.

Desta forma, a simplicidade de aplicação e a exatidão dos resultados são pontos que devem ser levados em consideração no momento de escolher o melhor modelo a ser aplicado na área de estudo, de modo a reduzir erros que possam vir a ocorrer, disponibilizando tempo hábil para gerar um maior número de resultados possível, e tornando o trabalho mais coeso e relevante (TEIXEIRA, 2012).

2.5 Biomassa (BIO)

A quantificação da biomassa (BIO) é um dado de extrema relevância para classificar e fazer uso dos ecossistemas de forma racional, visando obter informações a respeito dos recursos naturais presentes, absorção e conversão de energia solar, e de ciclagem de nutrientes (HIGUCHI et al., 1998).

Conforme Dimri, Baluni e Sharma (2014), um planejamento agrícola em áreas que apresentam vegetação nativa depende da estimativa da BIO, pois é a partir desta que possibilita compreender as mudanças naturais na região, bem como a capacidade produtiva do bioma presente. Para Wang et al. (2016), estimar a produção de BIO é essencial para o monitoramento dos indicadores do desenvolvimento e da condição atual da vegetação.

A retirada desordenada da vegetação nativa, seja ela parcial ou completa, tem como consequência a baixa produção de BIO e a redução da cobertura do solo, favorecendo o surgimento de áreas degradadas, principalmente em ambiente que apresentam características como solos rasos e pobres, que predominam no bioma Caatinga (COSTA et al., 2009).

De acordo com Ferraz et al. (2014), pesquisas realizadas para quantificar a BIO vêm sendo empregadas por meio de métodos diretos, que se baseiam em medições de campo e coleta de materiais para a sua determinação; e indiretos, que consiste em utilizar correlações, regressões de dado oriundos de inventários florestais, base de dados de SIG ou modelos matemáticos associados a técnicas de sensoriamento remoto.

O uso de sensoriamento remoto para a estimativa da BIO é muito importante, pois possibilita o monitoramento de extensas áreas, permitindo realizar simulações, quantificação de áreas verdes e aplicação de projetos de baixo custo e a curto prazo (LIMA JÚNIOR et al., 2014).

A produção de BIO em larga escala pode ser estimada por meio do modelo descrito por Monteith (1970), que se trata do produto entre a concentração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida com o fator de eficiência de conversão da radiação em biomassa, ou pelo modelo apresentado por Field, Randerson e Malmstrom (1995), objetivando tornar mais preciso o uso da radiação por meio de parâmetros como a eficiência máxima da cultura, a temperatura do ar e a fração evaporativa, sendo esta última estimada pelo balanço de energia (ARAUJO et al., 2015).

2.6 Produtividade da água (WP)

A produtividade da água (WP) tem por intuito quantificar o quanto foi produzido por unidade de volume de água que foi utilizado na produção, tornando-se um parâmetro fundamental na seleção de cultivares mais adaptadas ao local de plantio (PERES et al., 2016).

De acordo com Molden et al. (2010), a WP torna-se bastante pertinente em regiões onde há escassez de água, significando melhorias na produção agrícola, mais renda e empregos, redução de recursos hídricos adicionais, redução da necessidade de terras e redução de seca.

Conforme Brito et al. (2012), o potencial produtivo da água está associado diretamente a genética da espécie, às práticas de manejo hídrico e agronômicos, ao planejamento administrativo e a práticas agrícolas.

Para Cai e Rosegrant (2003), a WP varia de um local para o outro e é dependente de diversos fatores, como o tipo de cultura utilizada, o tipo de clima (taxas de precipitação pluviométrica da região), tecnologias de irrigação e gerenciamento da água, tipo de solo, mão-de-obra, maquinários e fertilizantes.

O aumento da WP leva a economia de água, tornando-a disponível para outros setores, melhorando a gestão de água e os ecossistemas, proporcionando uma agricultura sustentável e a segurança alimentar (DESCHEEMAEKER et al., 2013). Em contrapartida, a baixa WP é refletida na baixa eficiência da irrigação, preparo do solo inadequado e manejo de irrigação inapropriado, que conduzem a sistemas de produção insustentáveis e a degradação ambiental (MOAYERI et al., 2011).

Deste modo, Zwart e Bastiaanssen (2004) destacam a importância de se ter pesquisas relacionadas à WP para as práticas de extensão agrícola, no dimensionamento de áreas agrícolas e no manejo hídrico das culturas a serem implantadas, sendo possível obter maior rentabilidade com os recursos hídricos nas condições ambientais do local.

2.7 Algoritmo SAFER

O *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (SAFER) é fundamentado na relação entre a ET_R/ET_0 e parâmetros de sensoriamento remoto calibrados com

dados meteorológicos provenientes de quatro estações envolvendo culturas irrigadas e a Caatinga, nas condições semiáridas da Bacia do Rio São Francisco. Tem como característica a simplicidade de aplicação por não exigir a classificação da vegetação e nem das condições extremas apresentadas no local (TEIXEIRA, 2012).

Outra característica importante apresentada pelo SAFER é de utilizar dados meteorológicos provenientes de estações agrometeorológicas convencionais e automáticas que, de acordo com Teixeira, Hernandez e Lopes (2012), irão proporcionar uma análise histórica, e em larga escala, dos componentes do balanço de energia, bem como da produtividade da água, e que destes dados, apenas os valores de temperatura do ar (T_a), radiação global (RG) e evapotranspiração de referência (ET_0) são utilizados, obtendo-se por meio destes a interpolação das estações, e convertendo-os em imagens que serão utilizadas na estimativa do balanço de energia.

Ainda segundo os mesmos autores, a partir das irradiações espectrais e das correções atmosféricas dos parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, tem-se as variáveis necessárias para a determinação do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), albedo e temperatura da superfície (T_0), que serão utilizados no cálculo da relação ET_r/ET_0 no instante da passagem do satélite. Ao serem multiplicados pelos dados diários de ET_0 , produzirão estimativas da ET_r regional diária.

Em estudo realizado por Teixeira (2010), comparando os valores do modelo ET_r/ET_0 no momento da passagem do satélite com os valores diários no pomar de mangueira e em espécies da Caatinga na Bacia do Sub-Médio Rio São Francisco, foram obtidos coeficientes de determinação (R^2) próximos a 1, evidenciando a significância dos resultados, e sugerindo que os valores de ET_r/ET_0 e os diários podem ser considerados iguais.

O algoritmo SAFER pode ser aplicado em outros ecossistemas, desde que se faça os ajustes necessários nos coeficientes da equação relacionadas a interação entre a ET_r e a ET_0 , através dos parâmetros obtidos por sensoriamento remoto, podendo-se obter bons resultados com relação a troca de energia entre os diferentes agroecossistemas em extensas áreas (TEIXEIRA et al., 2013), como os

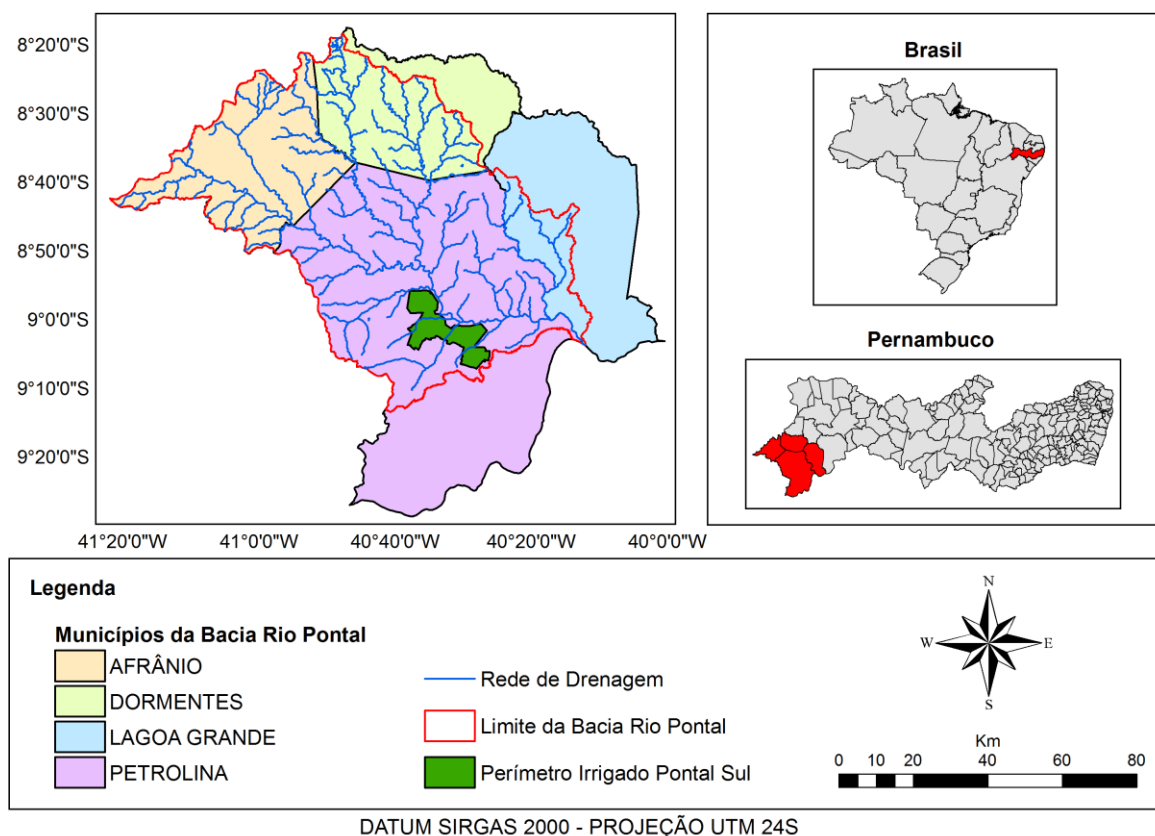
trabalhos desenvolvidos por Teixeira et al. (2015a) no Pantanal mato-grossense, e Hernandez et al. (2014) e Coaguila e Hernandez e Teixeira (2015) no Noroeste do Estado de São Paulo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A pesquisa foi desenvolvida no Perímetro Irrigado Pontal Sul, com 191,22 km² de área, delimitada entre as coordenadas geográficas 8°55'39,66"S e 40°38'13,39"W na parte superior; 9°07'33,20"S e 40°25'47,45"W – DATUM SIRGAS 2000 – inserido na Bacia do Rio Pontal, localizada entre os municípios de Afrânio, Dormentes, Lagoa Grande e Petrolina, no estado de Pernambuco, com área total de 6.023 km² (Figura 1).

Figura 1: Localização geográfica do Perímetro Irrigado Pontal Sul.



A Bacia do Rio Pontal se apresenta na forma de um losango, no sentido Noroeste-Sudeste, com eixos primário e secundário medindo cerca de 120 e 90 km, respectivamente. As formas e os elementos físicos de uma bacia hidrográfica são muito importantes, pois influenciam no desempenho hidrológico da área de estudo, devido ao vínculo existente entre o ciclo hidrológico e as variáveis ali presentes (VILLELA; MATTOS, 1975).

3.2 Clima da região

O clima da região é classificado por Köppen como BSw^h, tratando-se de uma região semiárida com clima de estepes seco e muito quente, inverno seco, evapotranspiração de referência anual superior a precipitação anual, com precipitação média inferior a 600 mm concentrada entre os meses de janeiro e março, déficit hídrico instável de 8 a 10 meses, com temperaturas variando entre 24 e 28 °C (TEIXEIRA et al., 2012).

Conforme a classificação de Thornthwaite e Mather (1955), o clima da área de estudo é do tipo DdA'a', caracterizada com o clima seco e com pouco ou nulo excesso de água, megatérmico, com evapotranspiração de referência anual igual a 1.592,45 mm, sendo 25% concentrada no verão (MOURA et al., 2007).

3.3 Vegetação

A área de estudo apresenta uma vegetação nativa caracterizada como Savana-Estépica (Caatinga) típica do Semiárido nordestino (IBGE, 2004), que abrange cerca de 826.411 km² na região Nordeste, correspondendo a uma totalidade aproximada de 1.511 espécies catalogadas, onde 380 destas só ocorrem neste tipo de vegetação.

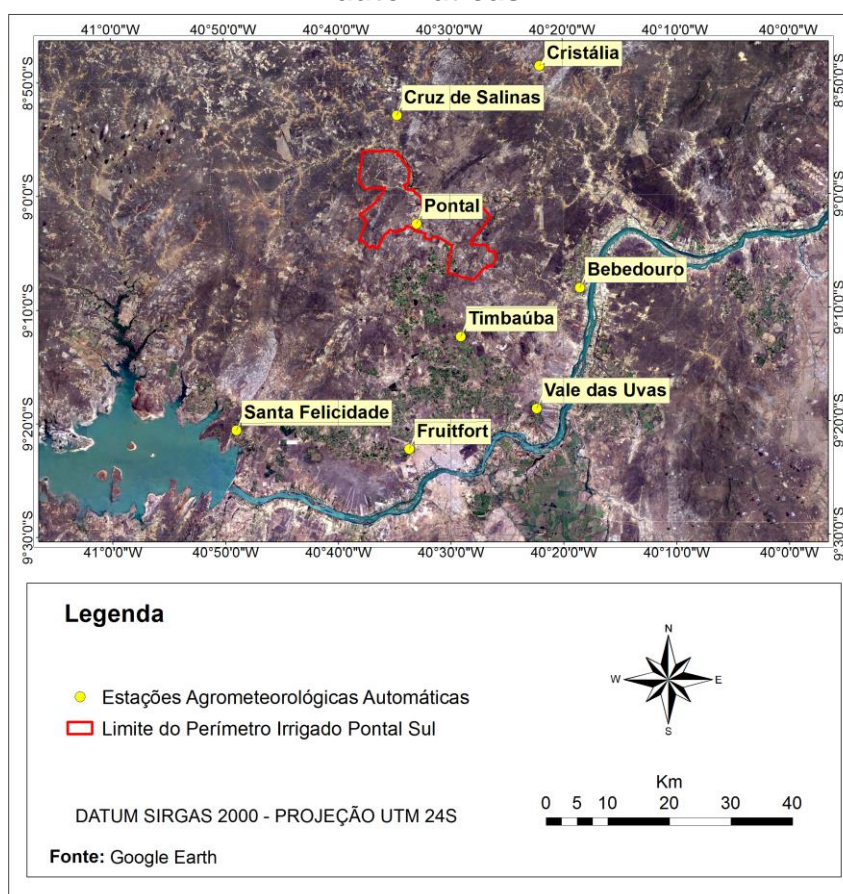
A Caatinga apresenta características próprias como plantas de porte e com vastas ramificações, arbustos com galhos retorcidos, folhas pequenas e raízes profundas, cactos e bromélias (KIILL, 2012).

De acordo com dados do Ministério do Meio Ambiente - MMA (2007), a área vegetada da Caatinga, de forma geral, representa 518.635 Km² de plantas nativas, o que condiz com 62,8% do total registrado, levando em consideração as áreas maiores que 40 ha com características de boa conservação, e áreas que sofreram com atividades antrópicas, mas que apresentam grandes possibilidades de regeneração.

3.4 Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos referentes aos anos de 2000 a 2015 foram coletados nas estações agrometeorológicas automática de Bebedouro: pertencente à Embrapa Semiárido (09°07'59,19" S; 40°18'31,50" W), Perímetro Irrigado Pontal Sul (9°2'19,43" S; 40°32'58,12" W), Cristália (8°48'25,30" S; 40°22'1,53" W), Cruz de Salinas (8°52'45,94" S; 40°34'40,85" W), Fruitfort (9°22'9,47" S; 40°33'40,93" W), Timbaúba (9°12'15,47" S; 40°29'5,18" W) e Vale das Uvas (9°18'37,52" S; 40°22'23,00" W) localizadas no município de Petrolina, incluindo a estação de Santa Felicidade (9°20'26,80" S; 40°48'59,68" W) próxima ao perímetro, localizado no município de Casa Nova no Estado da Bahia (Figura 2). As variáveis utilizadas na pesquisa foram a temperatura do ar (T_a , °C), radiação solar global (RG, MJ m⁻²) e evapotranspiração de referencia (ET_0 , mm dia⁻¹).

Figura 2: Localização geográfica das estações agrometeorológicas automáticas.



3.5 Processamento digital das imagens de satélite

3.5.1 Uso e ocupação do solo

Os produtos utilizados para a classificação supervisionada da área de estudo são oriundos dos sensores *Thematic Mapper* (TM) do Landsat-5 e *Operational Land Imager* (OLI) do Landsat-8 disponibilizados pela *United States Geological Survey* (USGS) na plataforma da Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) no formato GeoTIFF. A área de estudo localiza-se na órbita 217 e ponto 66, conforme o sistema de referência mundial (*Worldwide Reference System – WRS*) para a obtenção de dados do Landsat.

O sensor TM/Landsat-5 de análise multiespectral avançado, foi construído e projetado pelo SBRC (Centro de Investigação de Santa Barbara, de Hughes Aircraft Company, localizado em Goleta, Califórnia) para alcançar a maior resolução de imagens da superfície terrestre, com resolução espectral mais nítida, melhorias geométricas, maior precisão e resolução radiométrica (comparado ao sensor *Multispectral Scanner System - MSS*) e dados divididos em sete bandas espectrais simultâneas (Tabela 1), sendo as bandas 1-5 e 7 nas regiões do visível e a banda 6 na faixa do infravermelho termal (USGS, 2016a).

Tabela 1. Detalhamento das bandas do sensor *TM* do satélite Landsat-5.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Grupo
B1 - Azul	0,45 – 0,52		
B2 - Verde	0,50 – 0,60		
B3 - Vermelho	0,63 – 0,69		
B4 – Infravermelho Próximo	0,76 – 0,90	30	Multiespectral
B5 - Infravermelho Médio	1,55 – 0,75		
B6 - Infravermelho Termal	10,4 – 12,5	120	Termal
B7 - Infravermelho Médio	2,08 – 235	30	Multiespectral

Fonte: USGS (2016a).

O sensor OLI junto ao sensor *Thermal Infra-Red Scanner* (TIRS), ambos pertencentes ao Landsat-8 (Tabela 2), fornecem a cobertura sazonal da massa terrestre mundial com resolução espacial de 15, 30 e 100m, representando um avanço evolutivo para a tecnologia (USGS, 2016b).

As imagens utilizadas representam os dias 4 de setembro de 2000 e 29 de outubro de 2015, condizentes com o período seco do ano, com resolução espacial de 30 x 30 m para cada pixel na faixa do visível, tratadas na escala de 1:100.000 (CORREIA, 2016).

O software utilizado no processamento digital das imagens foi o QGIS 2.18 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017), com base em imagens multispectrais (coloridas) representadas pelas bandas R-G-B (Red, Green e Blue), com o intuito de diferenciar os elementos presentes na superfície, de forma a identificá-los e classificá-los.

Tabela 2. Detalhamento das bandas dos sensores *OLI* e *TIRS* do satélite Landsat-8.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Grupo
B1 - Coastal/Aerosol	0,43 – 0,45		
B2 – Azul	0,45 – 0,51		
B3 – Verde	0,53 – 0,59		
B4 – Vermelho	0,64 – 0,67		
B5 - Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 – 0,88	30	Multiespectral
B6 - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR1)	1,57 – 1,65		
B7 - Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR2)	2,11 – 2,29		
B8 – Pancromático	0,50 – 0,68	15	Pancromático
B9 – Cirrus	1,36 – 1,38	30	Cirrus
B10 - Infravermelho Termal (TIRS1)	10,60 – 11,19		
B11 - Infravermelho Termal (TIRS2)	10,50 – 12,51	100	Termal

Fonte: USGS (2016b).

Deste modo foi possível realizar a classificação supervisionada, caracterizando os elementos pixel a pixel, conferindo aos mesmos classes e cores, simplificando a

distinção visual (CORREIA, 2016), tornando-se perceptível as alterações antrópicas e naturais ao longo do tempo.

3.5.2 Descrição do algoritmo SAFER

Foram utilizados produtos do sensor MODIS da plataforma Terra, correspondentes aos *Tiles* h13v09 e h14v09 do produto MOD13Q1, com composição de imagens em intervalos de 16 dias e resolução espacial de 250 m, para o período de fevereiro de 2000 a dezembro de 2015. Como os primeiros registros do sensor MODIS ocorreram a partir de 24 de fevereiro de 2000, neste ano a quantidade de imagens é reduzida.

A partir das imagens MODIS, por meio de arquivos HDF, foi obtida a reflectância da superfície para as bandas 1 e 2 (Tabela 3) utilizando o software MODIS Reprojection Tool (MRTools). As imagens foram georreferenciadas por meio do software QGIS 2.18 para aplicá-las à metodologia de estimativa de ET_r , BIO e WP em escala regional (Figura 3) utilizando o software ILWIS 3.4 (2007).

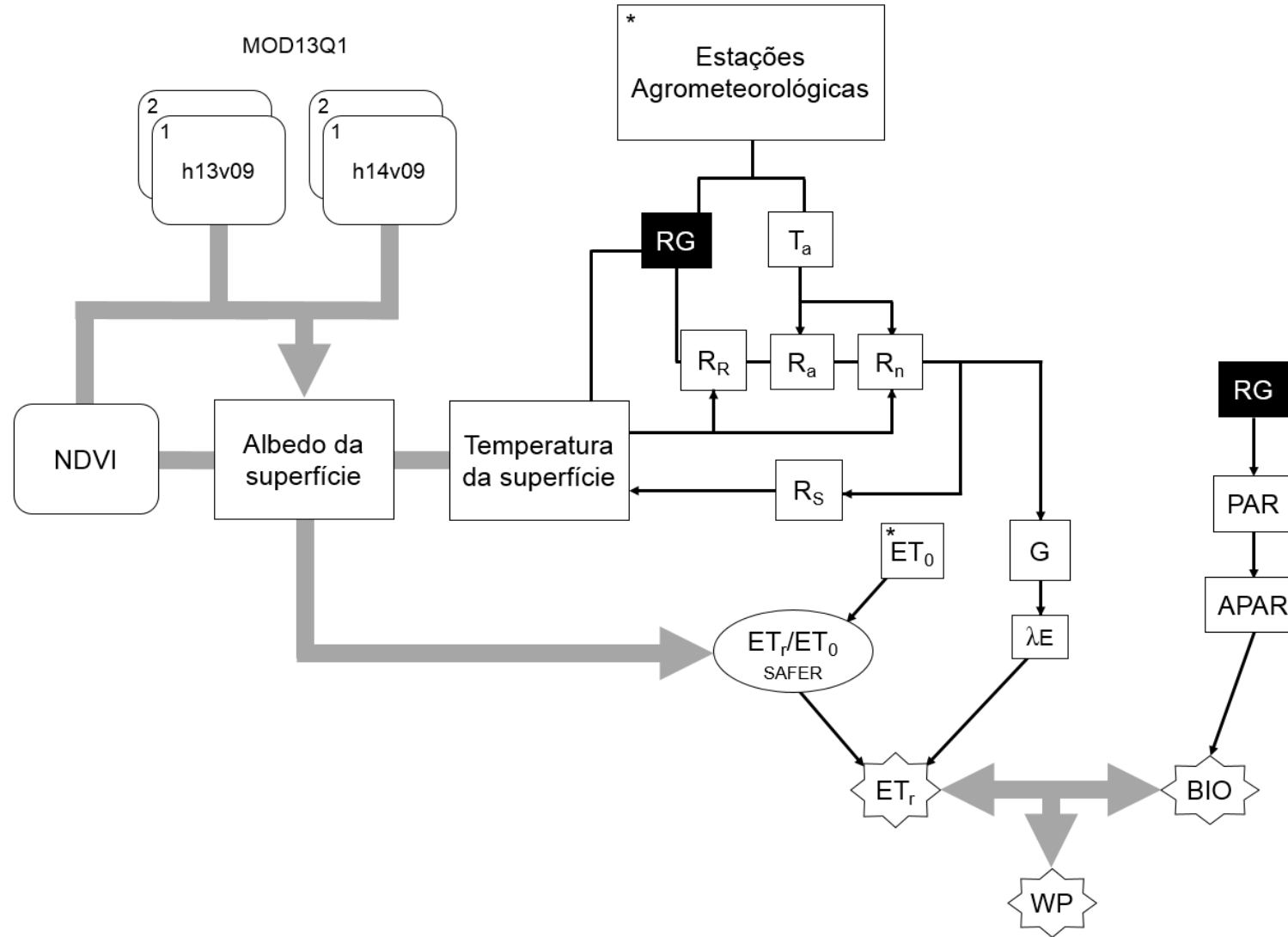
Tabela 3. Detalhamento das bandas do sensor *MODIS* do satélite Terra.

Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Grupo
B1 - Vermelho	0,62 - 0,67	250	Multiespectral
B2 - Infravermelho Próximo (NIR)	0,84 - 0,87	250	
B3 a B7 - Ondas curtas	0,45 a 2,15	500	
B8 a B19 e B26 - Ondas curtas	0,40 a 1,39	1000	Termal
B20 a B36 - Infravermelho	3,66 a 14,38	1000	

Fonte: USGS (2014).

As variáveis utilizadas na pesquisa foram espacializadas na área de estudo, de acordo com as coordenadas das estações agrometeorológicas, distribuindo valores a pontos desconhecidos na superfície, formando uma interpolação espacial, gerando uma malha (grid) de variáveis em larga escala para serem aplicadas as equações.

Figura 3. Fluxograma estrutural para a estimativa da ET_r , BIO e WP em escala regional.



3.5.3 Albedo da superfície (α_0)

Para calcular o albedo da superfície (α_0), foi utilizada a Equação 1, proposta por Valiente et al. (1995).

$$\alpha_0 = a + b\alpha_1 + c\alpha_2 \quad (1)$$

onde α_1 e α_2 correspondem a reflectância monocromática respectivamente para as bandas 1 e 2 do sensor MODIS; e a, b e c são fatores de regressão obtidos através de dados de campo em pesquisa realizada por Teixeira et al. (2008) com valores de 0,08, 0,41 e 0,14, respectivamente, para o Semiárido.

O albedo da superfície diário (α_{24}) foi estimado a partir da obtenção do α_0 , conforme a Equação 2.

$$\alpha_{24} = d \alpha_0 + e \quad (2)$$

onde d e e são os coeficientes de regressão para as condições climáticas do Semiárido, com valores iguais a 1,02 e 0,01 respectivamente (TEIXEIRA et al., 2008).

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) é a relação entre a diferença da reflectância do infravermelho próximo e a do vermelho, a qual foi corrigida pela somatória das mesmas (ALLEN; TREZZA; TASUMI, 2002), ou seja, caracteriza-se por indicar a quantidade e a qualidade da vegetação verde presente na superfície. Para o cálculo do NDVI, foi utilizado a Equação 3.

$$\text{NDVI} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\alpha_2 + \alpha_1} \quad (3)$$

onde α_1 é a banda do infravermelho próximo e α_2 é a banda do vermelho. Os resultados obtidos pelo NDVI variam entre -1 e +1 de acordo com as características da vegetação.

3.5.4 Saldo de Radiação (R_n)

Com os resultados obtidos, associado a medições de satélite, foi calculado o R_n caracterizado como balanço entre o ganho (através da quantidade de radiação emitida) e a perda (pela quantidade de energia que será devolvida a atmosfera). O R_n foi estimado por meio da equação 4 (TEIXEIRA et al., 2008).

$$R_n = (1 - \alpha_0)RG - a_L \tau_{sw} \quad (4)$$

onde a_L é o coeficiente de regressão da relação entre a radiação de onda longa líquida; e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica em escala diária (TEIXEIRA et al., 2008).

A τ_{sw} é definida como a parte da radiação incidente que é transmitida pela atmosfera, correspondendo aos efeitos de absorção e reflexão que ocorrem na mesma (ALLEN; TREZZA; TASUMI, 2002), calculada de acordo com a Equação 5.

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (5)$$

onde z é a elevação das estações agrometeorológicas (m).

Em virtude da influência de T_a sobre a radiação de ondas longas na equação de Stephan Boltzmann, estudos anteriores investigaram as alterações nos coeficientes da Equação acima através de variações diárias de T_a pela Equação 6 (TEIXEIRA et al., 2013).

$$a_L = f T_a - g \quad (6)$$

onde f e g são coeficientes de regressão com valores de 6,99 e 39,93, respectivamente, para as condições climáticas do Semiárido (TEIXEIRA et al., 2013).

3.5.5 Fluxo de calor no solo (G)

O valor de G é a taxa de armazenamento de calor no interior do mesmo, apresentado um gradiente que se concentra na parte superior, podendo sofrer variações de acordo com a vegetação e com alterações atmosféricas, o qual foi estimado por meio da razão G/R_n pela Equação 7 (BASTIAANSSEN, 2000).

$$\frac{G}{R_n} = h \exp(i \alpha_{24}) \quad (7)$$

onde h e i são coeficientes de regressão com valores respectivos de 3,98 e -25,47. O valor de G foi encontrado pela multiplicação da razão G/R_n pelo valor de R_n calculado.

3.5.6 Radiação de ondas longas atmosféricas (R_a)

A R_a é responsável pelo fluxo de radiação térmica descendente proveniente da atmosfera, estimada por meio da Equação 8 de Stefan-Boltzmann.

$$R_a = \varepsilon_a \times \sigma \times T_a^4 \quad (8)$$

onde ε_a é a emissividade atmosférica (adimensional); σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$); e T_a é a temperatura do ar em K.

Para determinar a ε_a , foi utilizada a Equação 9, proposta por Bastiaanssen (1995) obtida por meio de experimentos de campo utilizando alfafa em Idaho, EUA.

$$\varepsilon_a = 0,85 \times (-\ln \times \tau_{sw})^{0,09} \quad (9)$$

3.5.7 Radiação de ondas longas da superfície (R_s)

O valor de R_s foi obtido por meio da Equação 10, baseada na soma dos resultados obtidos pela diferença entre a RG e a radiação solar de ondas curtas

refletidas (RR), e pela diferença entre a R_a e o R_n , ou seja, obtido como resíduo da equação de R_n .

$$R_s = (RG - RR) + (R_a - R_n) \quad (10)$$

O valor de RR foi estimado por meio da equação 11.

$$RR = RG \times \alpha_{24} \quad (11)$$

3.5.8 Temperatura da superfície (T_s)

A T_s foi estimada com base na estimativa de R_s conforme Equação 12 (TEIXEIRA et al. 2016a).

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{R_s}{\varepsilon_s \sigma}} \quad (12)$$

onde ε_s é a emissividade da superfície estimada pela Equação 13.

$$\varepsilon_s = j \ln NDVI + k \quad (13)$$

onde j e k são coeficientes de regressão com valores de 0,06 e 1,00, respectivamente.

3.5.9 Fluxo de calor sensível (H)

Para estimativa H foi necessário converter a ET_r em unidade de energia para a obtenção do fluxo de calor latente (λE) para realizar a diferença deste com o R_n e G por meio da Equação 14.

$$H = R_n - \lambda E - G \quad (14)$$

3.5.10 Evapotranspiração real (ET_r)

A estimativa da ET_r foi realizada, primeiramente, por meio do cálculo da fração instantânea da ET_r proposta por Teixeira (2012), referindo-se à relação ET_r/ET_0 obtida por meio dos dados de α_0 , T_s e NDVI, inseridos na Equação 15.

$$\frac{ET_r}{ET_0} = \left\{ \exp \left[m + n \left(\frac{T_s}{\alpha_{24} \text{NDVI}} \right) \right] \right\} \quad (15)$$

onde m e n são fatores de regressão com valores respectivos de 1,90 e -0,008 para as condições climáticas do Semiárido (TEIXEIRA, 2012).

Os grids diários de ET_0 , obtidos por meio das estações agrometeorológicas, foram multiplicados pela relação ET_r/ET_0 para obter os valores de ET_r em larga escala, conforme a Equação 16.

$$ET_r = \frac{ET_r}{ET_0} \times ET_0 \quad (16)$$

3.5.11 Biomassa (BIO)

Para estimar a BIO, utilizou-se a modelo Light Use Efficiency (LUE) proposto por Monteith (1972), baseado na fração evaporativa (E_f), levando em consideração os efeitos da umidade presente no perfil do solo (TEIXEIRA et al., 2013), como descrito na Equação 17.

$$BIO = \varepsilon_{\max} E_f \text{ APAR } 0,864 \quad (17)$$

onde ε_{\max} é a eficiência máxima da luz, sendo considerada com valor de 2,50 g MJ⁻¹, pelas espécies nativas presentes na área de estudo serem, em sua grande maioria,

plantas C4; APAR é a radiação fotossinteticamente ativa absorvida; e 0,864 é o fator de correção (TEIXEIRA et al., 2012).

O modelo LUE é baseado na RG e no desenvolvimento de dossel, podendo ser utilizado em conjunto com dados de satélite (TEIXEIRA et al., 2015a). Conforme o mesmo autor, a precisão do modelo LUE foi considerada aceita para aplicação em larga escala, em conjunto com diferentes dados de satélite.

A E_f foi estimada conforme Equação 18, baseando-se no λE dividido pela energia disponível.

$$E_f = \frac{\lambda E}{R_n - G} \quad (18)$$

A APAR foi estimada a partir da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), conforme a Equação 19.

$$APAR = f_{PAR} PAR \quad (19)$$

onde f_{PAR} é o fator de correção baseado nos valores de NDVI.

A estimativa de f_{PAR} foi realizada conforme a Equação 20.

$$f_{PAR} = p NDVI + q \quad (20)$$

onde p e q são os coeficientes de regressão, com valores respectivos de 1,257 e -0,161, para as condições do Semiárido (BASTIAANSSEN e ALI, 2003).

Para a estimativa de PAR (Equação 21), foram utilizados os grids de RG obtidos nas estações agrometeorológicas.

$$PAR = r RG \quad (21)$$

onde r é o coeficiente de regressão para as condições do semiárido, com valor igual a 0,44 (TEIXEIRA, 2009).

3.5.12 Produtividade da água (WP)

A estimativa da WP é baseada nos resultados obtidos de ET_r , levado em consideração as mudanças na vegetação presente e nas condições climáticas de cada região. Considerando todas as alterações ocorridas na superfície, a WP é estimada conforme a Equação 22.

$$WP = \frac{BIO}{ET_r} \quad (22)$$

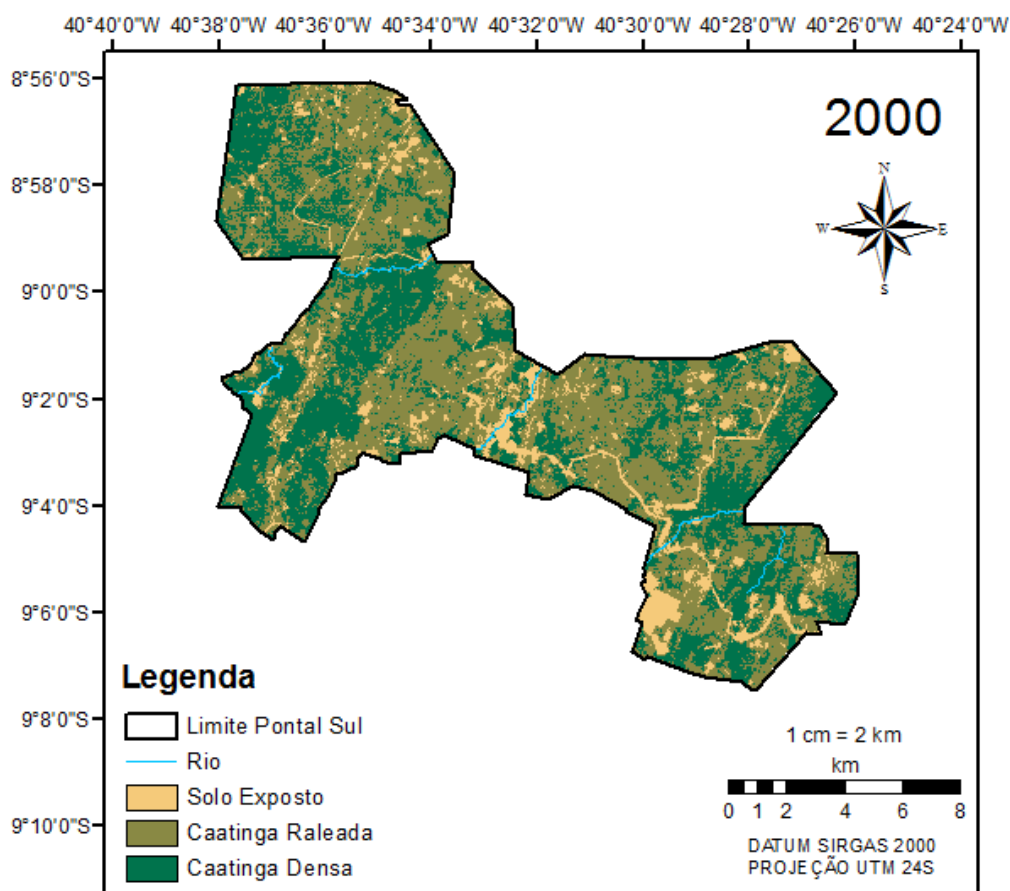
onde seu valor é apresentado em $kg\ m^{-3}$.

4 RESULTADOS

4.1 Uso e ocupação do solo no Perímetro Irrigado Pontal Sul

Ao longo dos anos a cobertura vegetal da Caatinga presente no perímetro vem sofrendo alterações, seja por ações antrópicas ou de forma natural (Figura 4), causadas pela prática de agricultura irrigada e severas mudanças climáticas, respectivamente.

Figura 4. Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2000.

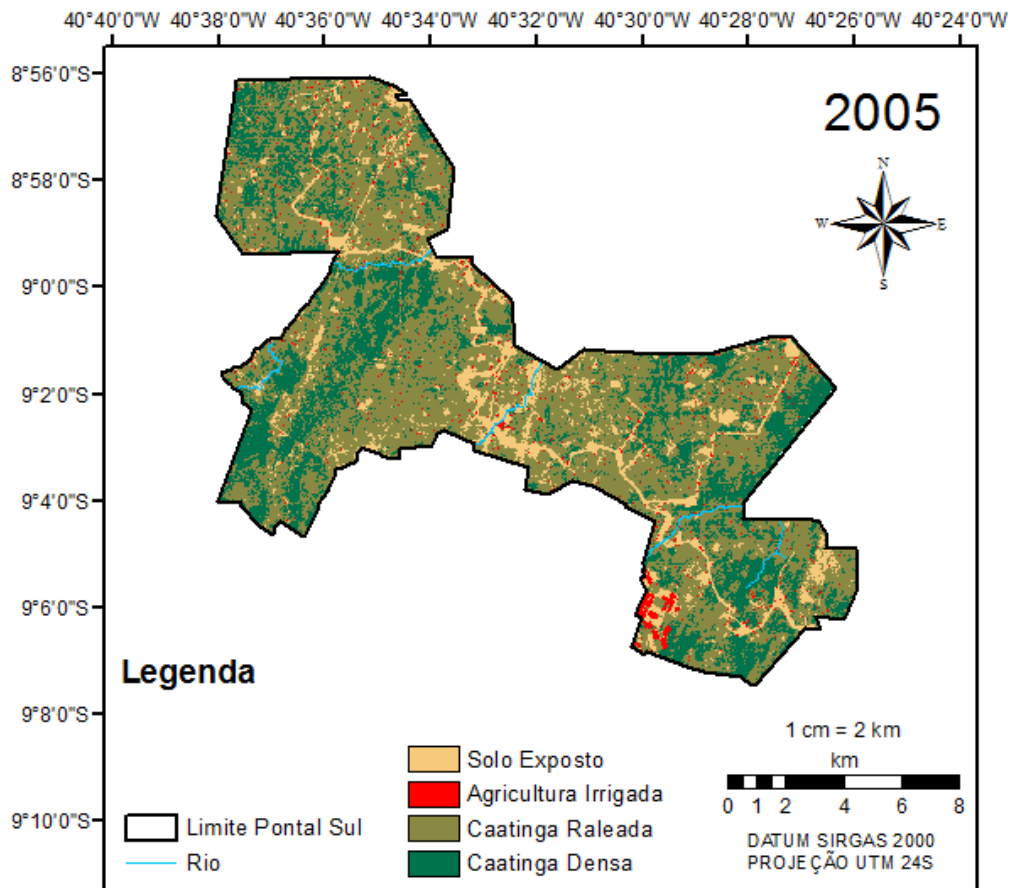


Fonte: Adaptado de Correia (2016).

O perímetro apresenta uma área total de 19.121,85 ha, de modo que no ano de 2000 a vegetação da Caatinga ocupava cerca de 89,7% do perímetro, sendo que 37,2% era representado pela vegetação mais densa, 52,5% era de vegetação mais espessa, e as demais áreas eram representadas por solo exposto com 10,3% do seu total.

No ano de 2005 surgiram as primeiras áreas com agricultura irrigada em locais onde, anteriormente, eram caracterizadas como solo exposto, levando a crer que a atividade agrícola impulsionou o desmatamento nestes setores (Figura 5).

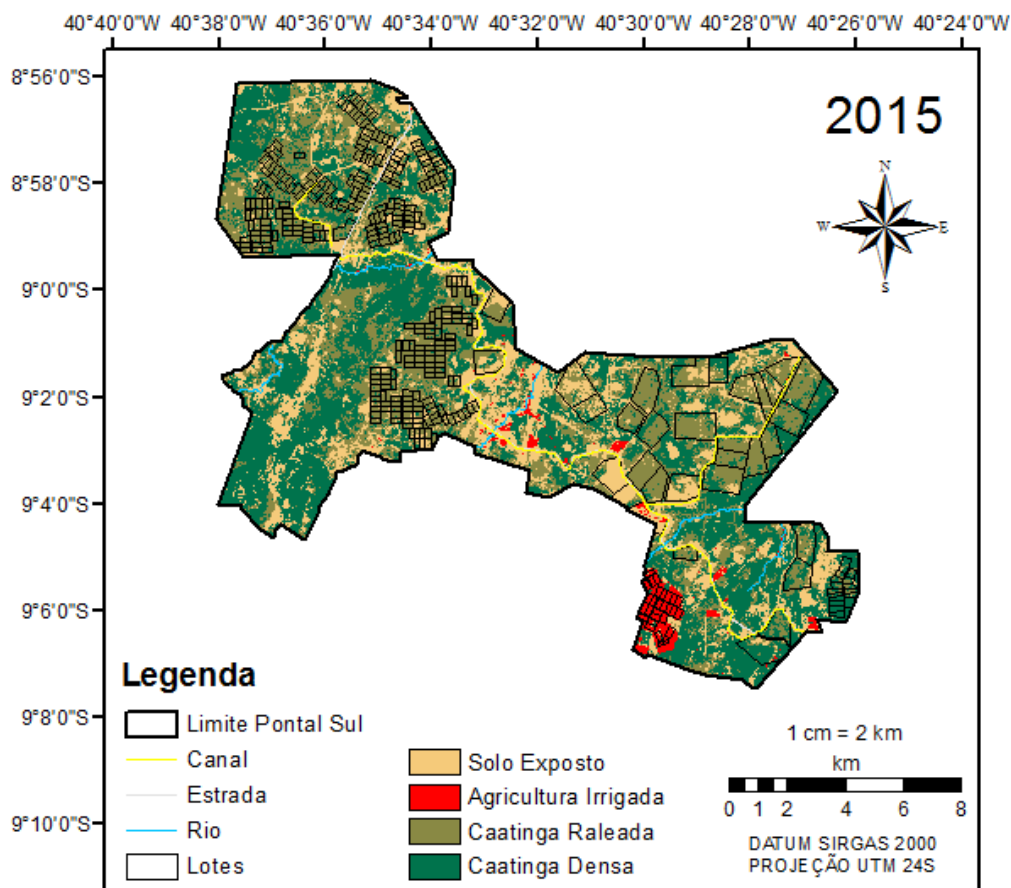
Figura 5. Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2005.



As áreas que apresentaram agricultura irrigada no ano de 2005 compreendiam cerca de 2% da área total do perímetro, a vegetação nativa representava 86,4% da área do perímetro (25,8% de Caatinga densa e 60,7% de Caatinga raleada) e 11,5% era representado por solo exposto. De 2000 a 2005, a vegetação da Caatinga apresentou uma redução de 3,2%, já as áreas com solo exposto apresentaram um aumento de 1,2%.

Com relação ao ano de 2015, após construção de estradas e aquedutos que cortam o perímetro, observou-se a ampliação das áreas de agricultura irrigada, principalmente em torno do canal, nos espaços em que havia vegetação nativa (Figura 6)

Figura 6. Mapa de uso e cobertura da terra do Perímetro Irrigado Pontal Sul para o ano de 2015.



Fonte: Adaptado de Correia (2016).

Considerando a utilização do perímetro para práticas de agricultura irrigada nos próximos anos, faz-se uso de demarcação de lotes vetorizados proposto pela CODEVASF. O projeto que utilizará terras agricultáveis na área sul contemplará famílias de pequenos produtores e empresas rurais com lotes protocolados de 6 ha cada e lotes com extensas áreas medindo entre 20 e 40 ha, respectivamente (CODEVASF, 2014).

Na Figura 6, associando as áreas de agricultura irrigada com a distribuição dos lotes, verifica-se a utilização de 29 lotes. De modo geral, as áreas que apresentam agricultura irrigada no ano de 2015 representam cerca de 2,3% do total, e as zonas com vegetação nativa constituíam 74,4% (38,1% de Caatinga densa e 36,3% de Caatinga raleada), restando 23,3% caracterizados como solo exposto. Estabelecendo uma comparação com o ano de 2000, nota-se uma redução de 15,3% da vegetação nativa; em contrapartida, as áreas com solo exposto tiveram um aumento de 13%. Estas informações contribuem para se ter uma perspectiva das

transformações ao qual a área do perímetro está sujeita, de forma a estabelecer um planejamento adequado de acordo com as condições locais.

4.2 Parâmetros climatológicos

Para melhor explicar as variações climáticas ao longo do ano que ocorreram no Perímetro Irrigado Pontal Sul durante no período entre 2000 a 2015, procedeu-se a descrição dos acumulados máximos e mínimos da precipitação pluvial (P) e de evapotranspiração de referência (ET_0), e das médias máximas e mínimas da radiação global (RG) para a estação de chuva (meses entre janeiro a abril), final da estação de chuvas (meses entre maio a julho), estação de seca (meses entre agosto a outubro) e o início da estação de chuva (meses de novembro e dezembro), conforme pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4. Acumulado máximo e mínimo de precipitação pluvial (P) e evapotranspiração de referência (ET_0), e médias máximas e mínimas de radiação solar global (RG) para o Perímetro Irrigado Pontal Sul, entre os anos de 2000 a 2015.

	P			ET_0			RG		
	Máx	Mín	Anual	Máx	Mín	Anual	Máx	Mín	Anual
2000	322,90	2,90	642,20	519,25	263,30	1674,32	23,42	18,80	21,53
2001	292,50	4,40	419,40	577,63	373,86	1791,12	22,95	17,50	20,83
2002	357,80	2,10	427,70	539,73	393,85	1851,34	22,50	18,07	20,64
2003	222,50	29,13	360,82	615,18	351,36	1830,31	22,62	17,30	20,73
2004	550,98	4,86	591,97	518,86	358,24	1713,28	22,81	17,19	20,63
2005	355,68	11,75	506,15	559,47	334,01	1773,20	22,30	16,55	19,91
2006	234,12	31,62	384,00	592,07	333,84	1762,22	22,42	15,87	19,90
2007	230,86	26,81	338,60	616,41	364,17	1878,33	22,92	16,94	20,44
2008	418,09	3,48	495,44	536,87	321,26	1648,86	21,91	16,29	19,82
2009	534,91	37,11	736,07	575,72	320,05	1671,98	22,15	16,14	19,99
2010	182,03	15,04	349,89	581,63	316,02	1680,59	21,32	16,69	19,84
2011	273,50	14,71	377,16	572,80	350,61	1771,57	20,86	16,41	19,31
2012	120,03	3,13	161,30	714,57	361,52	2001,22	21,40	17,28	20,20
2013	132,33	1,40	270,05	689,51	314,11	1906,54	20,73	16,55	19,00
2014	131,30	6,96	262,15	630,69	318,61	1825,56	20,67	16,00	18,83
2015	177,51	3,30	222,15	653,16	390,77	1949,98	22,26	15,70	19,72

Com relação aos resultados de P, o máximo atingido foi no ano de 2009, com um acumulado de 736,07 mm, estando acima da média para a região, sendo 72,7% do seu acumulado concentrado na estação de chuvas, com 534,91 mm, principalmente no mês de fevereiro. Isto ocorre devido a zona de convergência intertropical (ZCIT) que centraliza a maior parte das chuvas neste período. O ano de 2009 foi atípico, com índices muito elevados de P, sendo influenciado por fenômenos naturais como a La Niña que concentra a maior parte das chuvas do país nas regiões Norte e Nordeste.

O acumulado mínimo de P foi encontrado no ano de 2012, atingindo valor igual a 161,30 mm, sendo que 74,4% do seu acumulado concentrou-se no período de chuvas, com 120,03mm, principalmente nos meses de fevereiro e março. Neste ano houve baixa formação de nuvens, o que pode explicar os baixos índices de P.

No que diz respeito a ET_0 , o seu acumulado máximo foi registrado no ano de 2012, com valor igual a 2001,22 mm, de modo que sua maior concentração foi na estação de chuvas, representando 35,7% do acumulado total, com valor igual a 714,57 mm. Este resultado foi ocasionado pela baixa cobertura de nuvens, possibilitando que uma quantidade maior de energia incidisse sobre a superfície, proporcionando o seu aumento. Já o mínimo de ET_0 foi computada no ano de 2008, com um acumulado de 1648,86 mm, de modo que sua maior concentração foi na estação de chuvas, representando 32,6% do acumulado total, com valor igual a 536,87 mm. Neste ano houve a presença de grandes quantidades de nuvens, impedindo que a radiação incidisse com mais intensidade sobre a superfície.

Para a RG, a mesma atingiu sua média máxima no ano de 2000, com valor igual a $23,51 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, apresentado maiores picos entre a estação seca e o início da estação de chuvas, estando relacionado à pouca quantidade de nuvens sobre a região. Logo, a menor média foi registrada no ano de 2014, com média anual de $18,83 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$, estimulado pelo ângulo zenital do sol e/ou pela ausência de nuvens, mesmo que neste ano não tenha apresentado um acumulado expressivo de P.

4.3 Evapotranspiração real (ET_r)

Os mapas de ET_r do Perímetro Irrigado Pontal Sul para os anos de 2000 a 2015 estão presentes nas Figuras 7 a 22.

Figura 7. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média ± Desvio Padrão (DP).

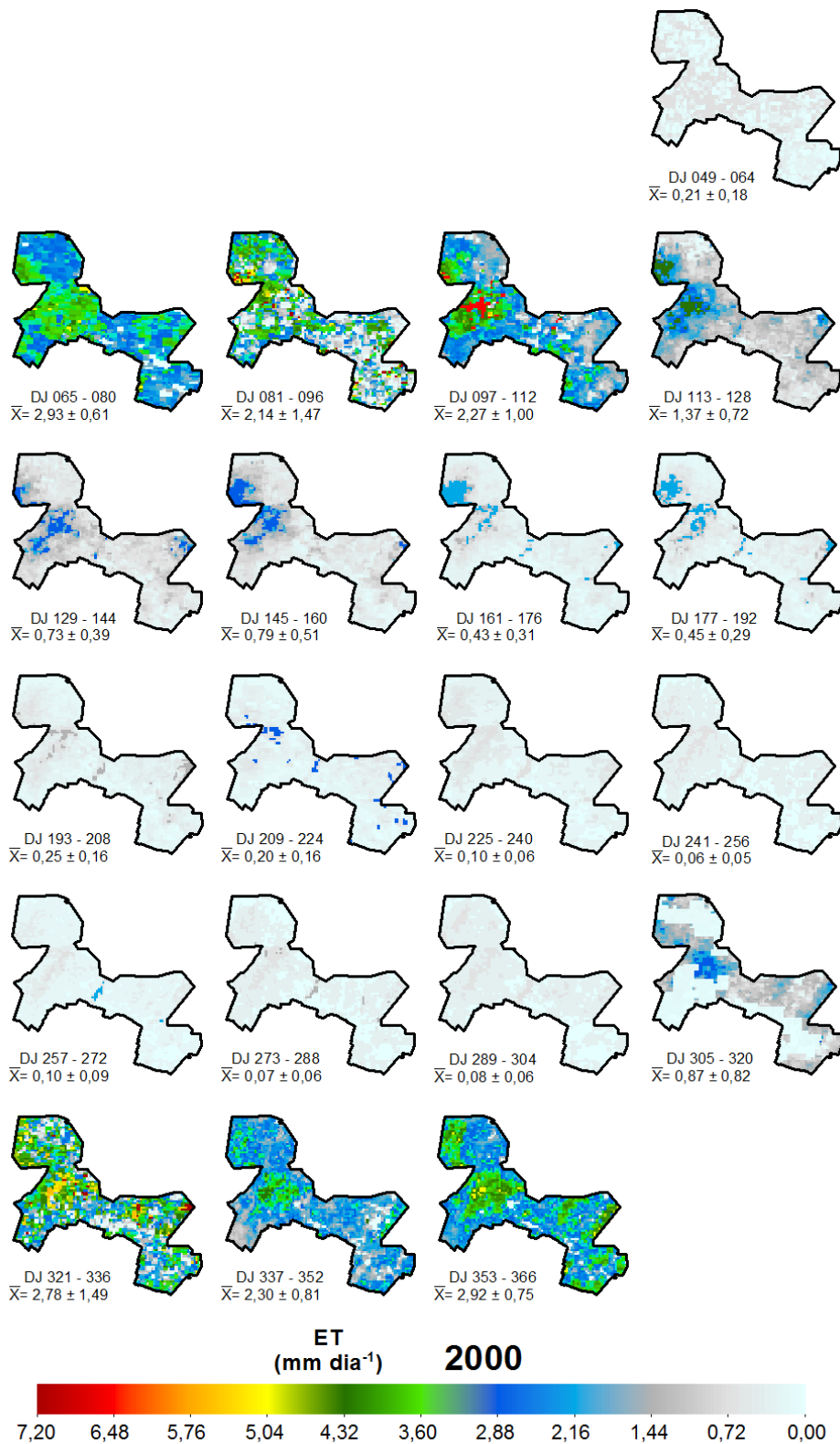


Figura 8. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média ± Desvio Padrão (DP).

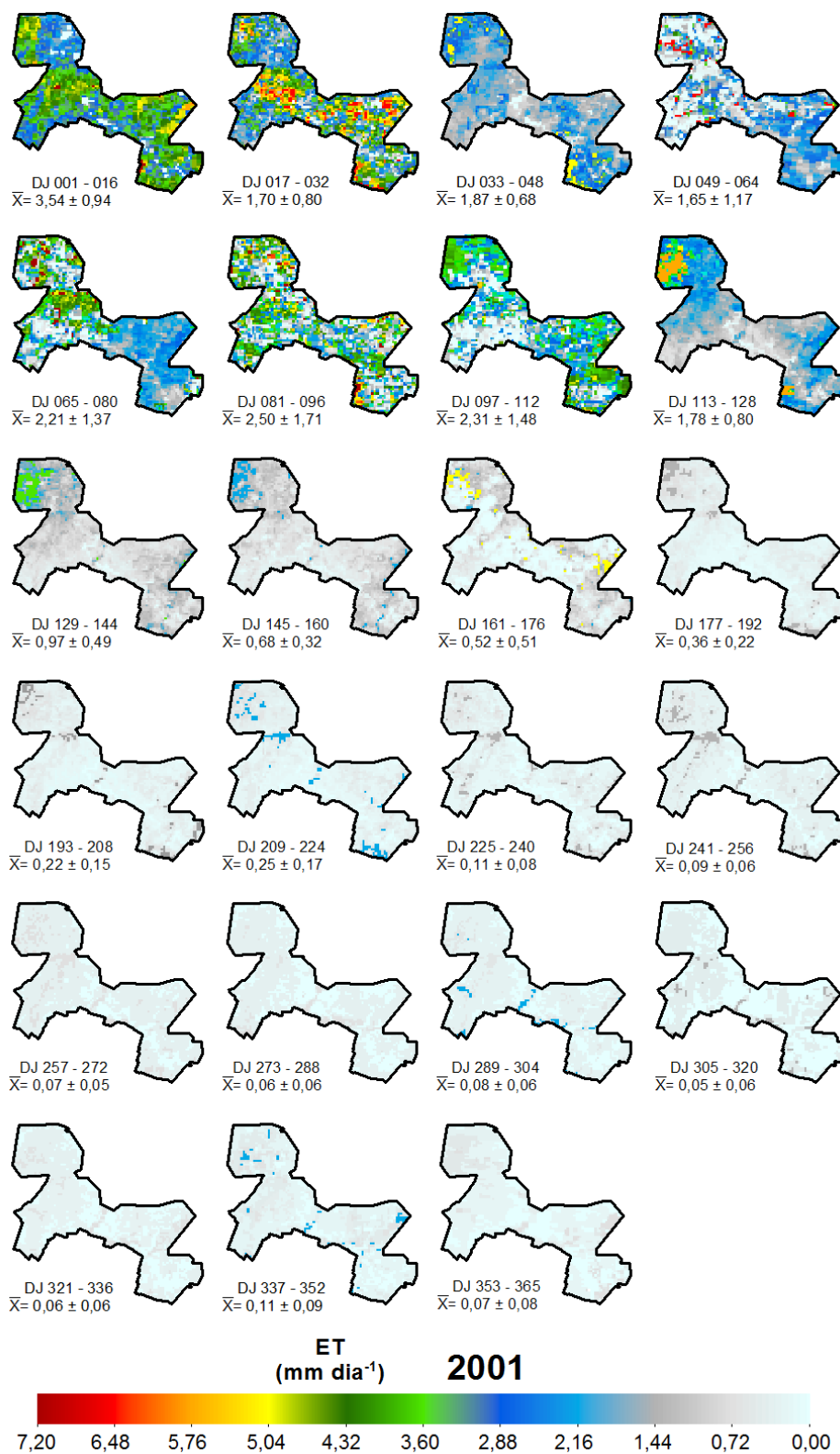


Figura 9. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média ± Desvio Padrão (DP).

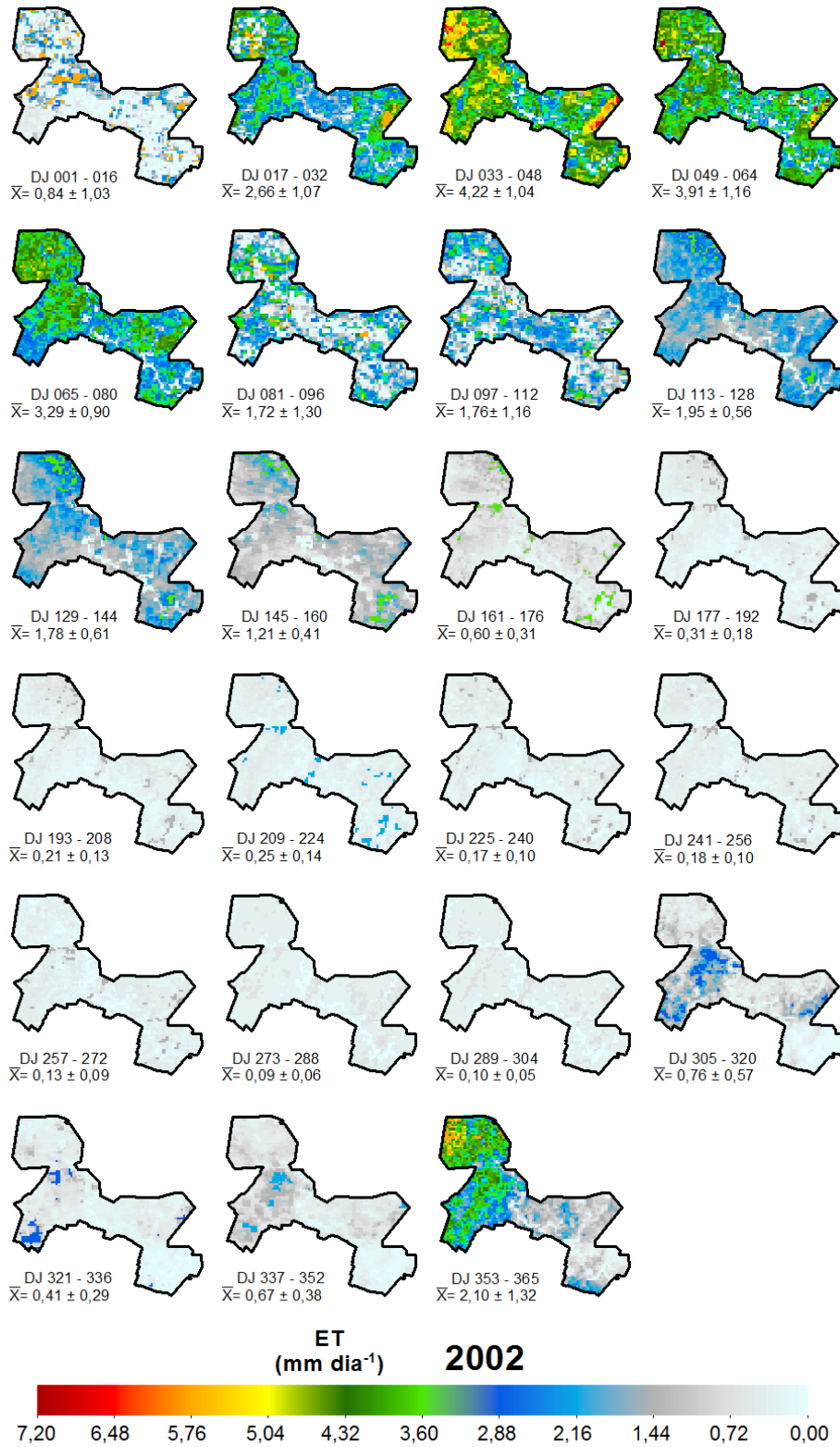


Figura 10. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média ± Desvio Padrão (DP).

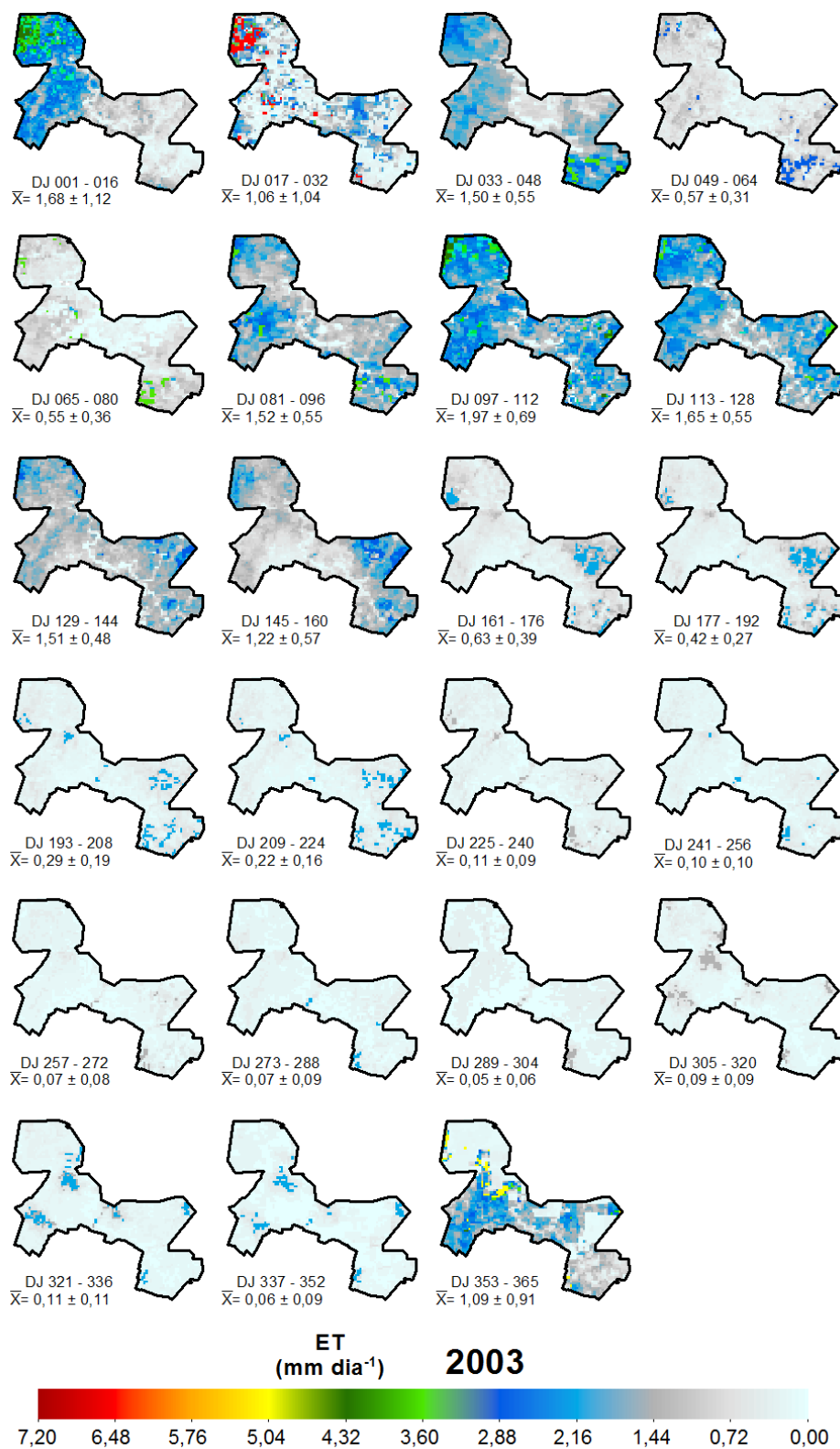


Figura 11. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média ± Desvio Padrão (DP).

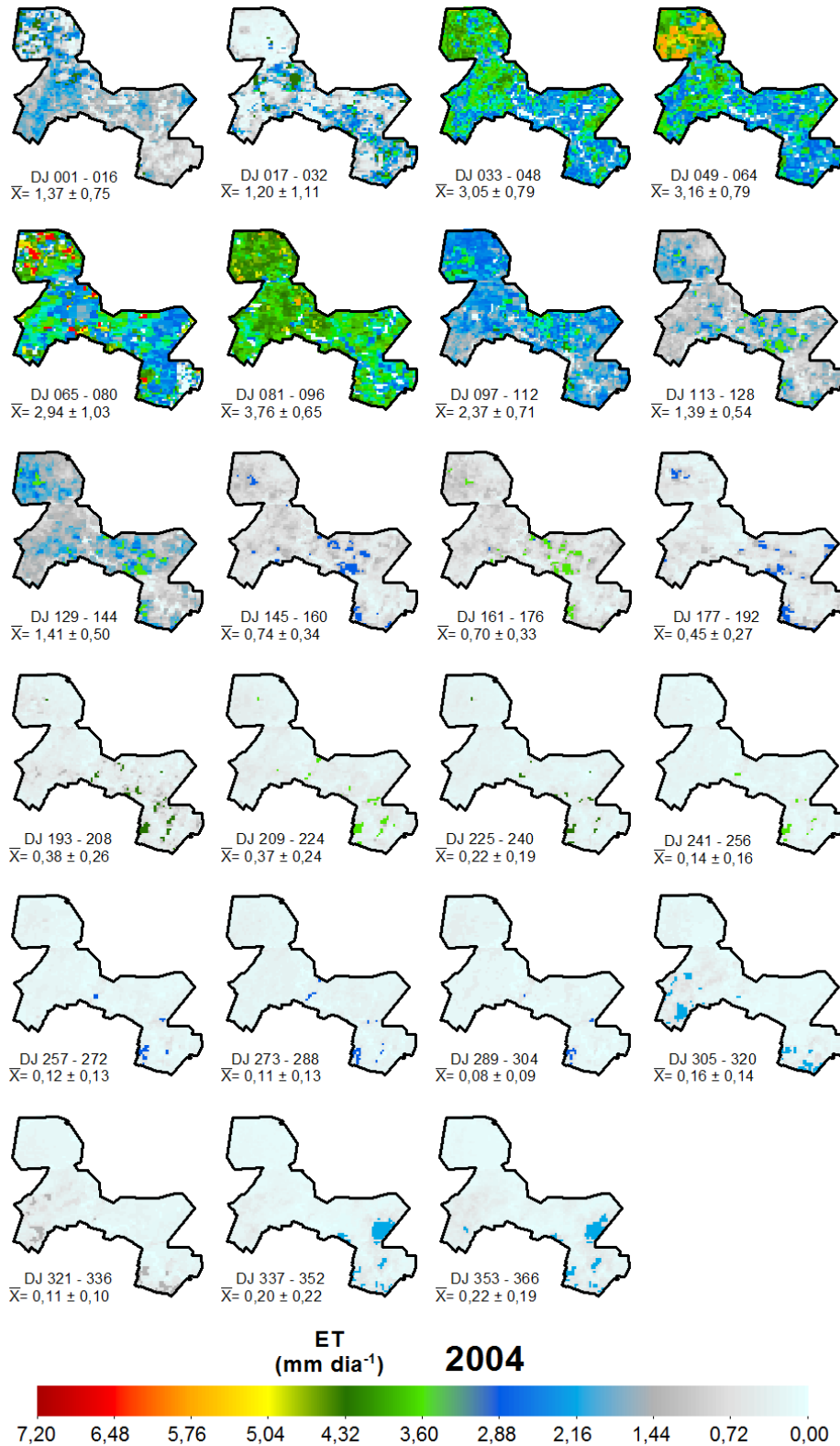


Figura 12. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média ± Desvio Padrão (DP).

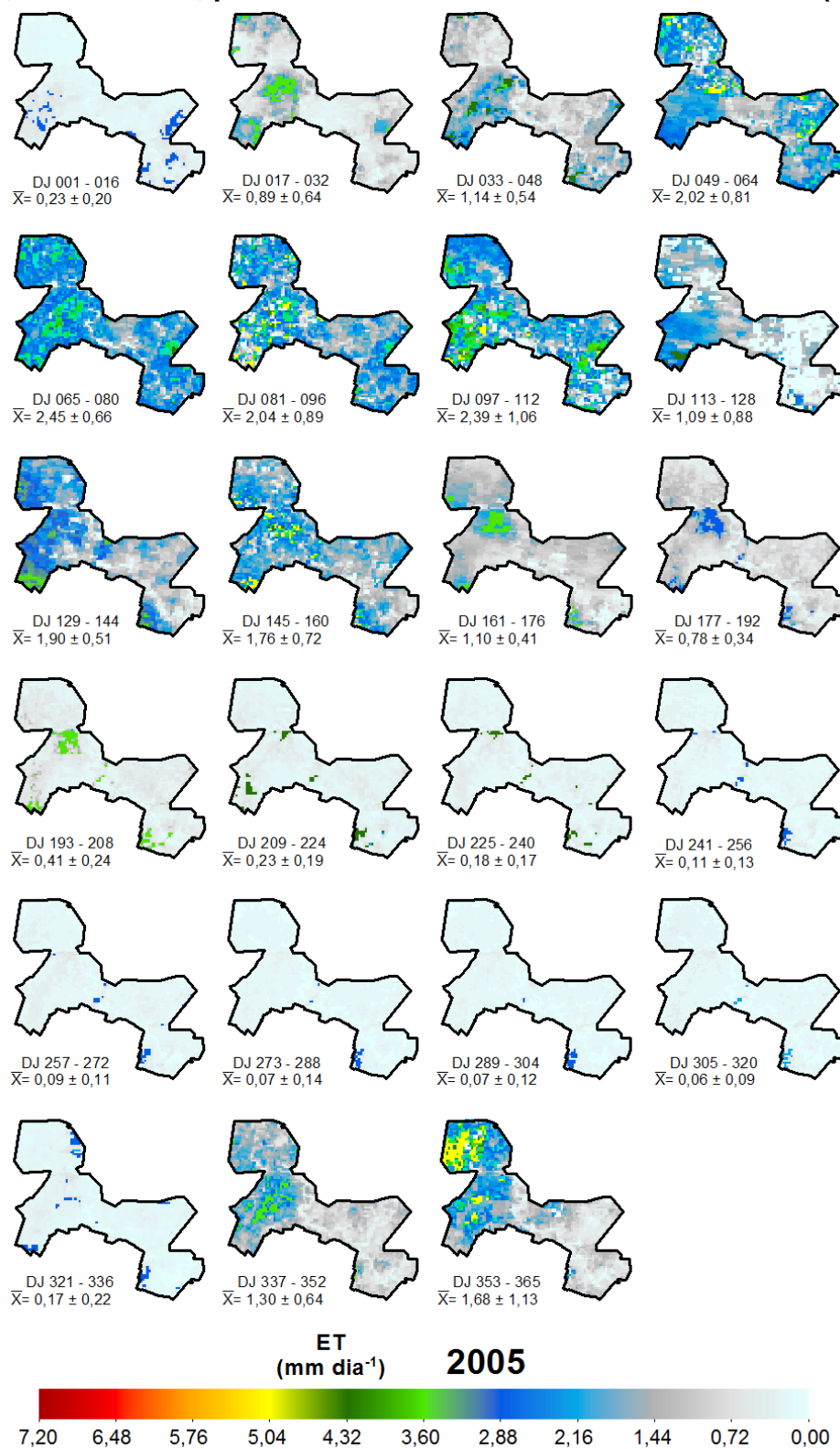


Figura 13. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média ± Desvio Padrão (DP).

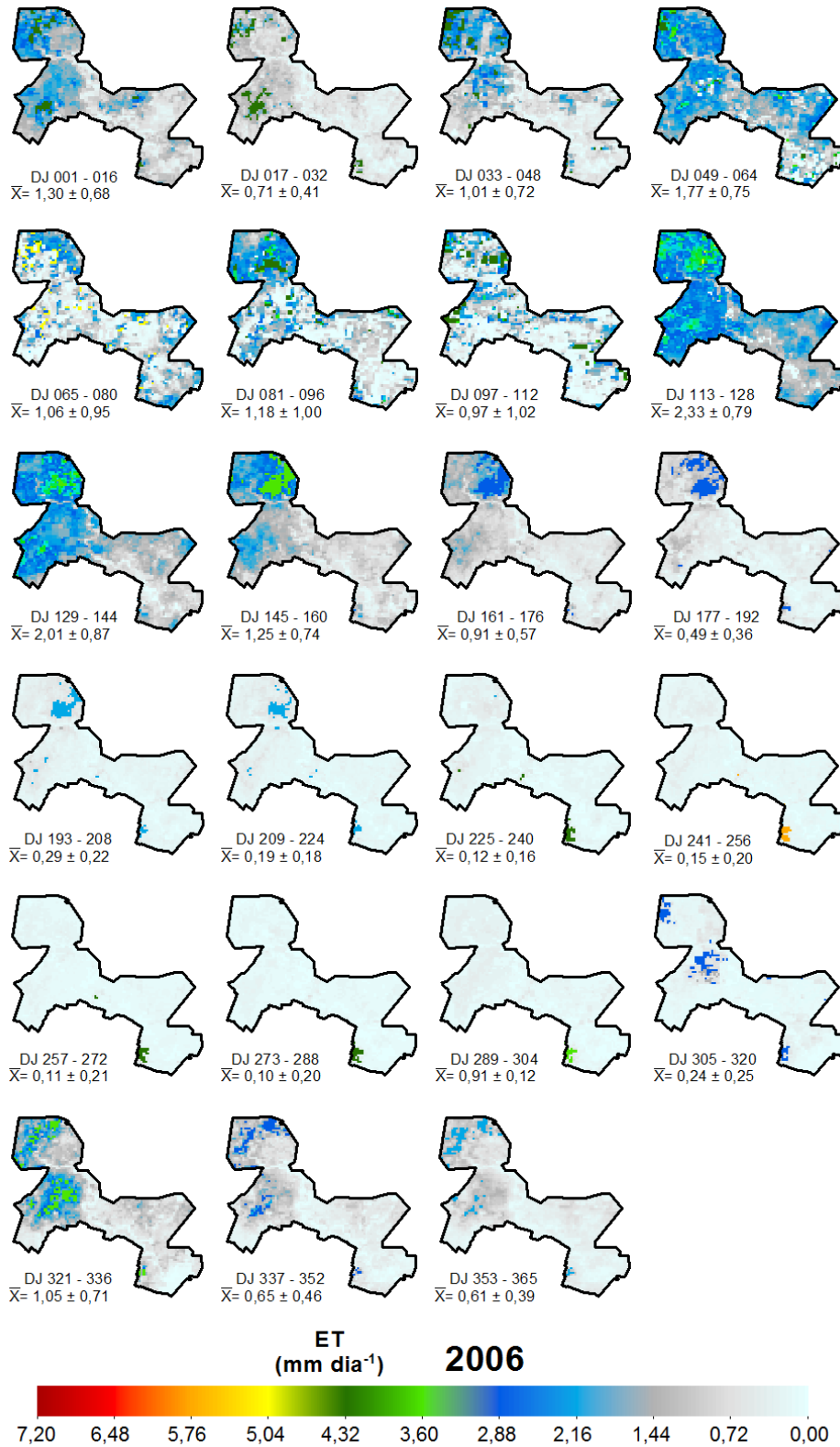


Figura 14. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média ± Desvio Padrão (DP).

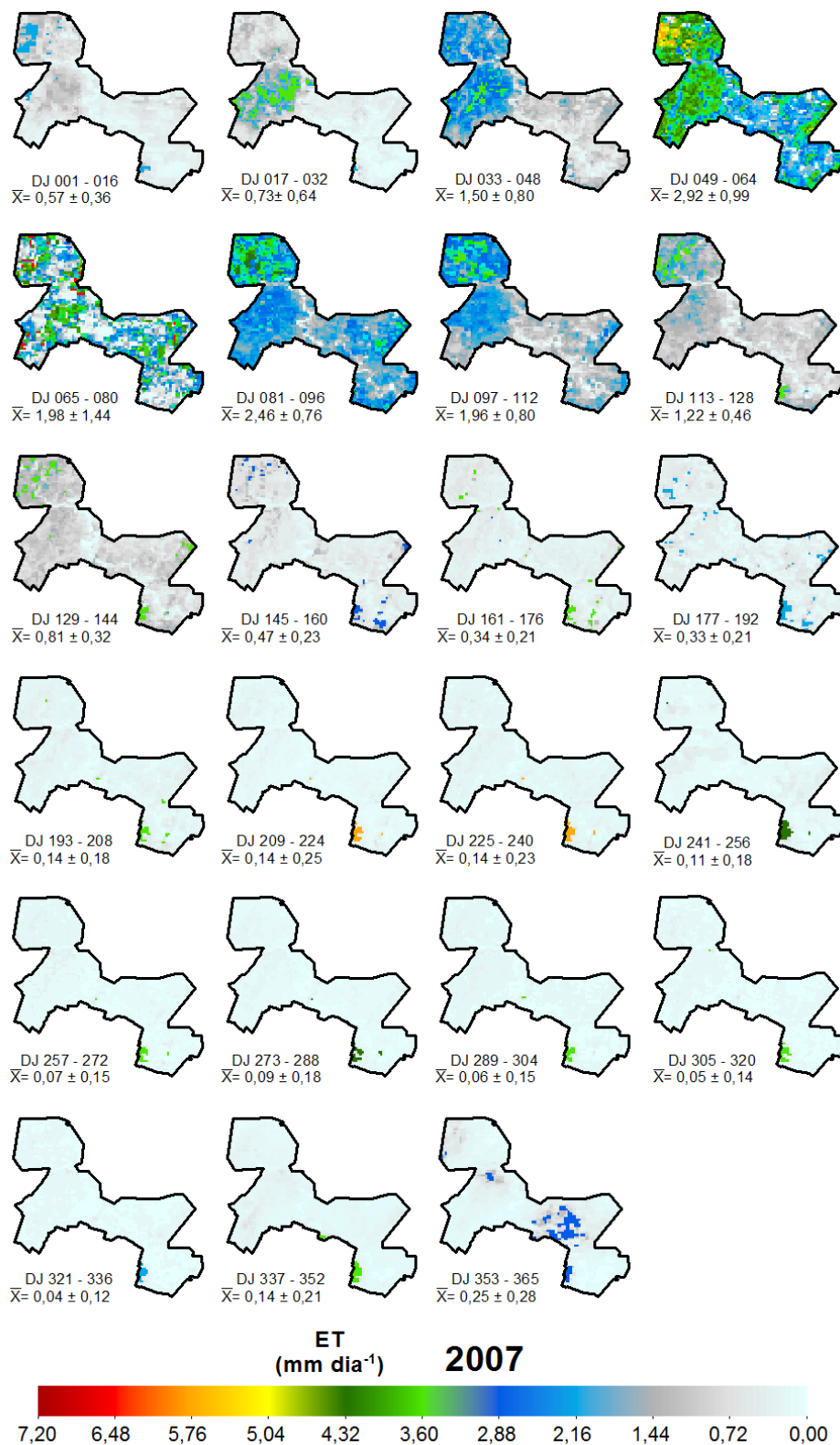


Figura 15. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média ± Desvio Padrão (DP).

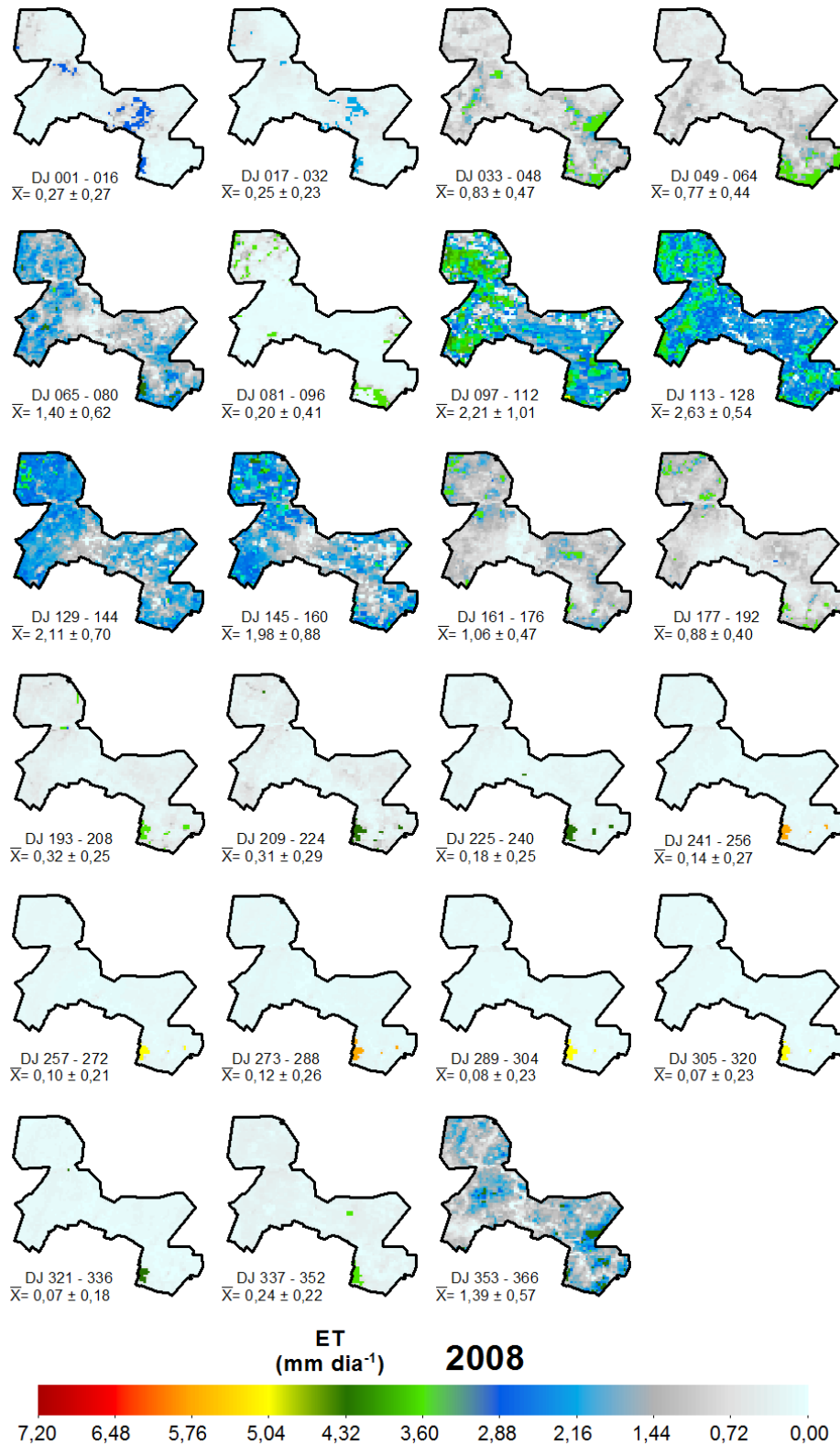


Figura 16. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média ± Desvio Padrão (DP).

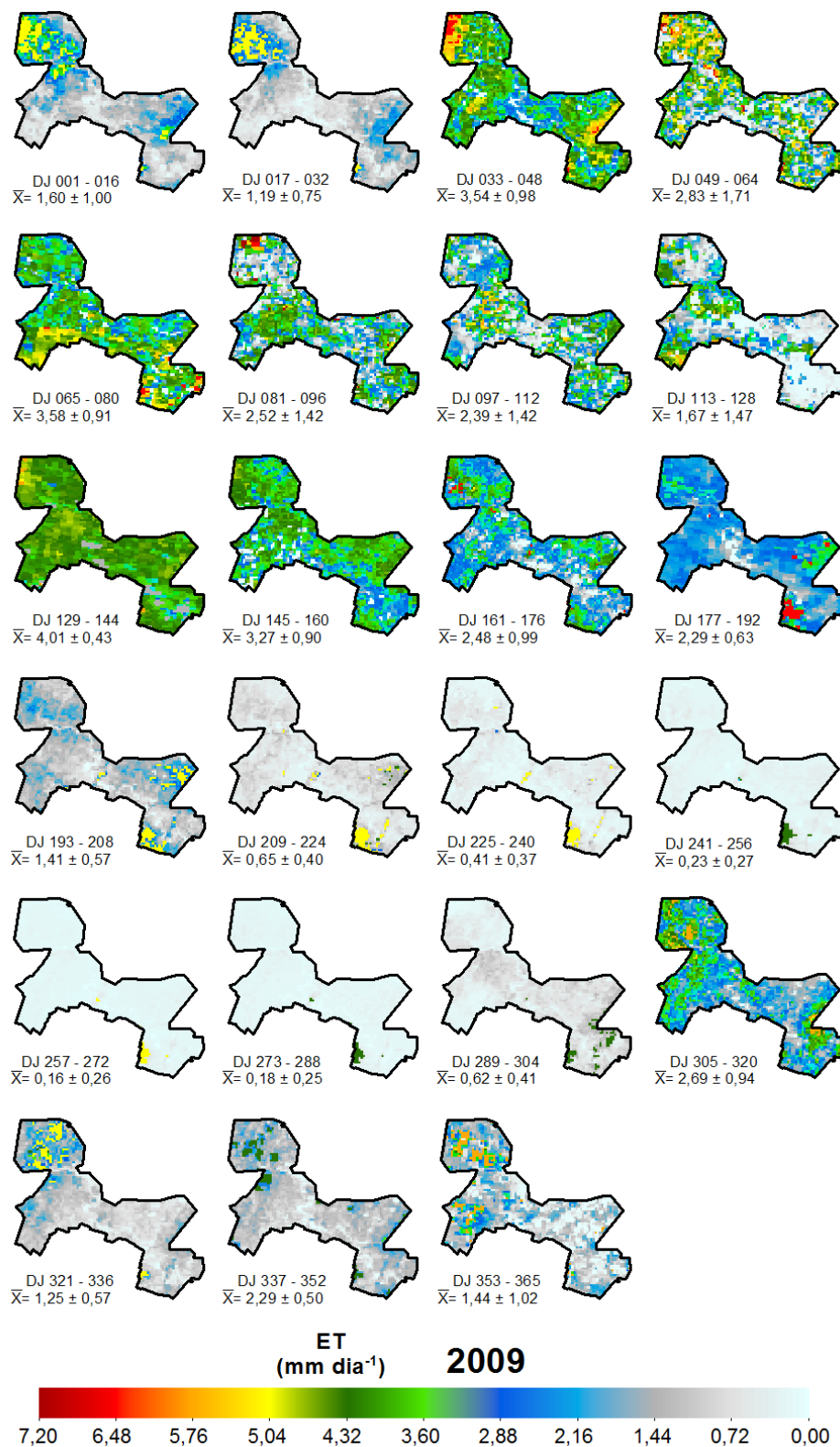


Figura 17. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média \pm Desvio Padrão (DP).

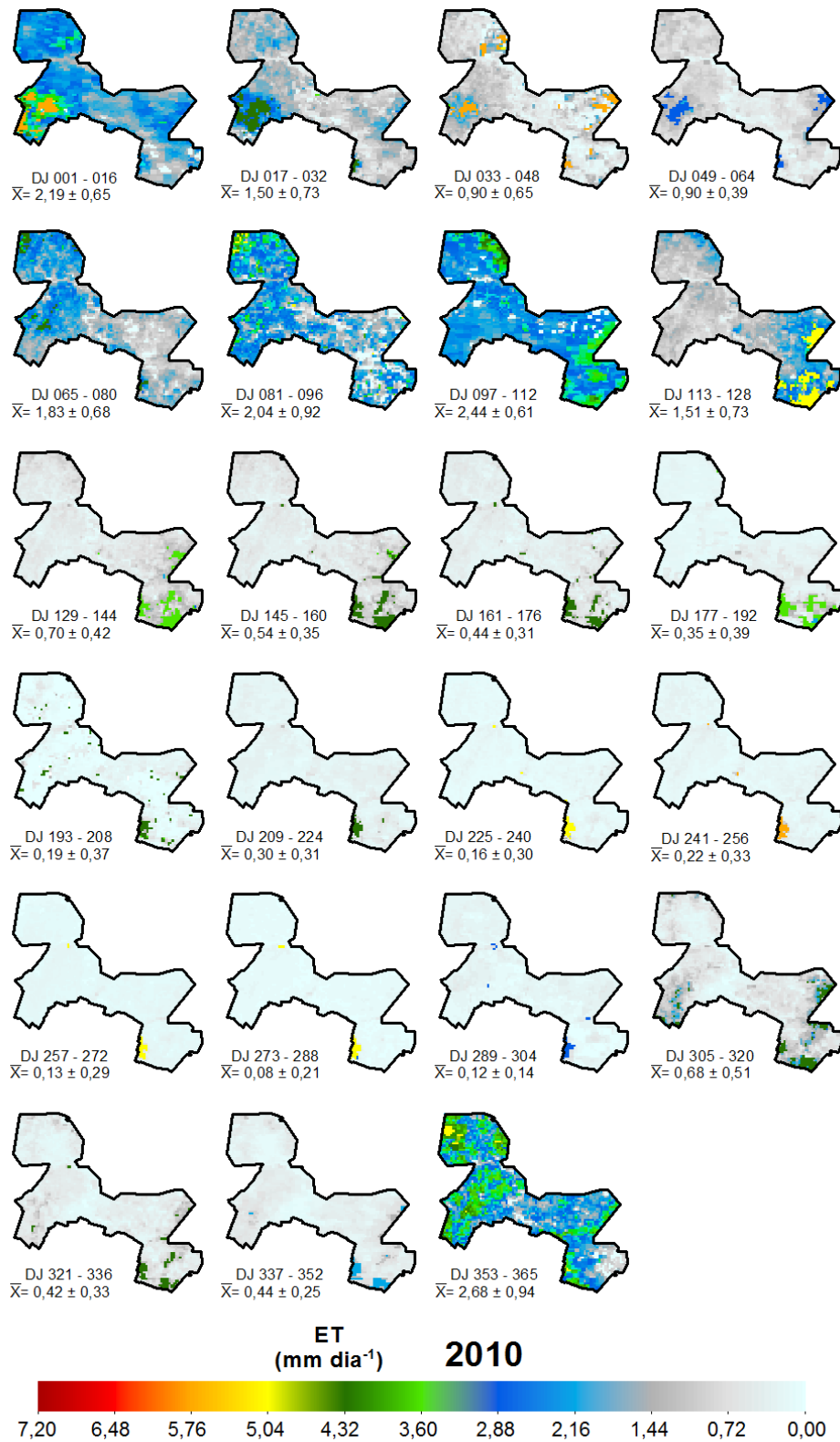


Figura 18. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média ± Desvio Padrão (DP).

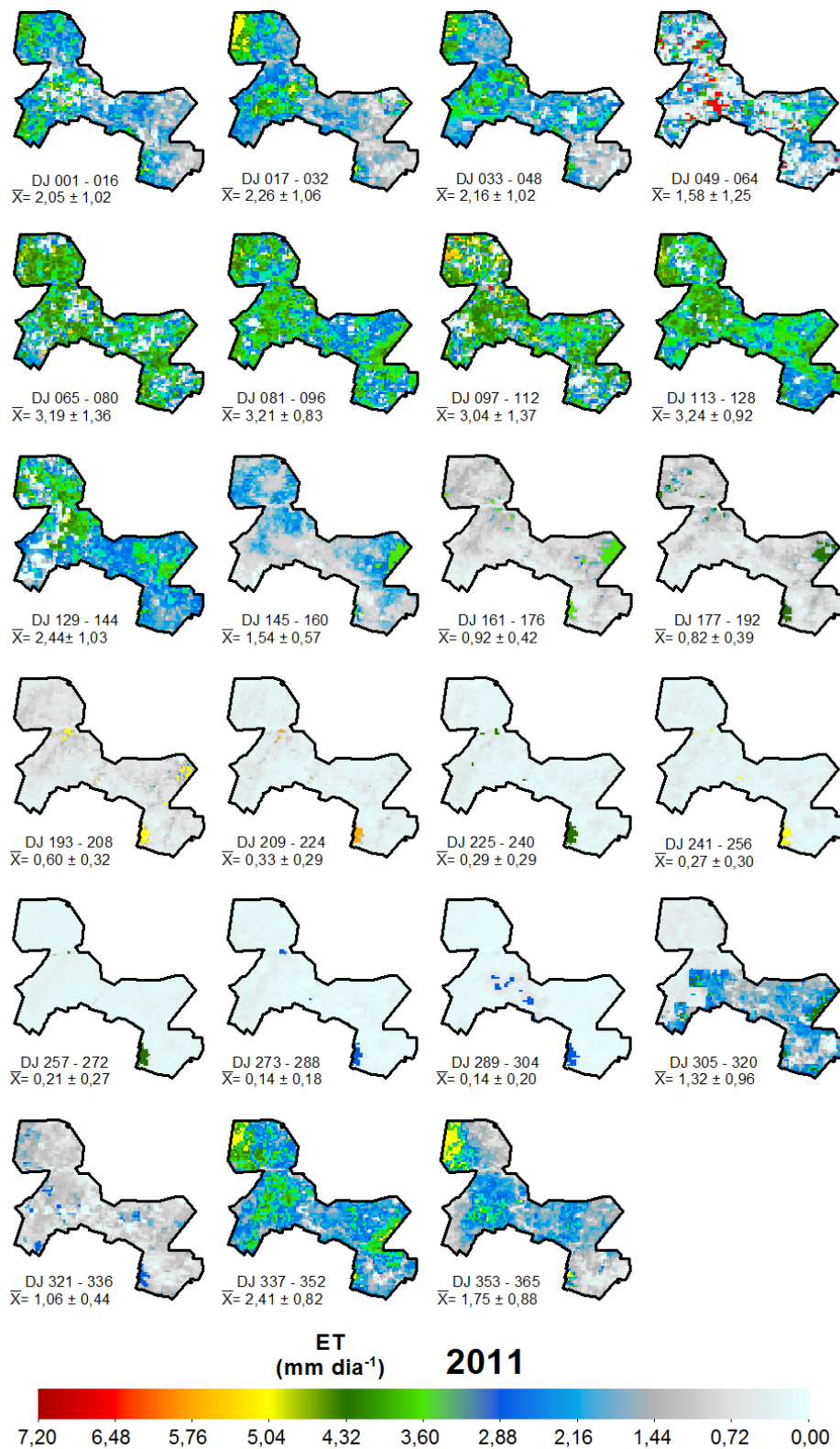


Figura 19. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média ± Desvio Padrão (DP).

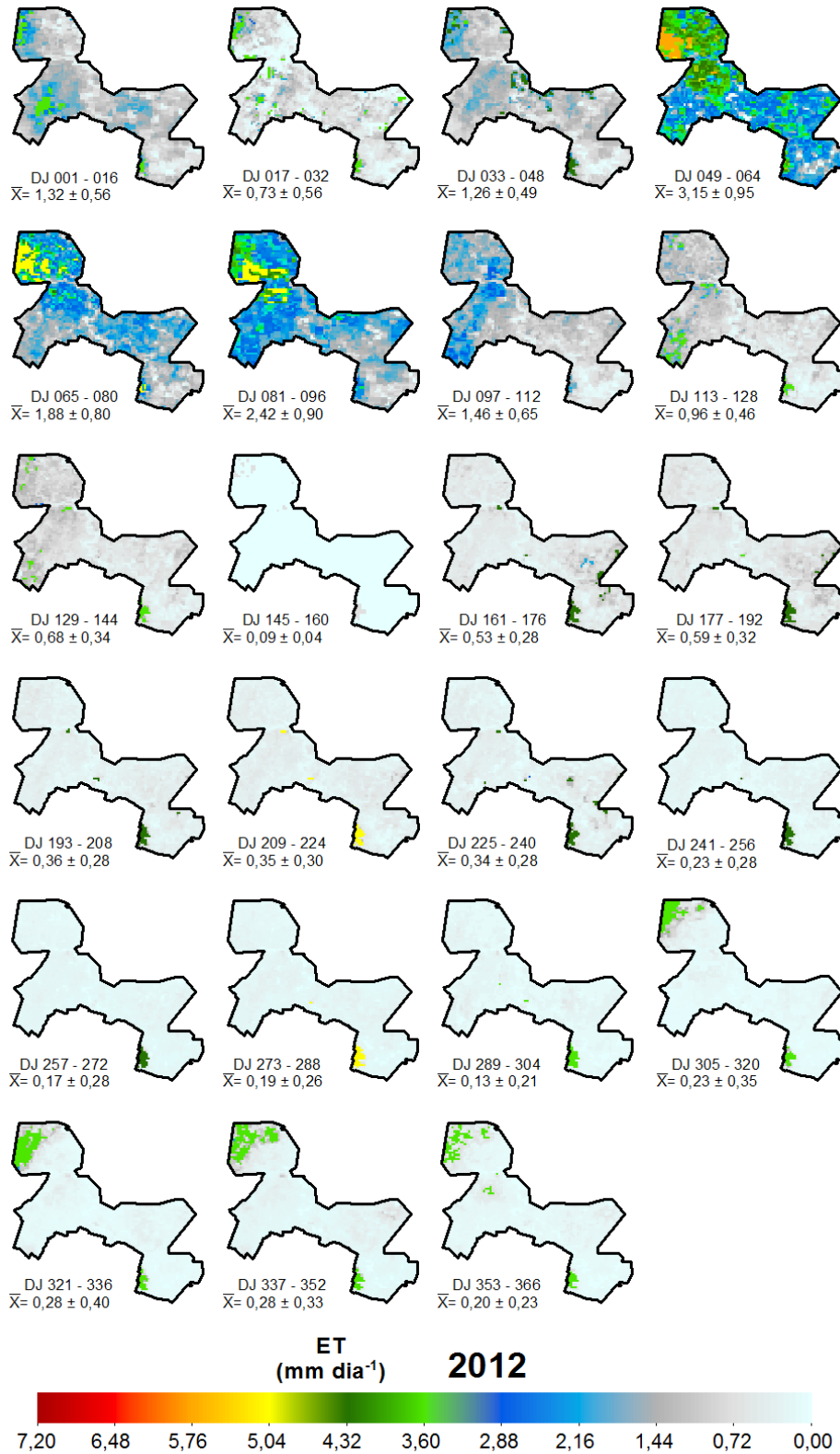


Figura 20. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média ± Desvio Padrão (DP).

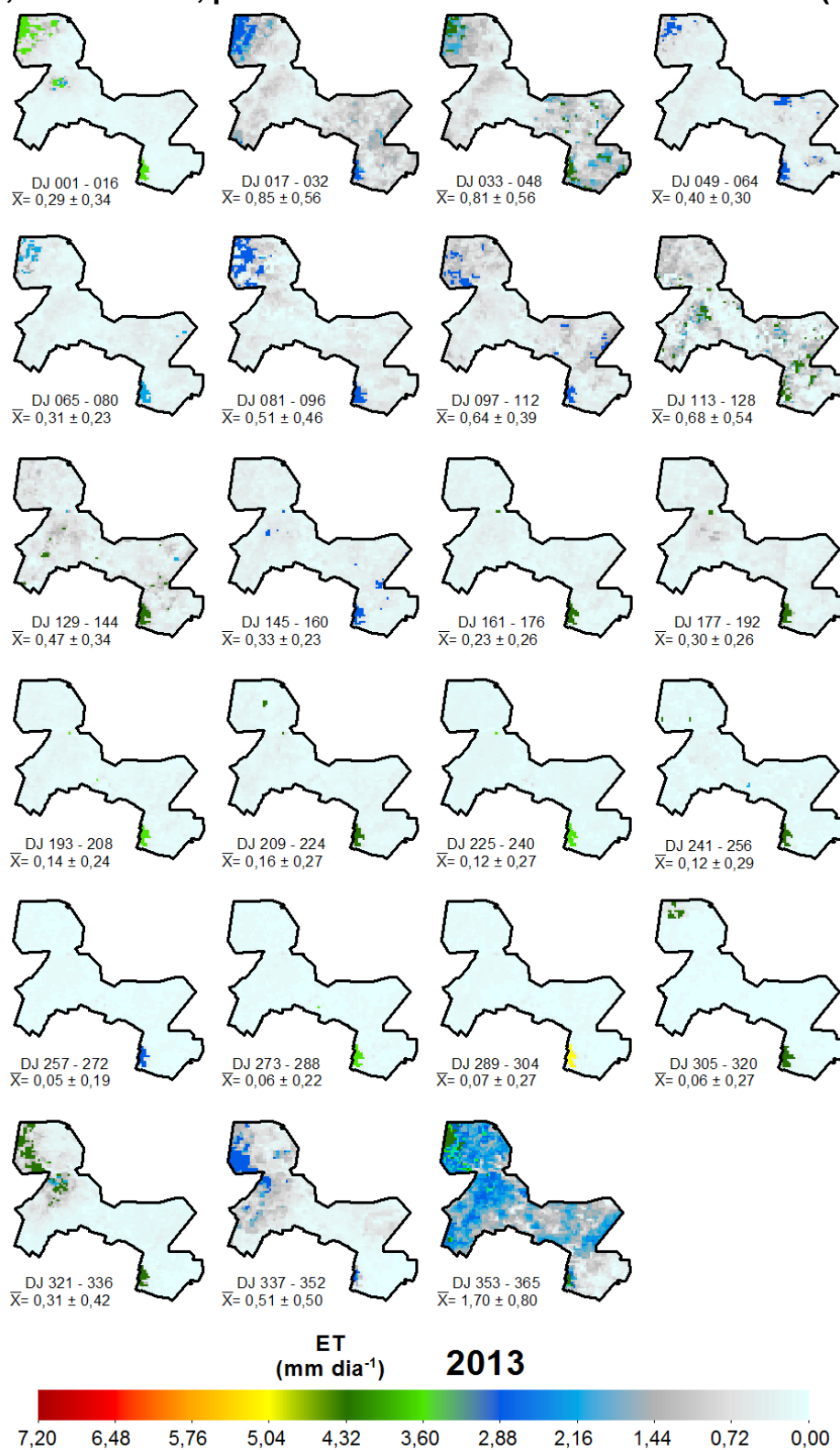


Figura 21. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média ± Desvio Padrão (DP).

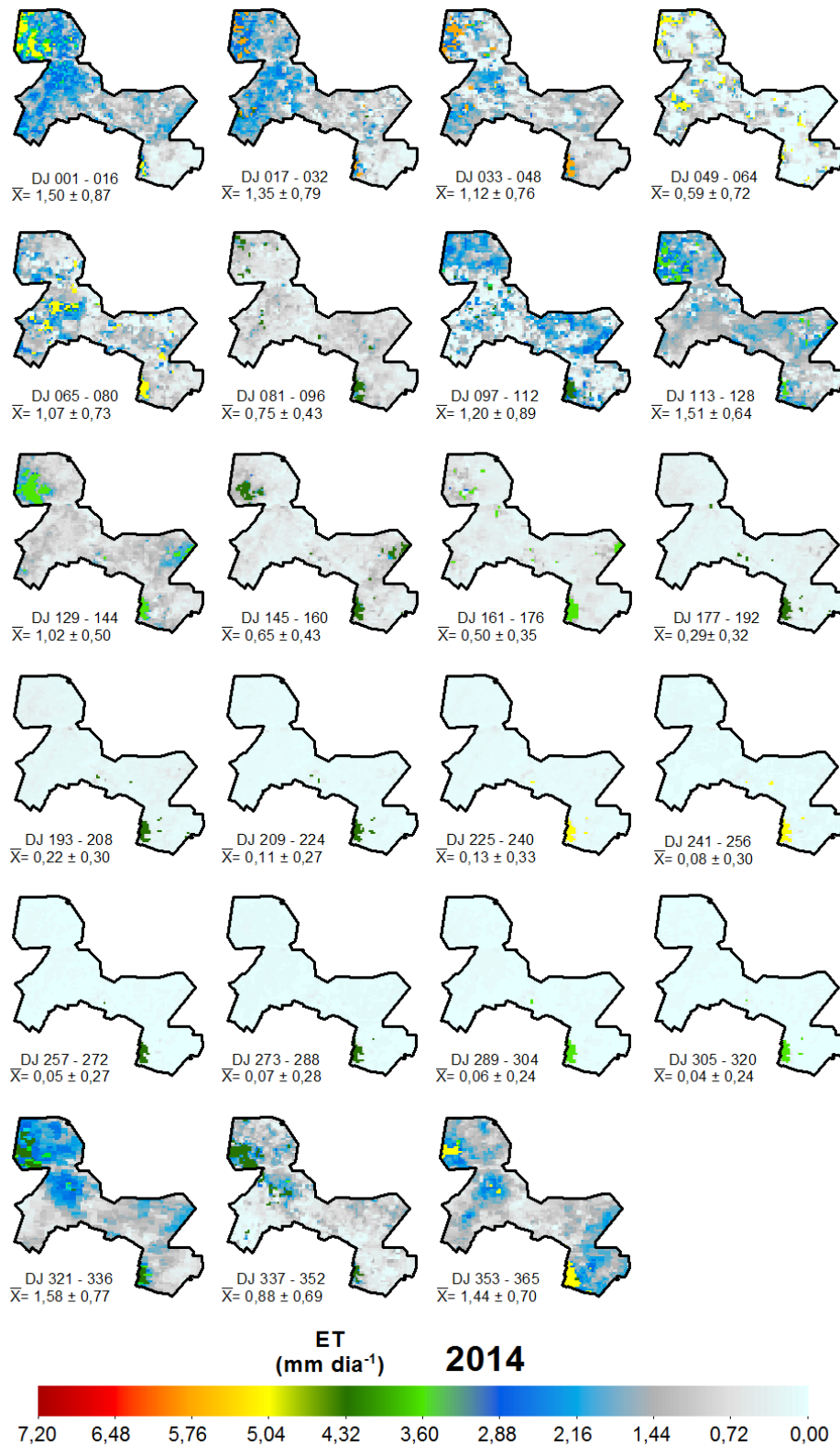
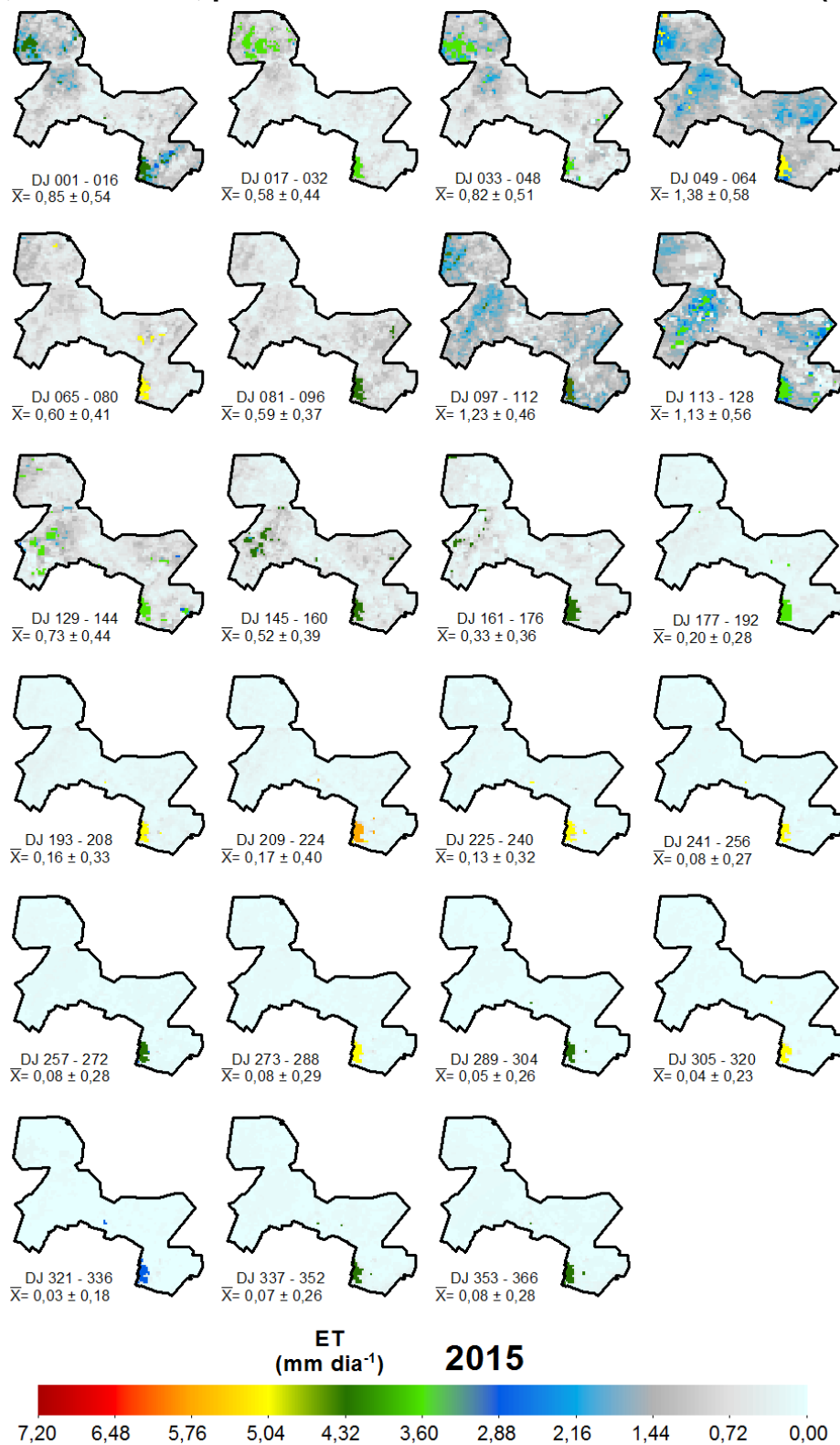


Figura 22. Mapas de evapotranspiração real (ET_r) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média ± Desvio Padrão (DP).



Nas Figuras de 7 a 22 observa-se que as maiores médias de ET_r se concentraram na estação de chuvas, apresentando valor máximo de $7,20 \text{ mm dia}^{-1}$ no intervalo de 16 dias nos dias Juliano (DJ) entre 001 a 016 do ano de 2001 (Figura 8), os quais representam o mês de janeiro. Durante a estação de chuvas ocorreram picos de ET_r provenientes do acumulado relevante de P (Figura 6) nos dias anteriores, de modo que ao longo deste intervalo os picos vão reduzindo. No entanto, alguns anos foram marcados com baixos valores de ET_r , atingindo resultados próximos ou iguais a zero, devido a fenômenos naturais que ocasionaram baixos índices de P nos anos anteriores, como ocorreram em 2000, 2005, 2008 e 2013 (Figuras 7, 12, 15 e 20, respectivamente).

Ao longo dos anos, os valores de ET_r foram relevantes nas áreas onde se concentram a maior parte da vegetação nativa (VN) densa, entretanto, nas regiões em que apresentaram solo exposto e VN raleada, os resultados de ET_r encontraram-se próximos ou iguais a zero. No início da estação de chuvas os resultados de ET_r foram elevados em sua grande maioria, onde ocorreram picos de ET_r provenientes do acumulado considerável de P nos dias anteriores, alcançando um valor máximo de $7,16 \text{ mm dia}^{-1}$ nos DJ entre 321 a 336 do ano de 2000 (Figura 1), que representam o mês de novembro. Porém, alguns anos registraram resultados abaixo quando comparados aos demais estudados, atingindo valores próximos ou iguais a zero em grande parte do perímetro, como mostrado nos anos de 2001, 2004, 2007, 2012 e 2015 (Figuras 8, 11, 14, 19 e 22, respectivamente), estimulados por fenômenos naturais.

Nos dias em que constituem o final da estação de chuvas ocorreram picos de ET_r provenientes do acumulado expressivo de P nos meses que representa a estação de chuvas, comum para este período, de modo que ao longo deste intervalo os picos foram reduzindo, caracterizando a dispersão das nuvens e diminuição da umidade do solo. Em alguns anos este período apresentou resultados incomuns, alcançando valores de ET_r acima dos resultados correspondentes para este período na região, como foi o ocorrido nos anos de 2005, 2008, 2009 e 2011 (Figuras 12, 15, 16 e 18, respectivamente), resultante do atraso das ocorrências de P na estação de chuvas. Em contrapartida, outros anos apresentaram resultados abaixo do normal climatológico em virtude do baixo acumulado de P nos meses anteriores, como

apresentado nos anos de 2007, 2012, 2013 e 2015 (Figuras 14, 19, 20 e 22, respectivamente).

Com relação a estação seca, resultados próximos ou iguais a zero podem ser encontrados em grande parte dos anos estudados, principalmente nos DJ referente aos meses de setembro e outubro. Contudo, em meio a este período, houve pontos nos mapas em que a ET_r é superior à média diária, onde encontra-se áreas com agricultura irrigada (AI) e VN mais densa, obtendo valor máximo de $5,66 \text{ mm dia}^{-1}$ nos DJ entre 225 a 240 do mês de agosto de 2007, compreendendo a concentração de umidade do solo retida na zona radicular das mesmas.

Entre os anos de 2000 a 2015, a média anal de ET_r , no Perímetro Irrigado Pontal Sul foi de $0,93 \text{ mm dia}^{-1}$. A maior média de ET_r foi registrada no ano de 2009 com valor de $1,81 \text{ mm dia}^{-1}$, e a menor média no ano de 2013, com valor de $0,40 \text{ mm dia}^{-1}$.

Nas Figuras 23 a 38 estão retratadas as médias e os DP separadamente para a AI e a VN.

Figura 23. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.

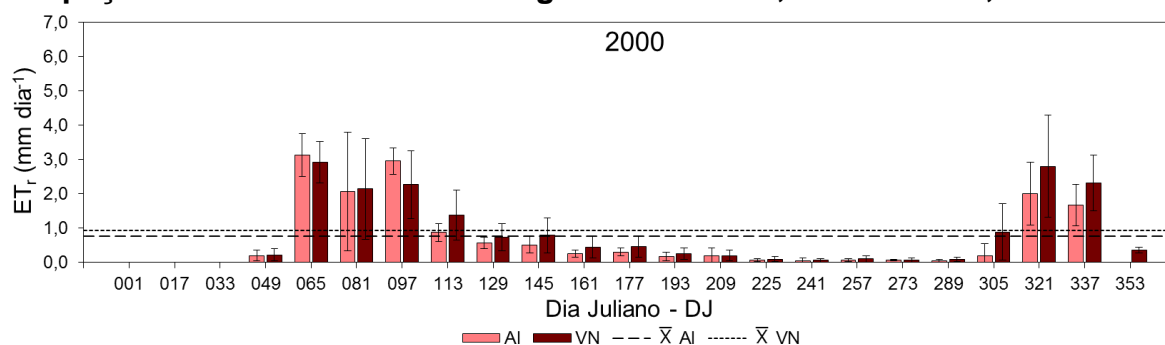


Figura 24. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.

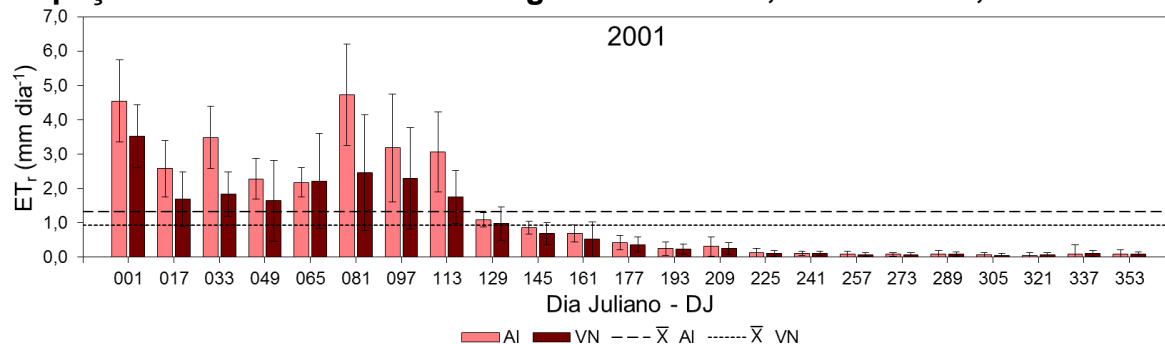


Figura 25. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.

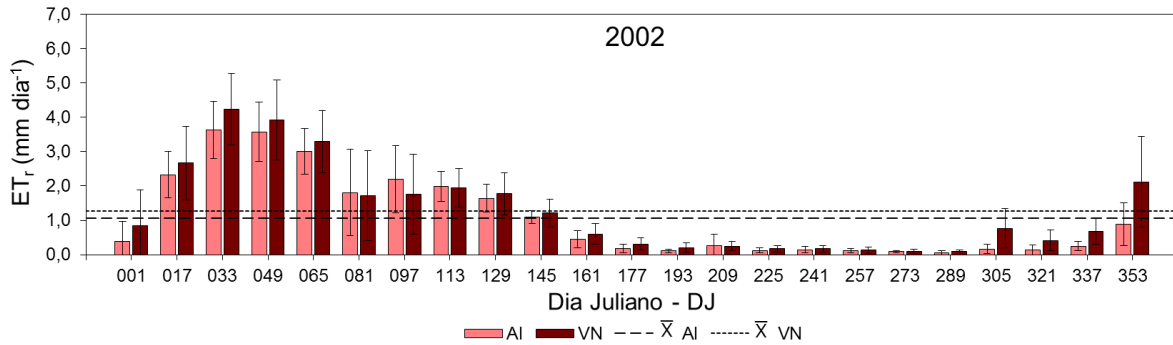


Figura 26. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.

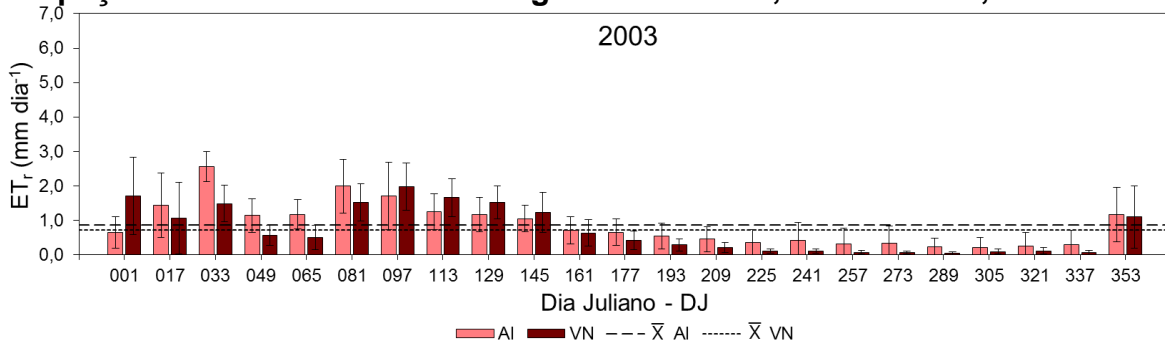


Figura 27. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.

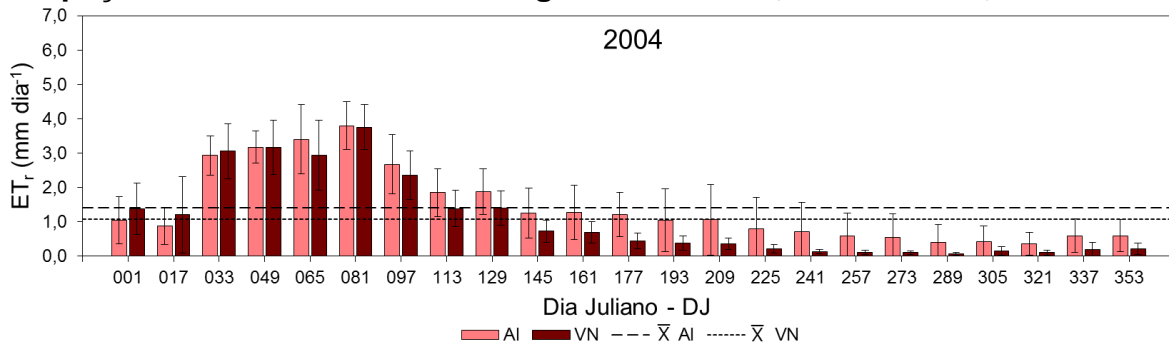


Figura 28. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2005.

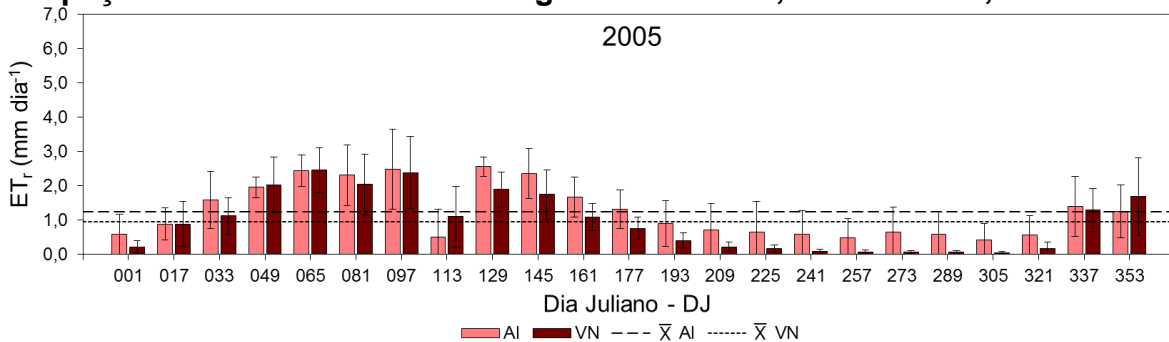


Figura 29. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.

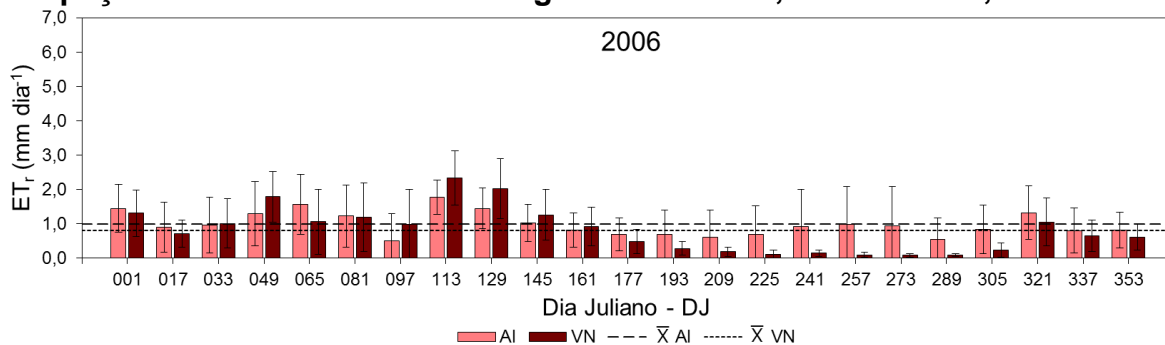


Figura 30. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.

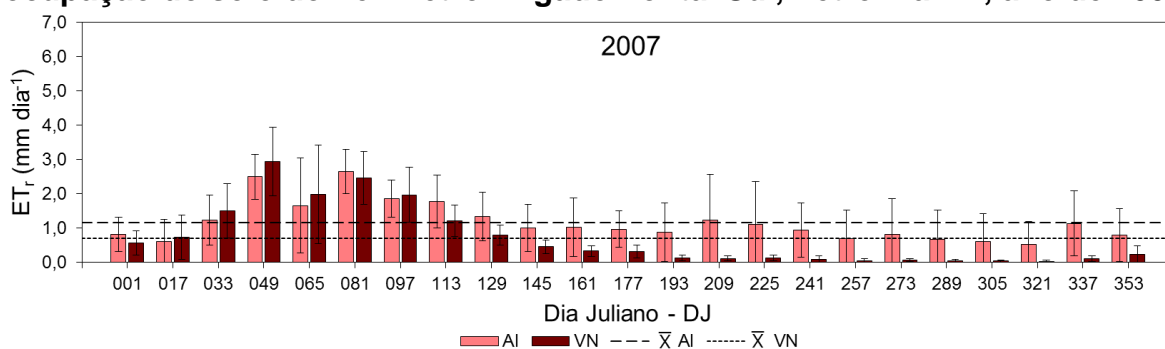


Figura 31. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.

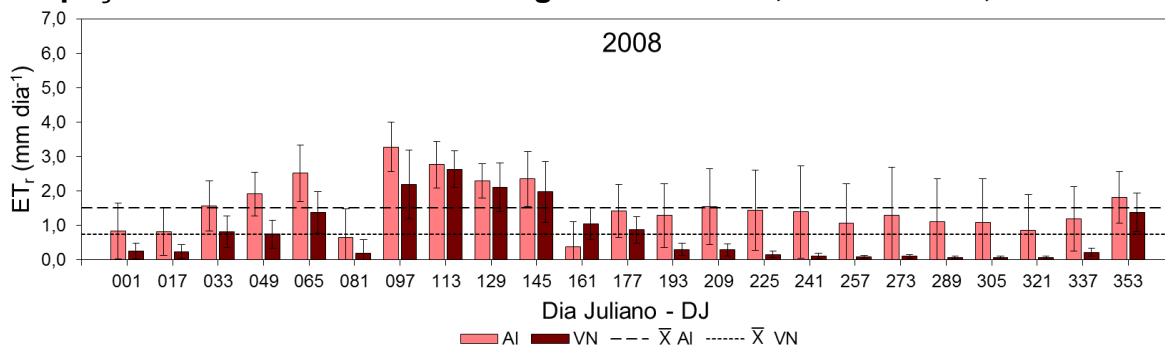


Figura 32. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.

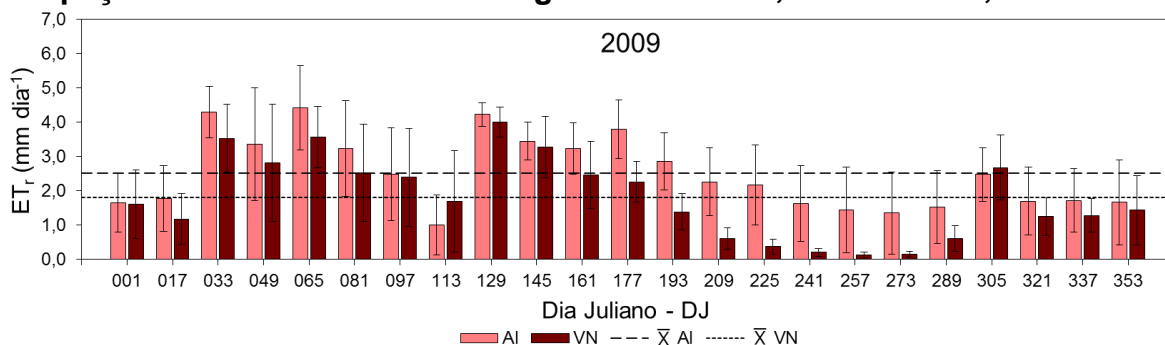


Figura 33. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010

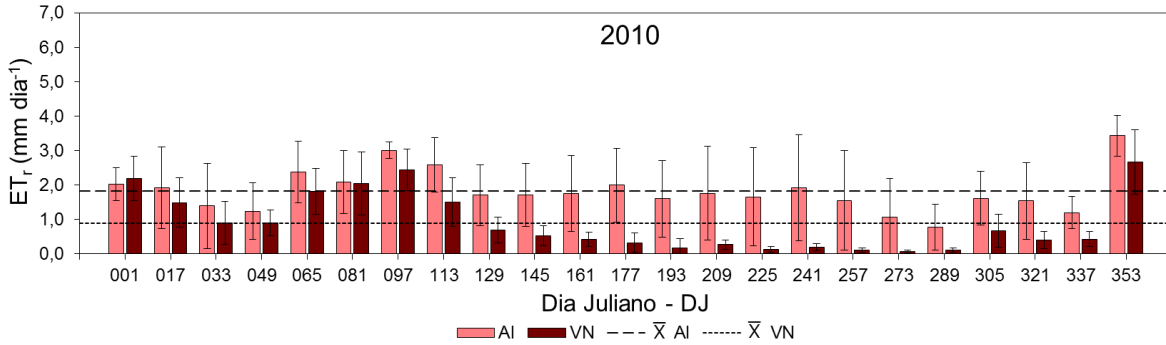


Figura 34. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.

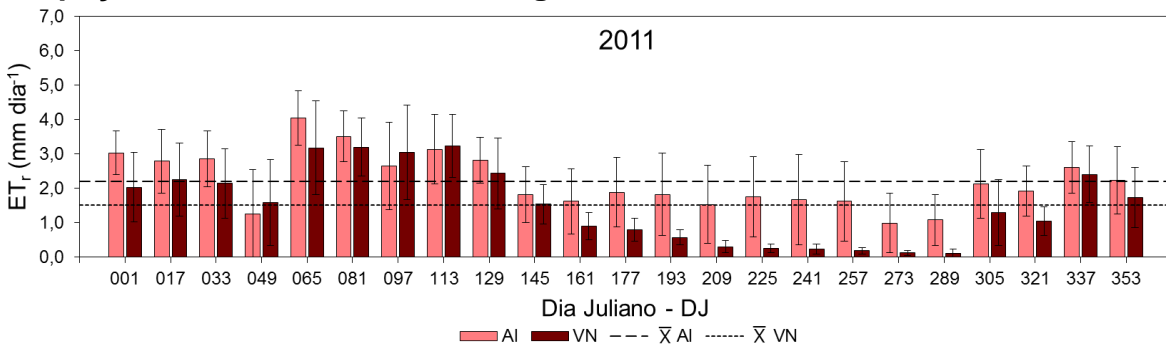


Figura 35. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.

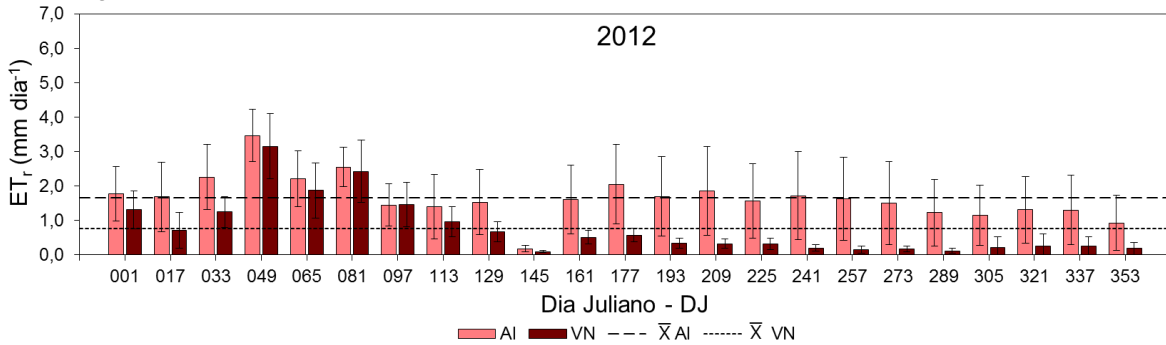


Figura 36. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.

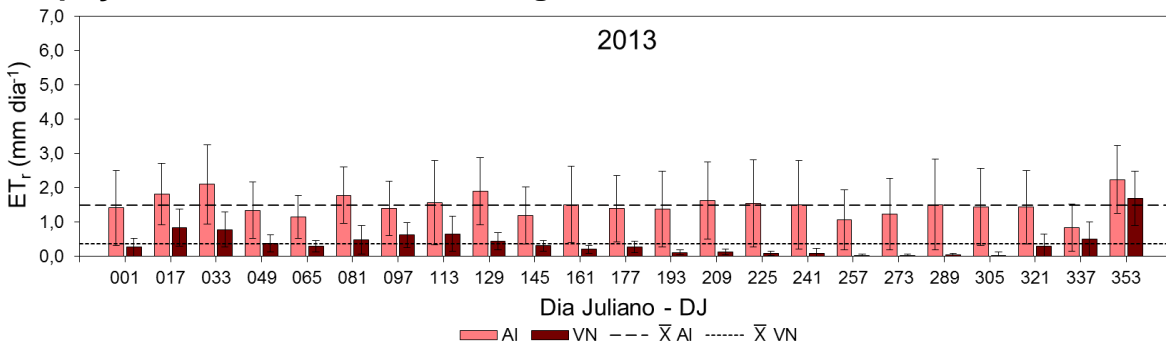


Figura 37. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.

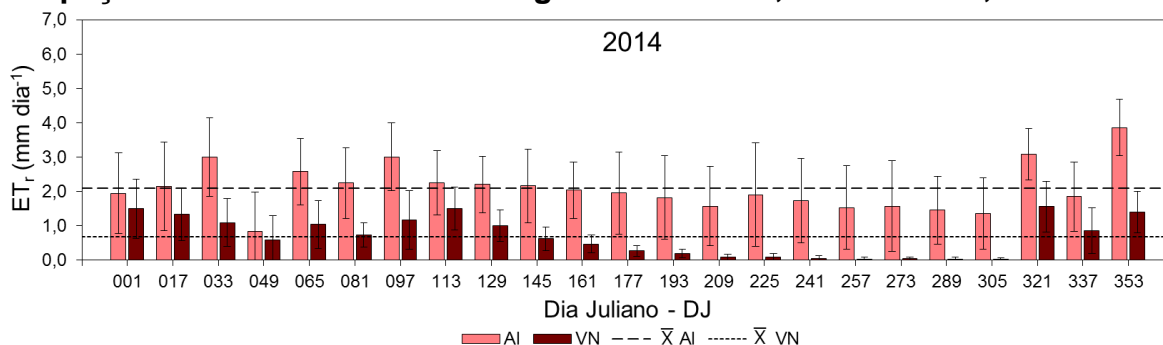
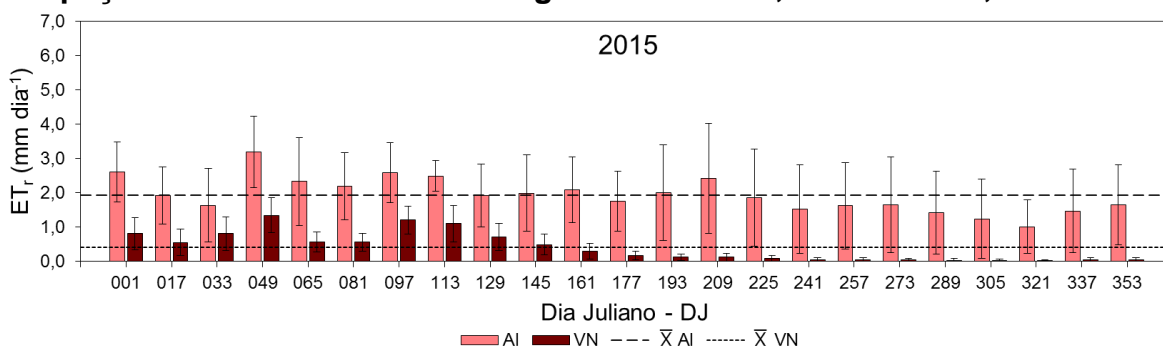


Figura 38. Médias e Desvio Padrão de evapotranspiração real (ET_r) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.



Avaliando individualmente as áreas de AI e VN nas Figuras 23 a 38, observa-se que as médias mais elevadas de ET_r estão nas áreas de AI, entre os anos de 2005 a 2006, principalmente na estação seca, onde a umidade do solo é menor, diferentemente dos anos entre 2000 a 2004 onde a AI não era presente. Nas áreas onde solo é exposto e em áreas de VN raleada, os processos de ET_r são mais intensos, devido a ações da RG e da ET_0 (Tabela 4), ampliando as taxas de ET_r no período de chuvas.

Com relação as áreas de VN, as mesmas apresentaram média geral de $0,91 \text{ mm dia}^{-1}$. A menor média anual de ET_r foi encontrada no ano de 2013 (Figura 36) com $0,37 \text{ mm dia}^{-1}$, e a maior média foi computada no ano de 2009 (Figura 32), com $1,80 \text{ mm dia}^{-1}$. No período de chuvas, os valores de ET_r estiveram acima de média anual nos meses de janeiro e março na maior parte dos anos estudados, proporcionado pela acumulado de P nos meses anteriores. Na estação seca os resultados de ET_r estiveram abaixo da média anual; contudo, houve pequenas variações na extensão do perímetro relacionado ao acúmulo de umidade do solo proporcionado pela

vegetação, especialmente nas áreas com VN densa, que restringem a ação dos processos climáticos ao longo do ano, regulando as taxas de ET_r . A menor média registrada foi de $0,01 \text{ mm dia}^{-1}$ nos DJ entre 321 a 336 que caracterizam o mês de novembro 2015, proveniente da ação de fenômenos naturais que restringiram o surgimento de nuvens sobre a região neste ano, diminuindo assim o acumulado de P. Já a maior média foi de $4,23 \text{ mm dia}^{-1}$ nos DJ entre 033 a 048 no mês de fevereiro de 2002, dado a maior concentração de chuvas neste período.

Na área de AI, a média geral foi de $1,69 \text{ mm dia}^{-1}$. A menor média anual ocorreu em 2006 com valor igual a $0,99 \text{ mm dia}^{-1}$, e a maior média foi verificada no ano de 2009 com valor igual a $2,51 \text{ mm dia}^{-1}$. Na maior parte do ano os valores de ET_r estiveram abaixo da média anual, principalmente no período de seca. No período de chuvas suas médias são acentuadas, em grande parte, devido ao acumulado de P associado a aplicação de água via irrigação, causando uma oscilação maior em suas médias de ET_r , tendo como destaque, na maioria dos casos, os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, correspondendo a estação de chuvas com estimativas acima da média anual. Na estação seca, o acumulado de P foi inferior, porém, as médias de ET_r são mais estáveis, em virtude da maior concentração de umidade do solo proporcionada pela irrigação. A menor média foi encontrada nos DJ entre 145 a 160 do mês de maio de 2012, com valor igual a $0,17 \text{ mm dia}^{-1}$, sendo relacionado a elevadas médias de RG e ao baixo acumulado de P neste período. A maior média de ET_r foi encontrada nos DJ entre 065 a 080, referentes ao mês de março de 2009, com valor de $4,42 \text{ mm dia}^{-1}$, influenciado pelo acumulado elevado de P nos dias anteriores e pelas médias significativas de RG.

4.4 Biomassa (BIO)

Nas Figuras 39 a 54 se apresentam os mapas de BIO do Perímetro Irrigado Pontal Sul para os anos de 2000 a 2015.

Figura 39. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média \pm Desvio Padrão (DP).

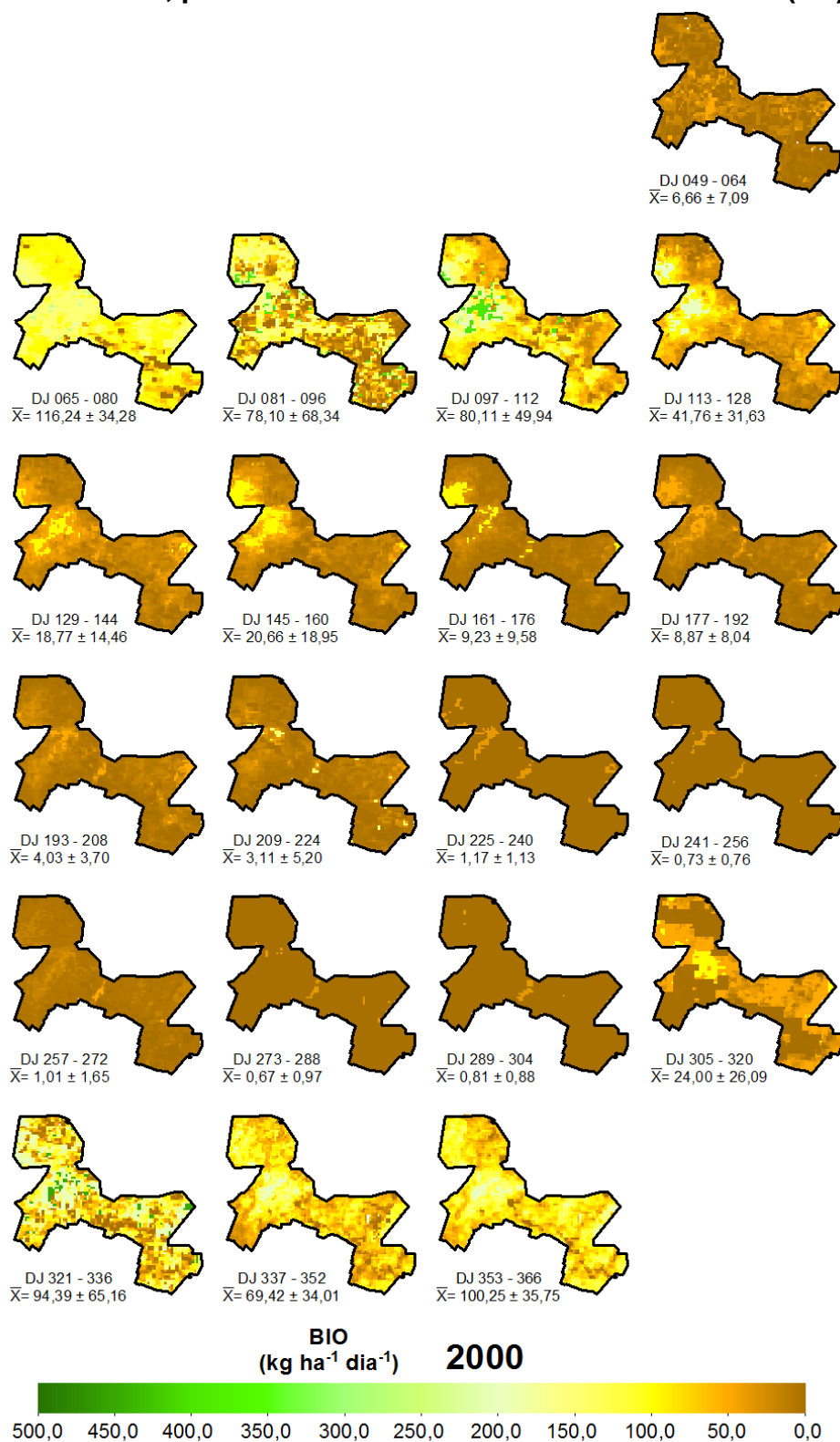


Figura 40. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média \pm Desvio Padrão (DP).

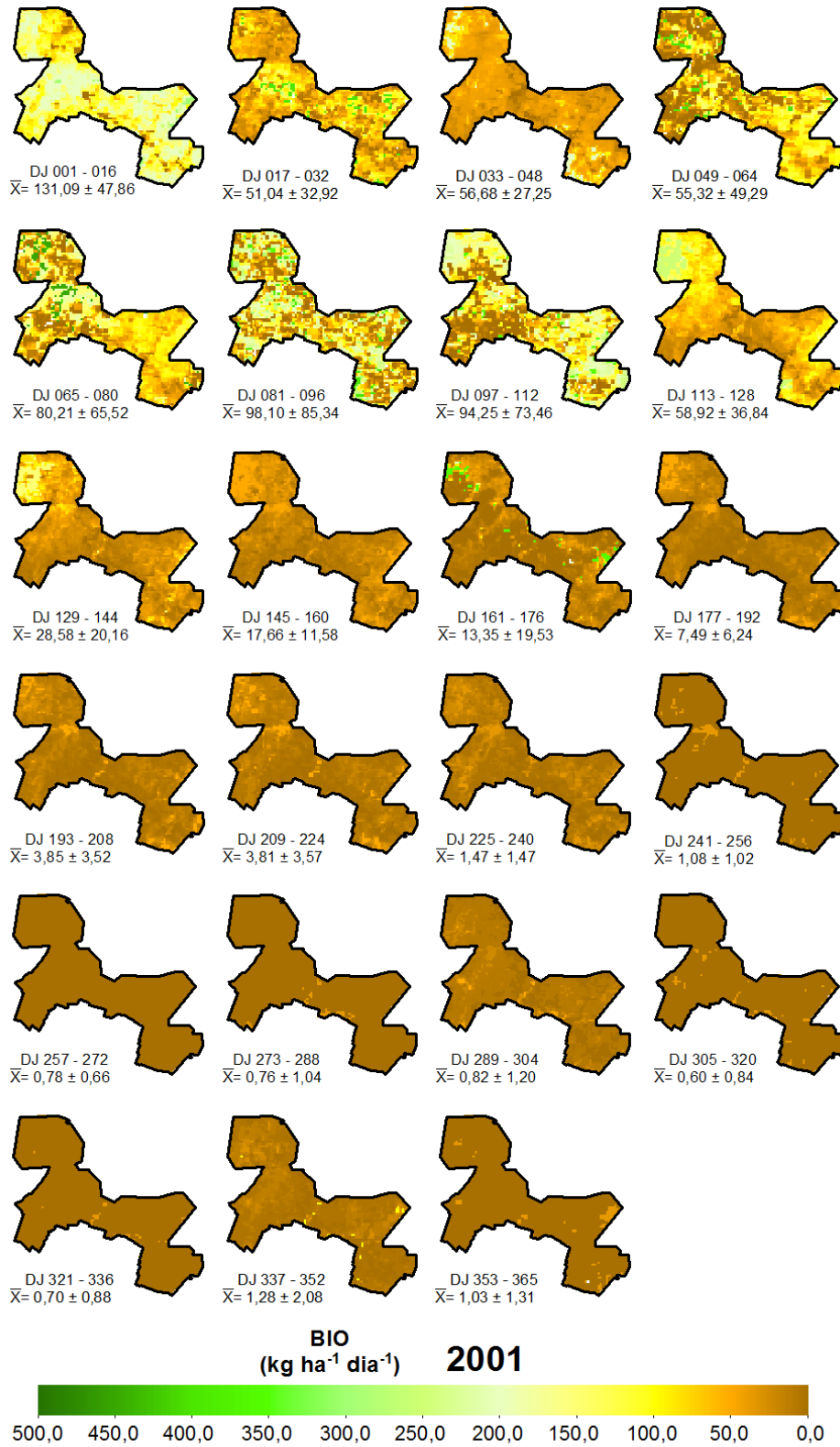


Figura 41. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média \pm Desvio Padrão (DP).

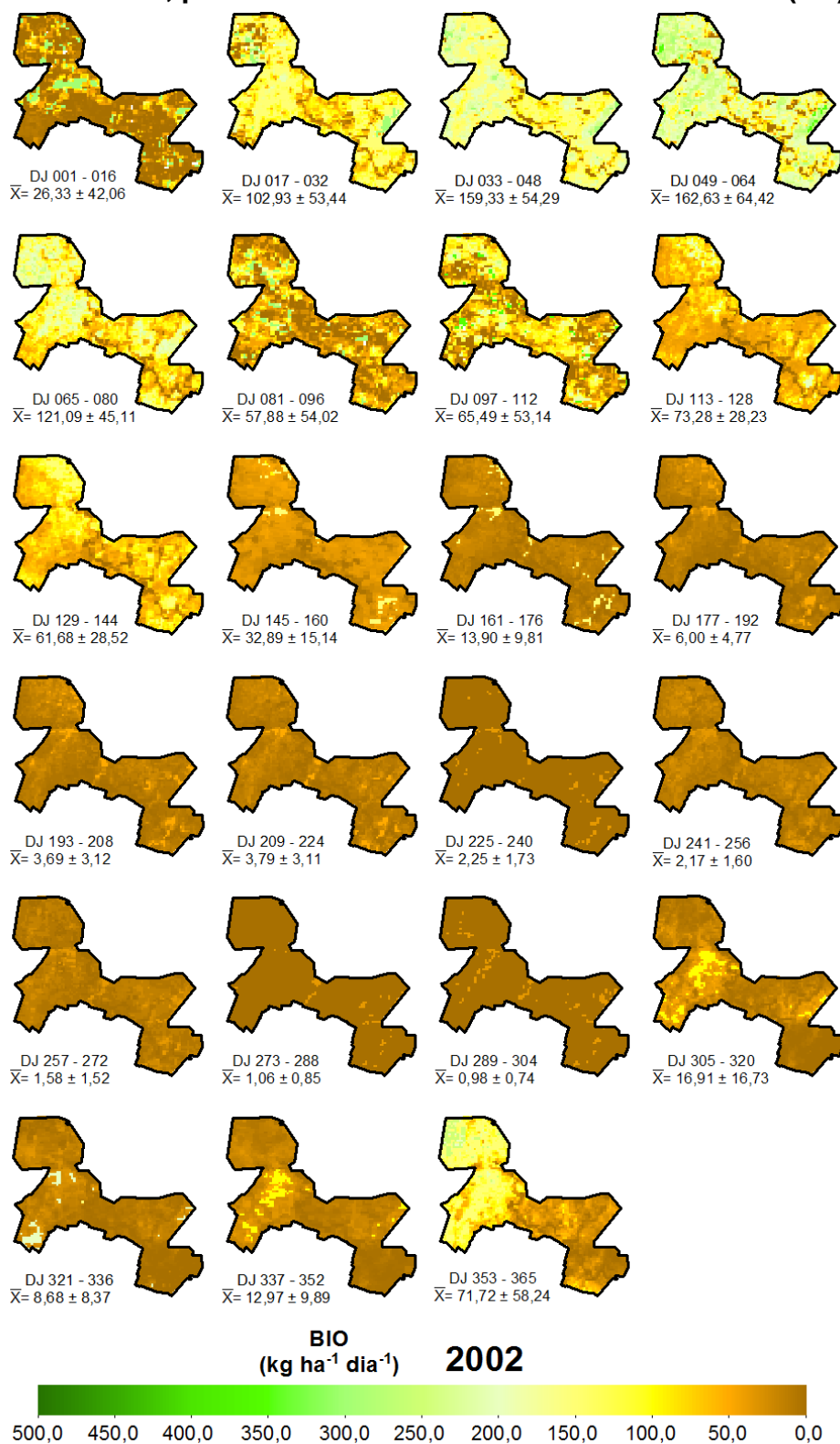


Figura 42. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média \pm Desvio Padrão (DP).

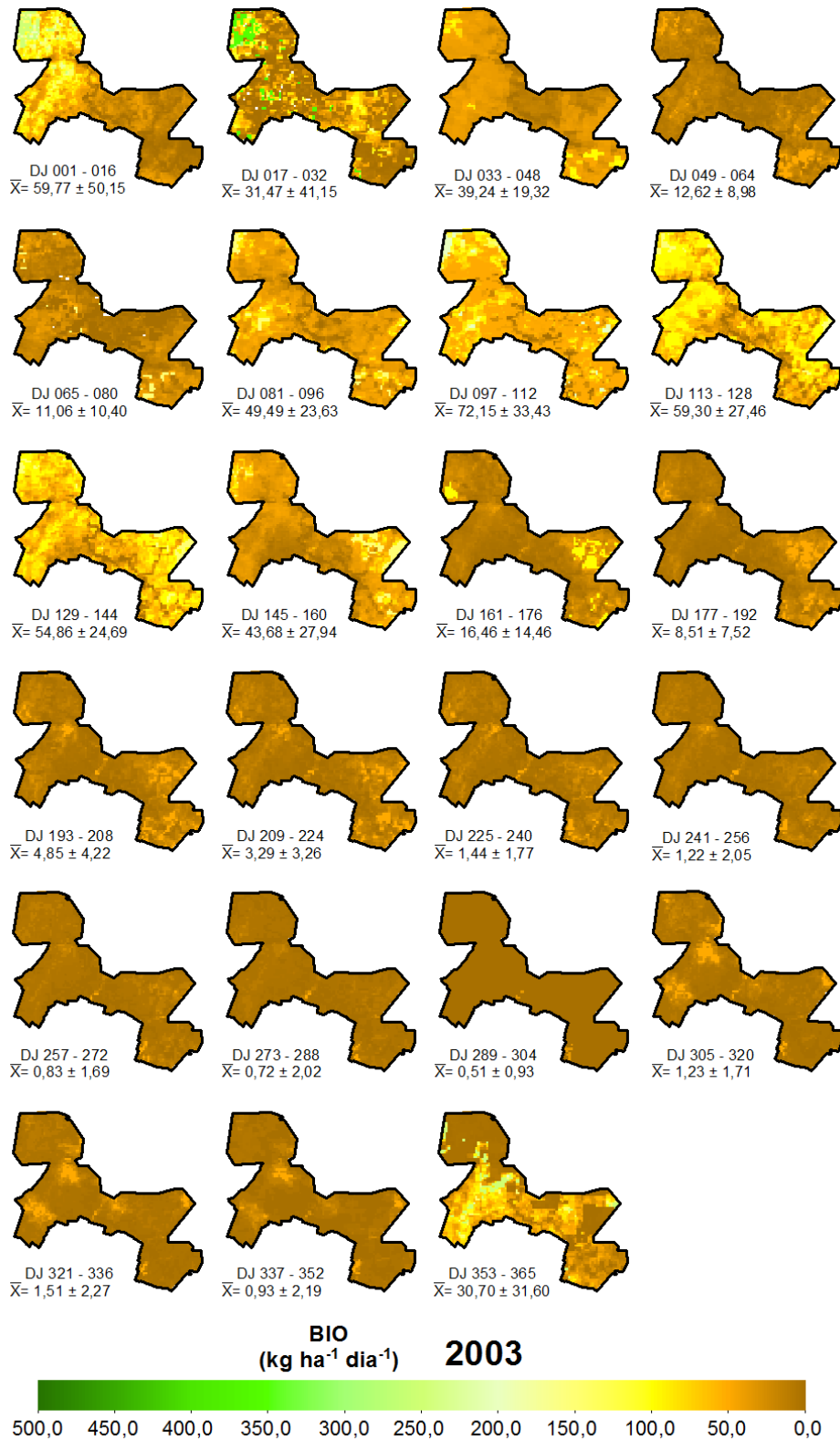


Figura 43. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média \pm Desvio Padrão (DP).

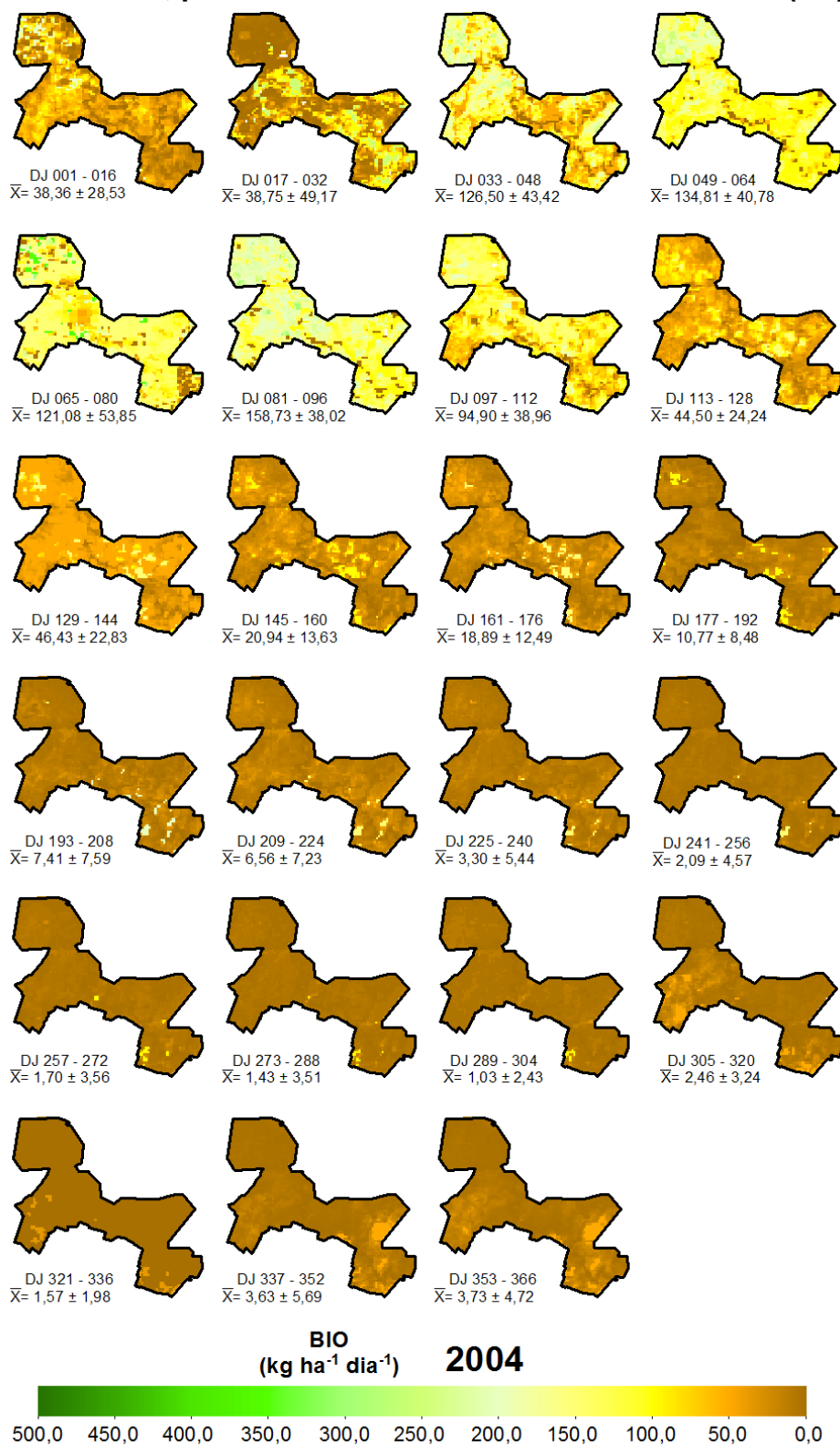


Figura 44. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média \pm Desvio Padrão (DP).

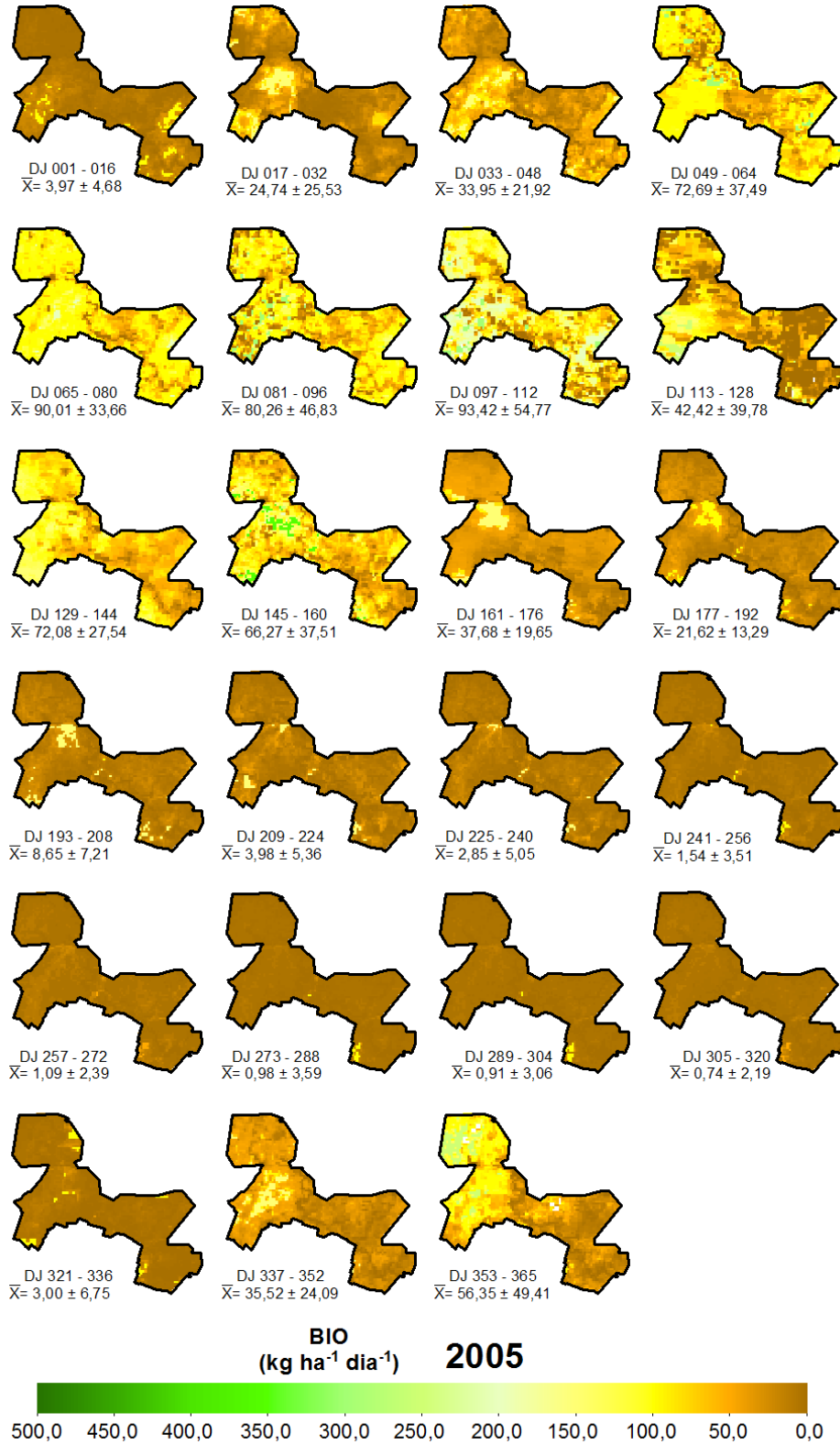


Figura 45. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média \pm Desvio Padrão (DP).

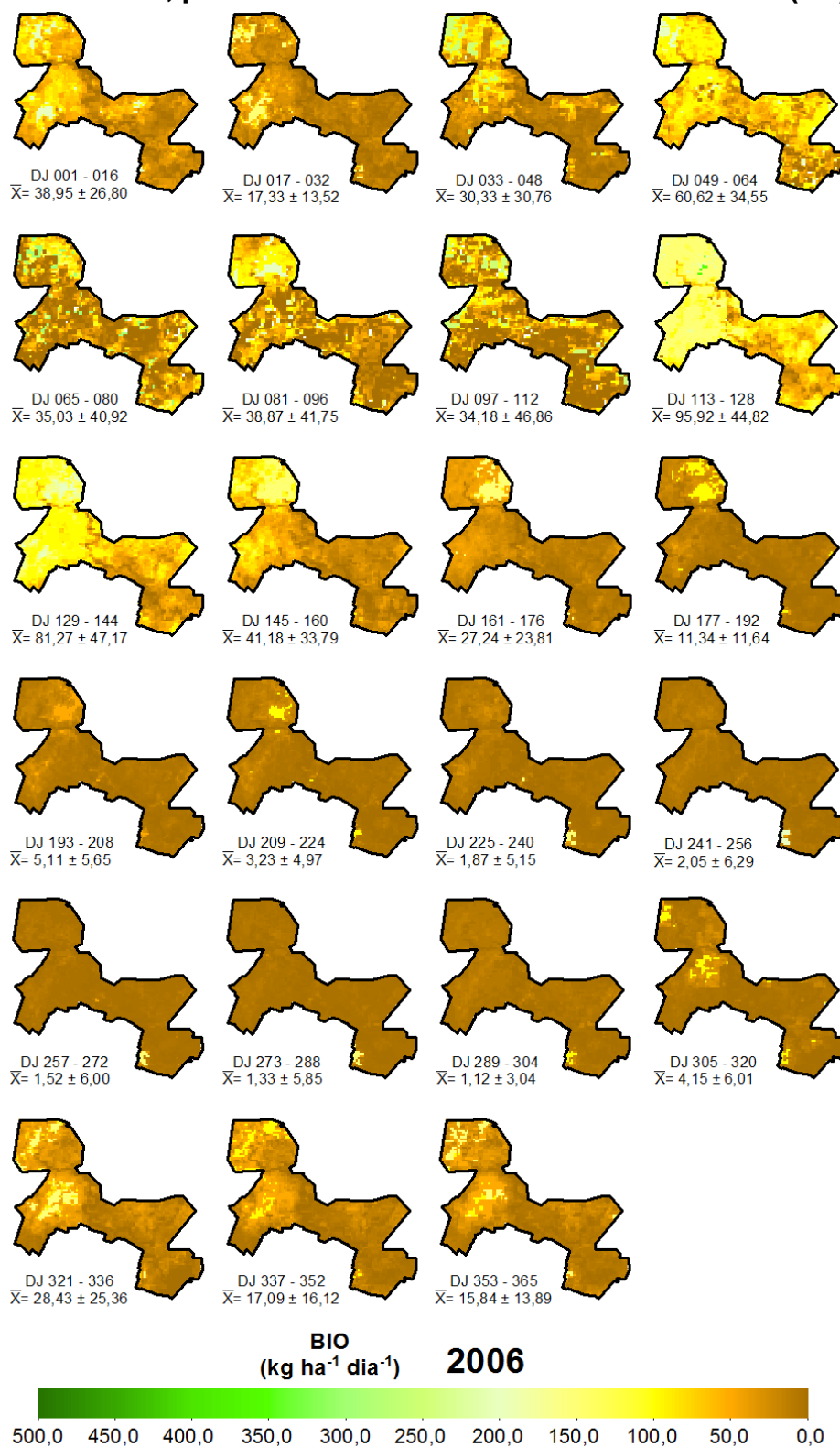


Figura 46. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média \pm Desvio Padrão (DP).

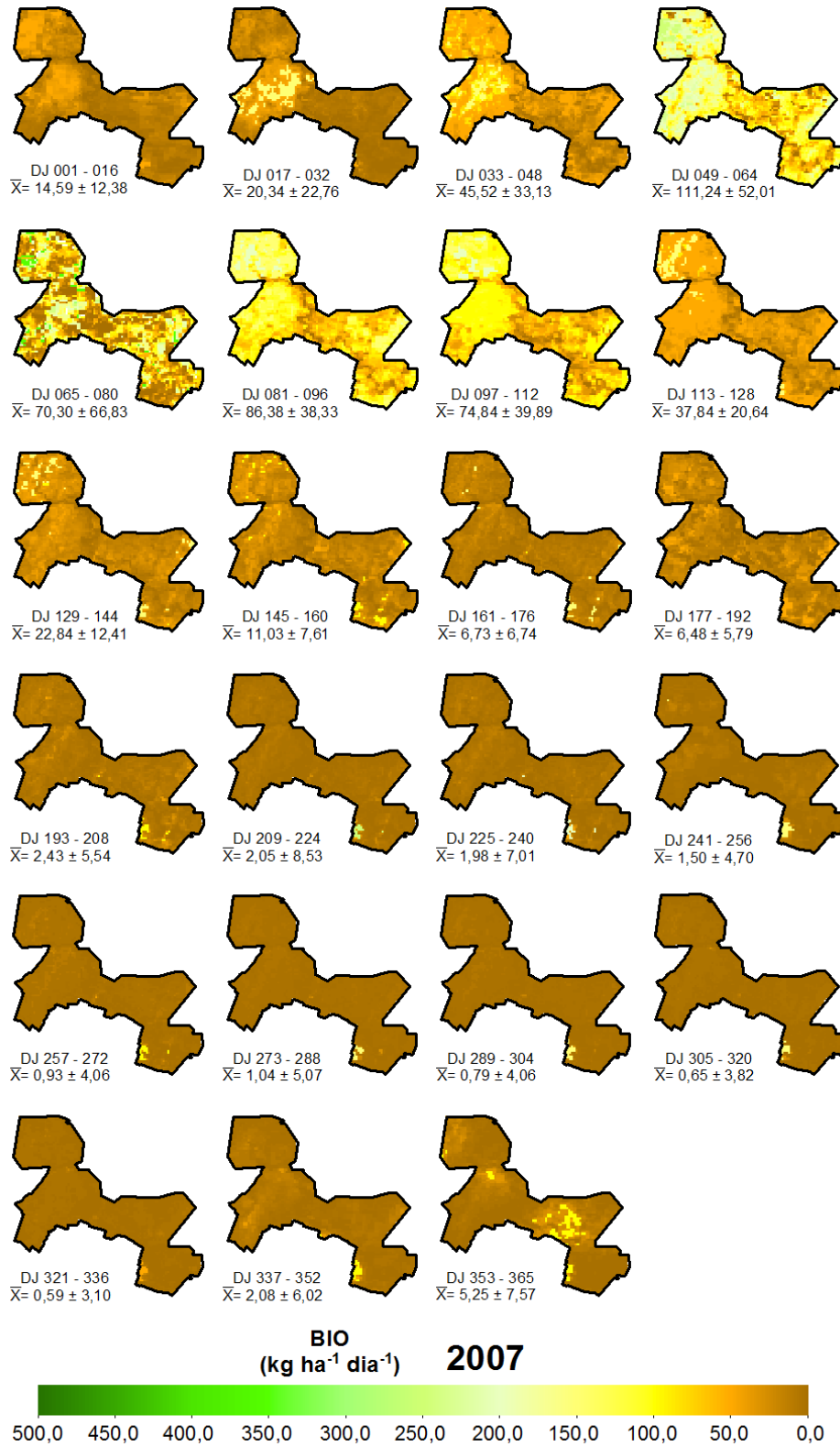


Figura 47. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média \pm Desvio Padrão (DP).

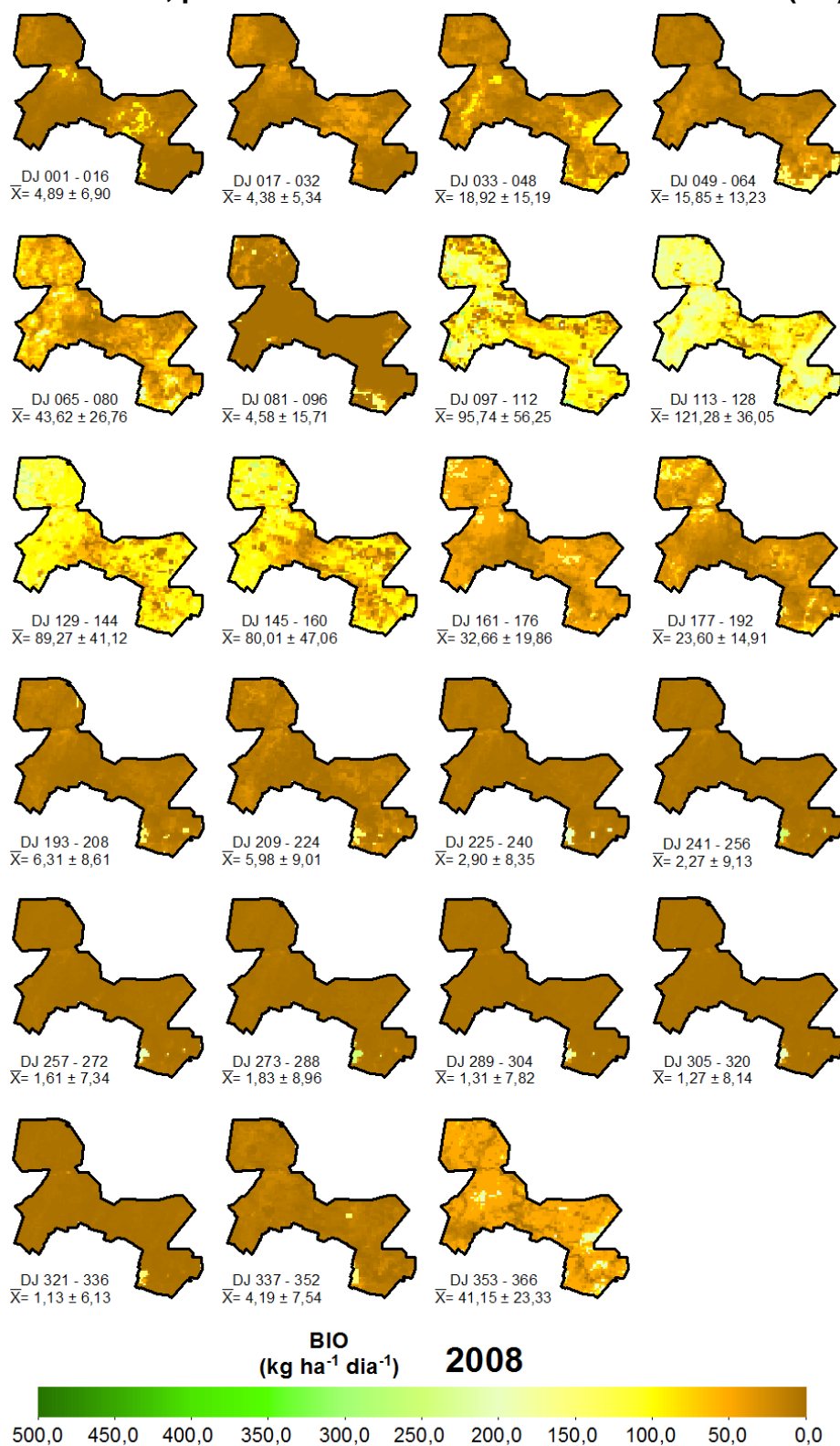


Figura 48. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média \pm Desvio Padrão (DP).

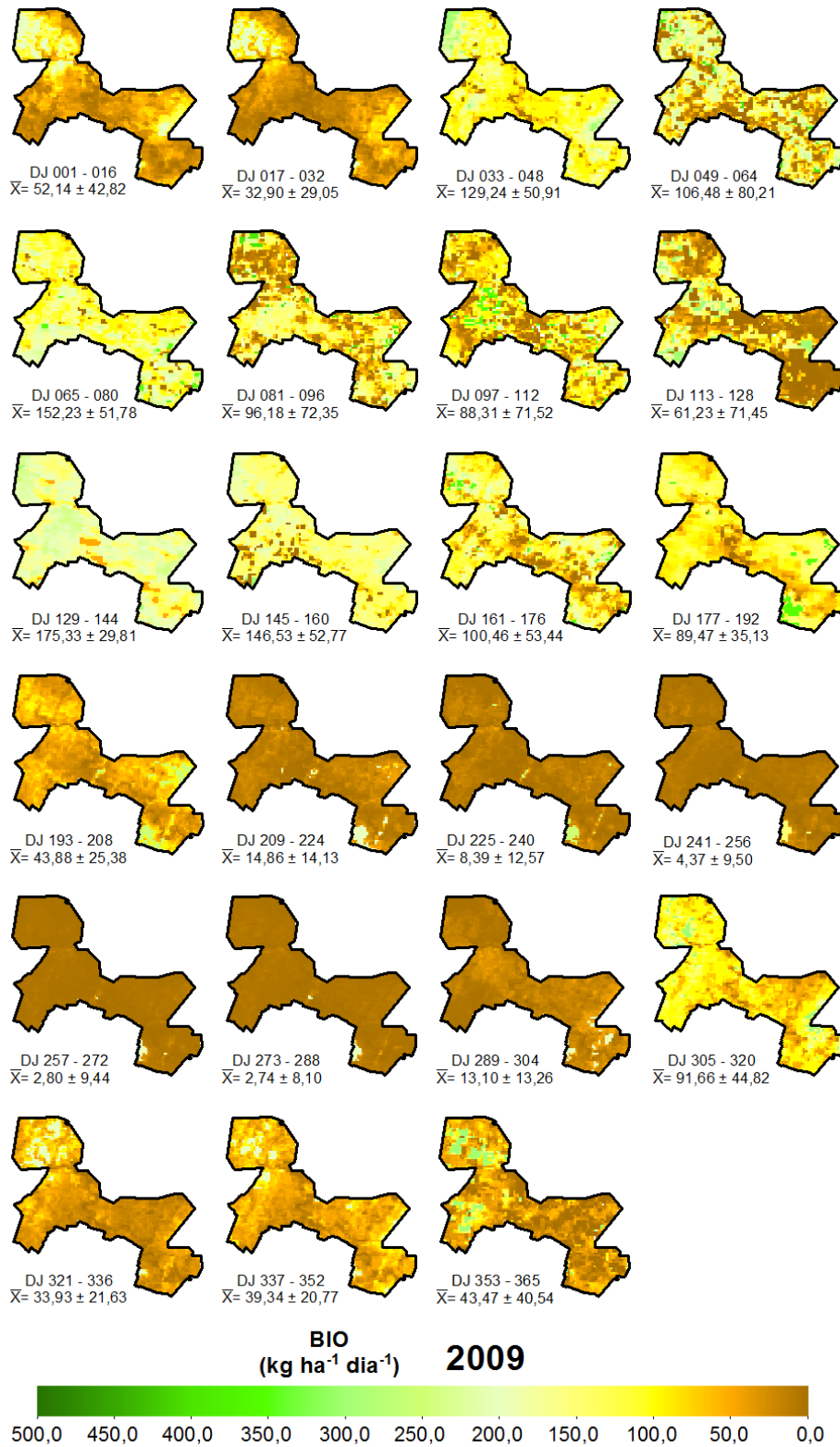


Figura 49. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média \pm Desvio Padrão (DP).

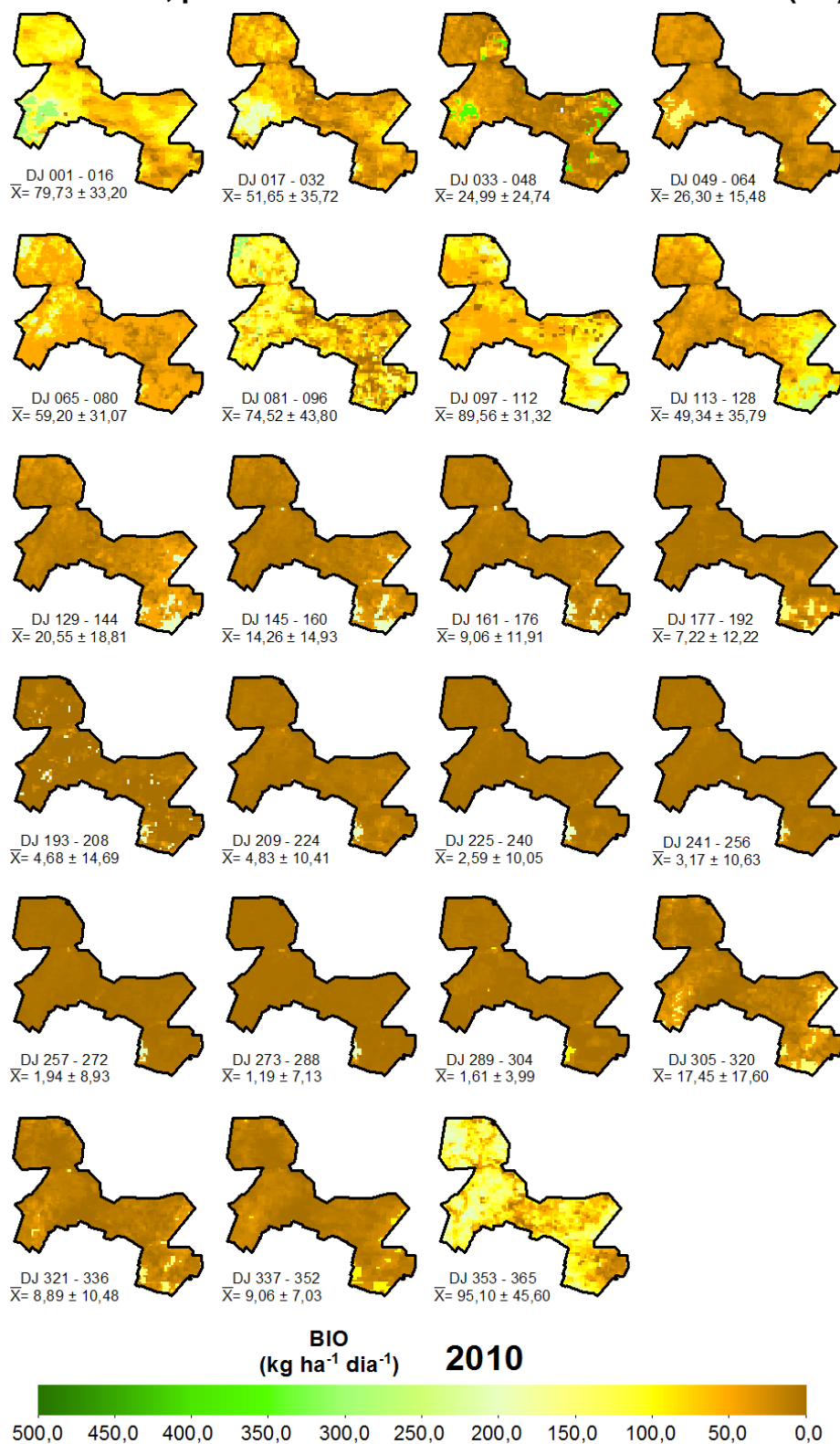


Figura 50. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média \pm Desvio Padrão (DP).

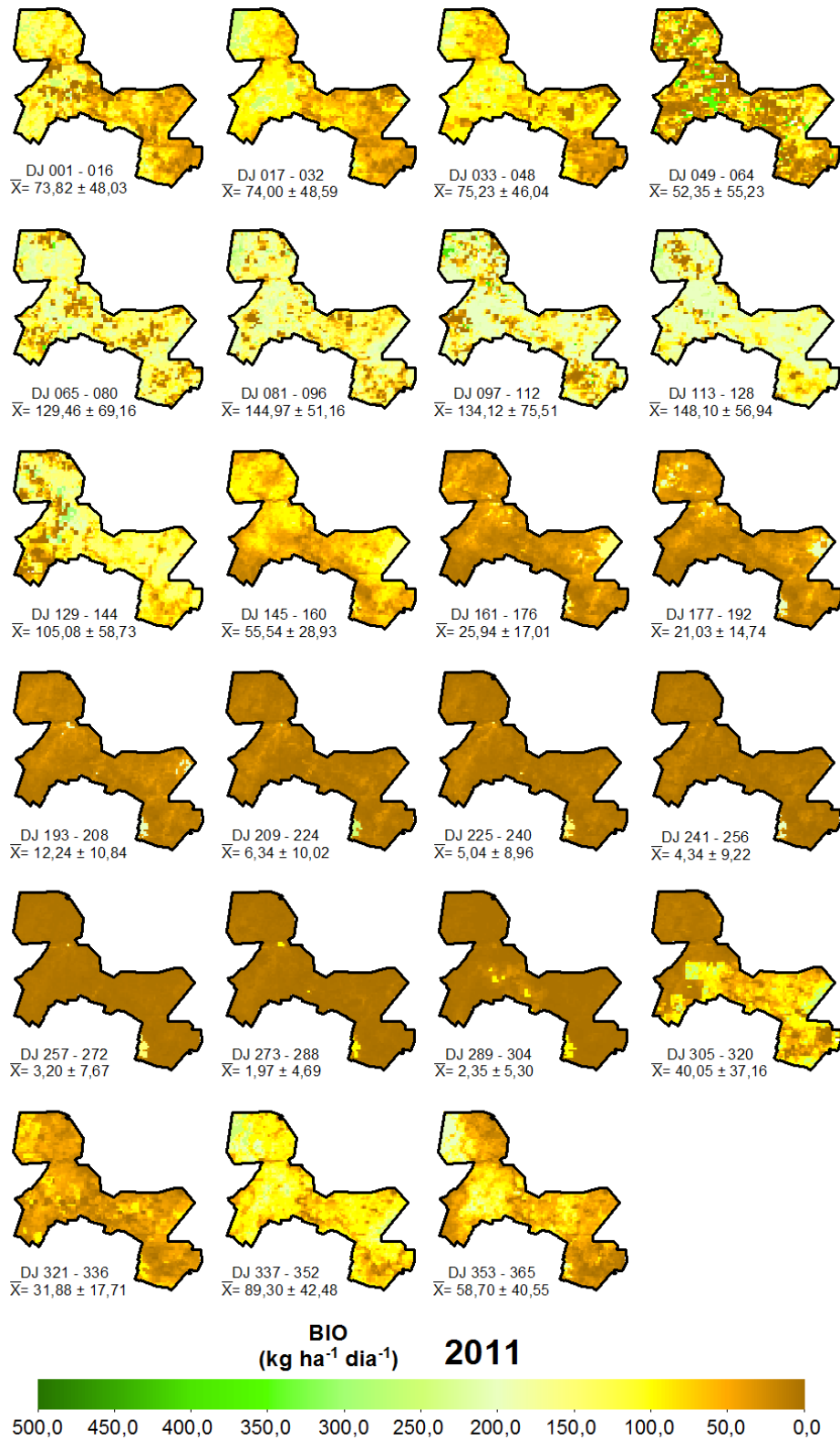


Figura 51. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média \pm Desvio Padrão (DP).

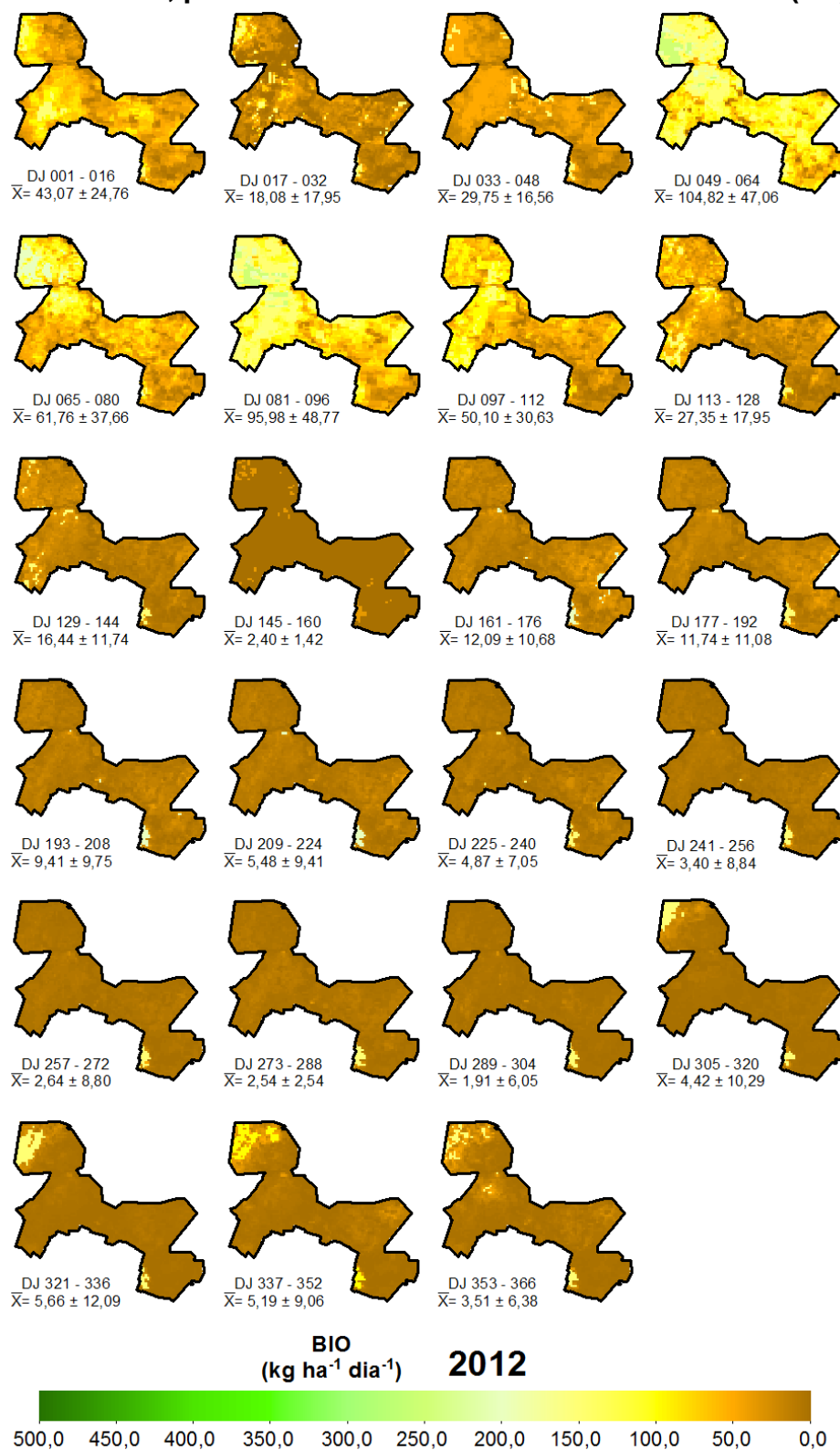


Figura 52. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média \pm Desvio Padrão (DP).

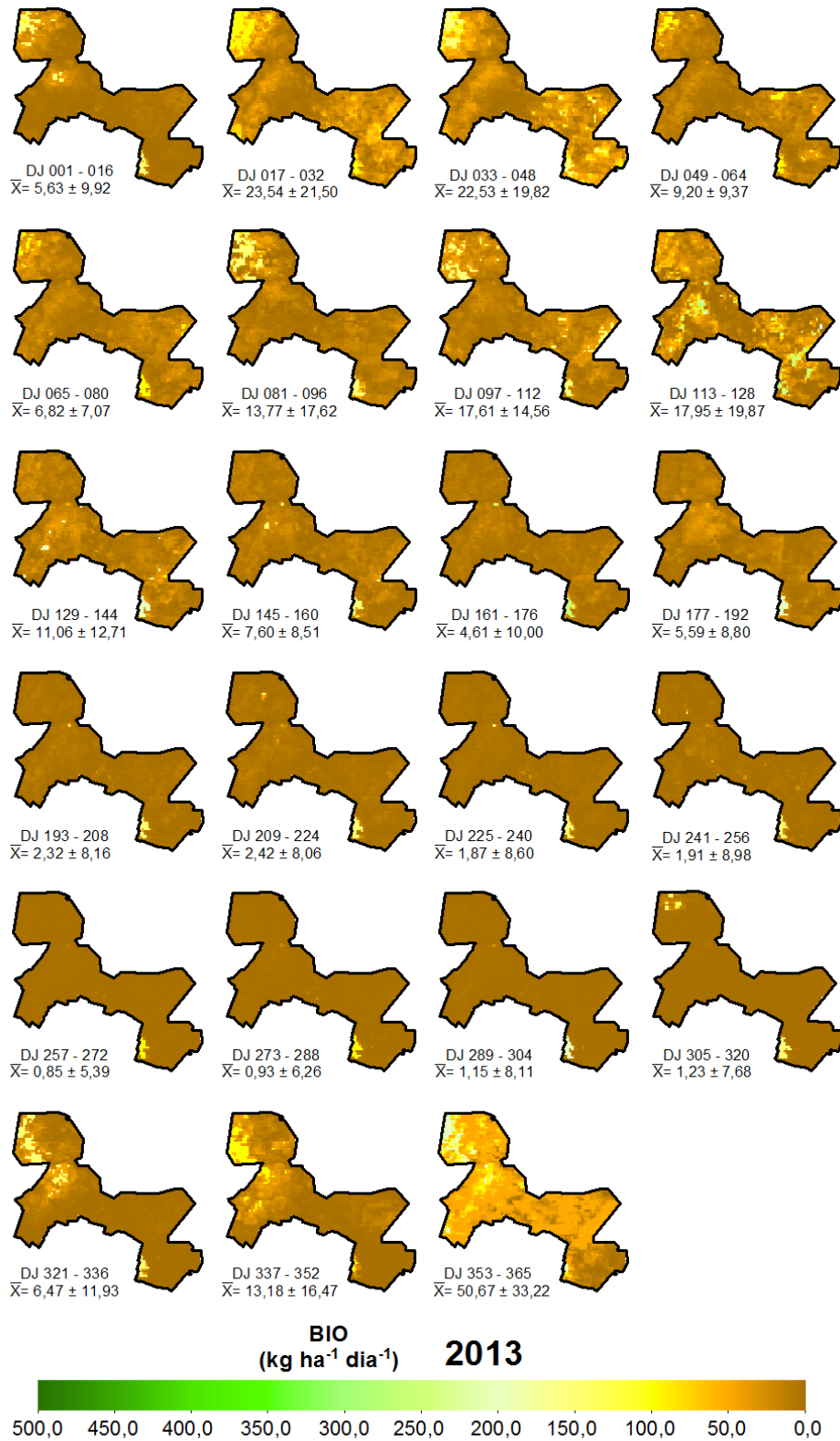


Figura 53. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média \pm Desvio Padrão (DP).

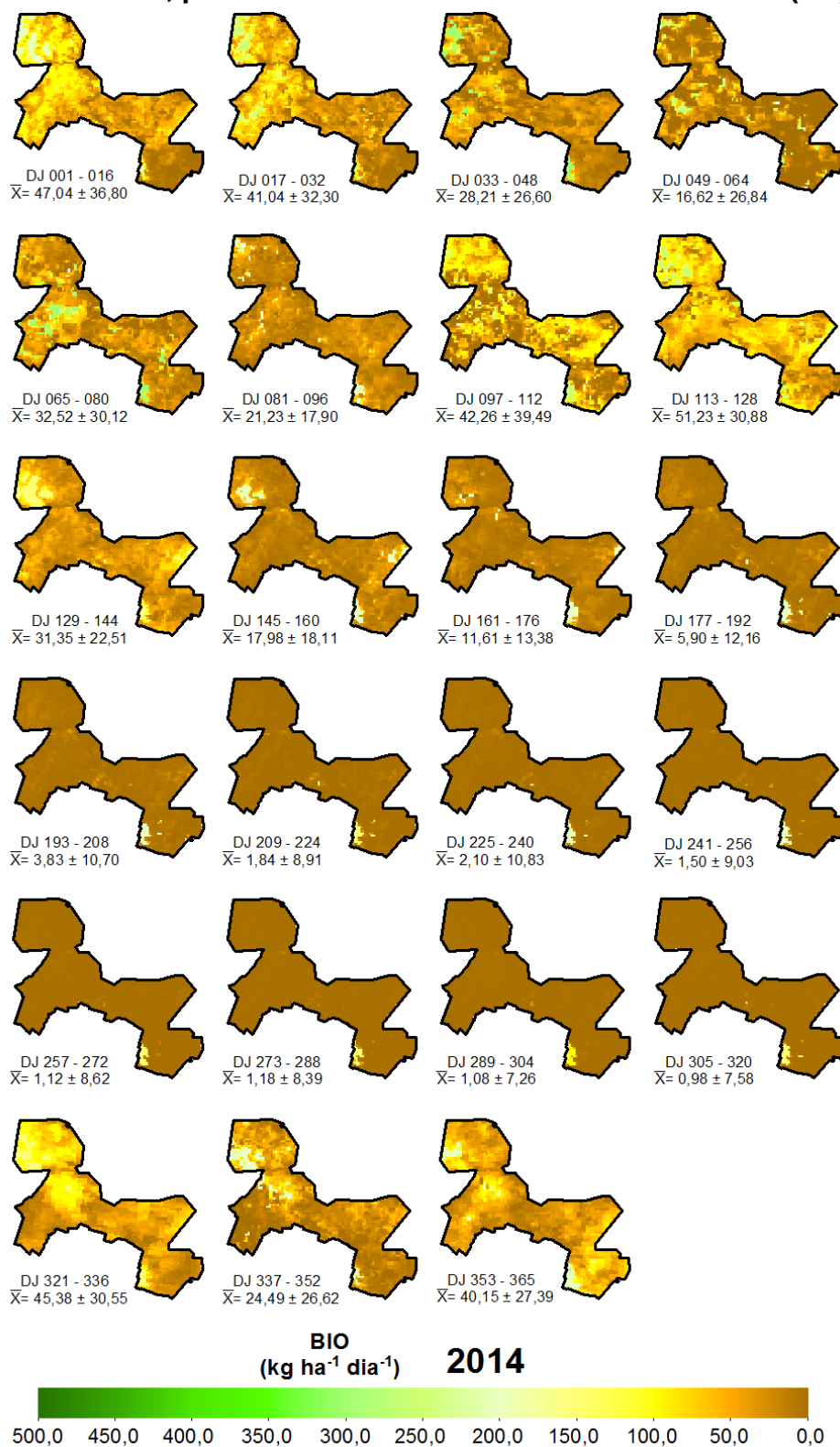
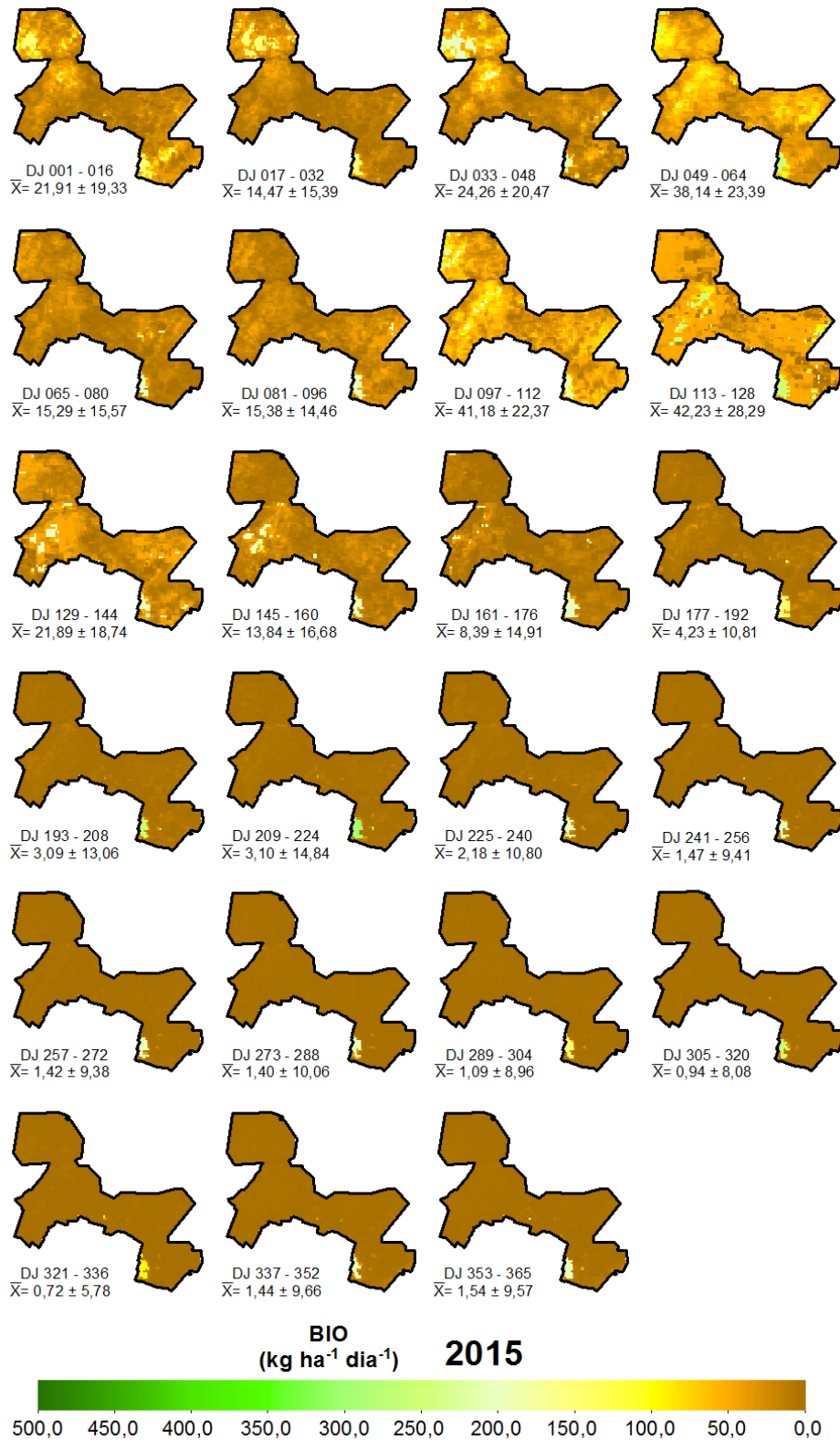


Figura 54. Mapas de biomassa (BIO) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média \pm Desvio Padrão (DP).



Com base nas Figuras 39 a 54 verifica-se que as maiores médias de BIO foram encontradas na estação de chuvas, porém, o valor máximo de BIO foi computado no início da estação de chuvas, registrando $440,27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no intervalo de 16 dias nos DJ entre 321 a 336 do ano de 2000 (Figura 39), os quais representam o mês de novembro. Na estação de chuvas ocorreram picos de BIO provenientes do acumulado considerável de P (Tabela 4), alcançando o valor máximo de $431,73 \text{ kg há}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos DJ entre 065 a 080 do ano de 2001, correspondente ao mês de março, de modo que no decorrer desta estação os picos reduziram. Entretanto, alguns anos foram marcados com baixos valores de BIO na estação de chuvas, atingindo resultados próximos/iguais a zero, devido a fenômenos naturais que ocasionaram baixos índices de P e de ET_r nos anos anteriores, como verificado nos anos de 2000, 2003, 2005, 2008 e 2013 (Figuras 39, 42, 44, 47 e 52, respectivamente).

No decorrer dos anos estudados, os valores de BIO foram relevantes nas áreas onde se concentram a maior parte da VN densa, entretanto, nas regiões em que apresentaram solo exposto e VN raleada, os resultados de BIO encontraram-se próximos ou iguais a zero. No início da estação de chuvas os resultados de BIO foram elevados em sua grande maioria, onde ocorreram picos provenientes do acumulado considerável de P nos dias anteriores e médias elevadas de ET_r , alcançando valor igual a $440,27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos DJ entre 321 a 336 do ano de 2000 (Figura 39), como mencionado anteriormente. Contudo, alguns anos registraram resultados abaixo quando comparados aos demais anos estudados, atingindo valores próximos ou iguais a zero em grande parte da estação, como mostrado nos anos de 2001, 2003, 2004, 2007, 2012 e 2015 (Figuras 40, 42, 43, 46, 51 e 54, respectivamente), estimulados por fenômenos naturais.

No final da estação de chuvas os resultados de BIO apresentaram-se relevantes, reflexo do acumulado de P na estação anterior e elevados índices de ET_r , de modo que houve uma redução dos seus resultados no decorrer da estação, caracterizando a dispersão das nuvens e diminuição da umidade do solo. Em alguns anos este período apresentou resultados incomuns, alcançado valores de BIO acima dos resultados correspondentes para este período na região, como foi o ocorrido nos anos de 2005, 2008, 2009 e 2011 (Figuras 44, 47, 48 e 50, respectivamente), proveniente da delonga de P na estação de chuvas que proporcionou a elevação

dos resultados de ET_r . Em contrapartida, outros anos apresentaram resultados abaixo do normal climatológico em virtude do baixo acumulado de P nos meses anteriores, como apresentado nos anos de 2007, 2012, 2013 e 2015 (Figuras 46, 51, 52 e 54, respectivamente).

Em referência a estação seca, foram encontrados resultados próximos ou iguais a zero em grande parte dos anos estudados, principalmente nos DJ referente aos meses de setembro e outubro. Contudo, em meio a este período, houve pontos nos mapas em que a BIO é superior à média diária, onde encontra-se áreas com AI e VN mais densa, obtendo valor máximo de $242,25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos DJ entre 241 a 256 do mês de agosto de 2008, compreendendo a concentração de umidade retida na zona radicular das plantas.

A média geral de BIO entre os anos de 2000 a 2015 no Perímetro Irrigado Pontal Sul foi de $30,73 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A menor média de BIO foi computada no ano de 2013 com valor igual a $9,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, enquanto que a maior média registrada foi encontrada ano de 2009 com valor igual a $66,48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Nas Figuras 55 a 70 estão retratadas em separado as médias e os DP para as áreas de AI e a VN.

Figura 55. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.

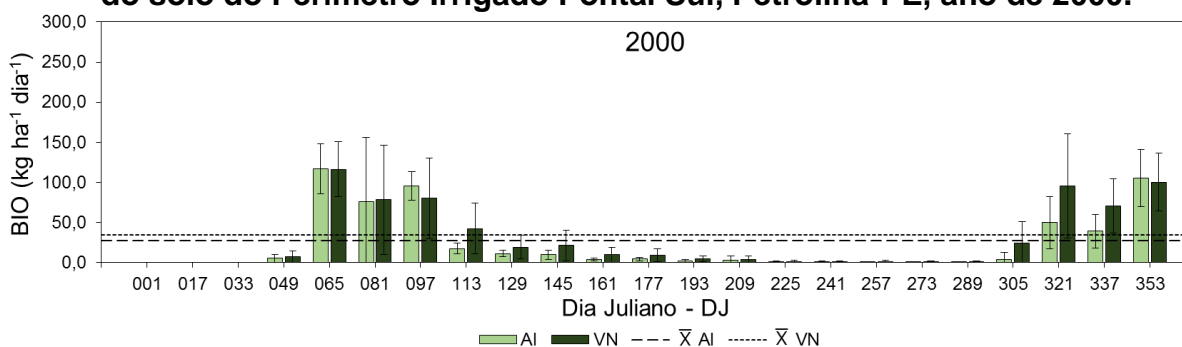


Figura 56. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.

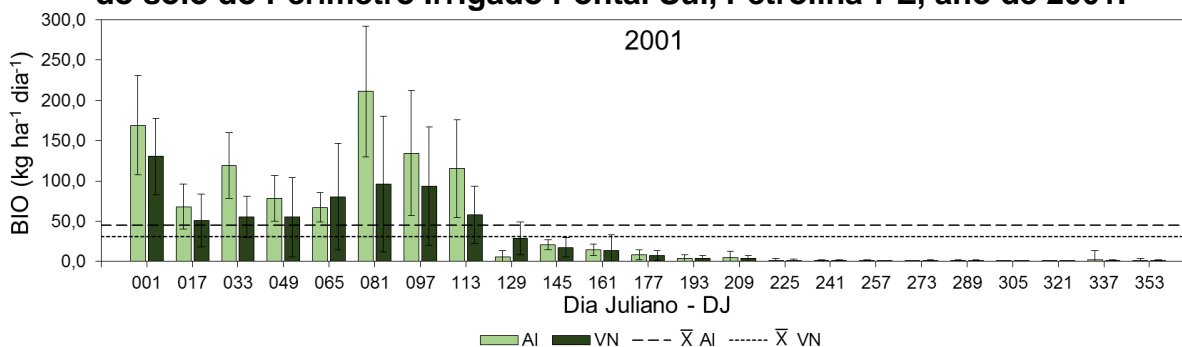


Figura 57. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.

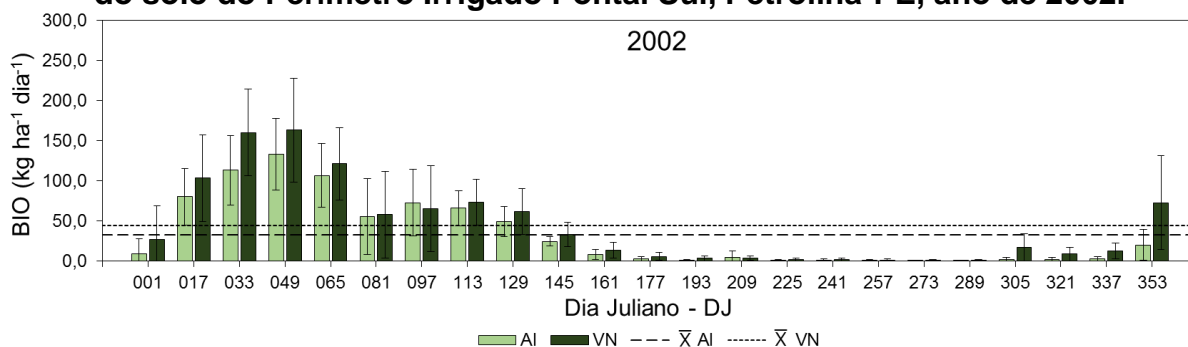


Figura 58. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.

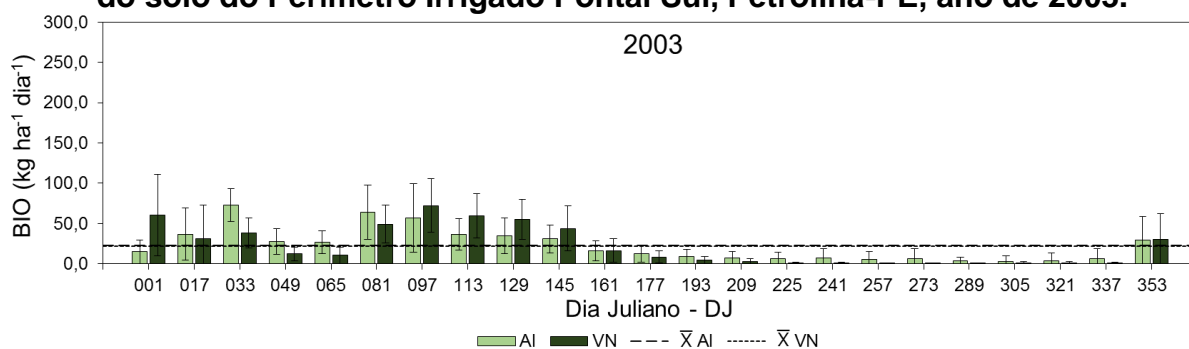


Figura 59. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.

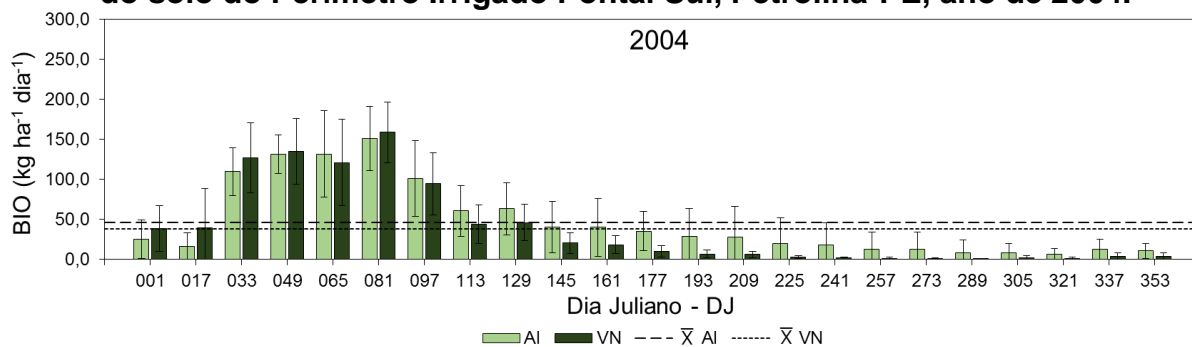


Figura 60. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2005.

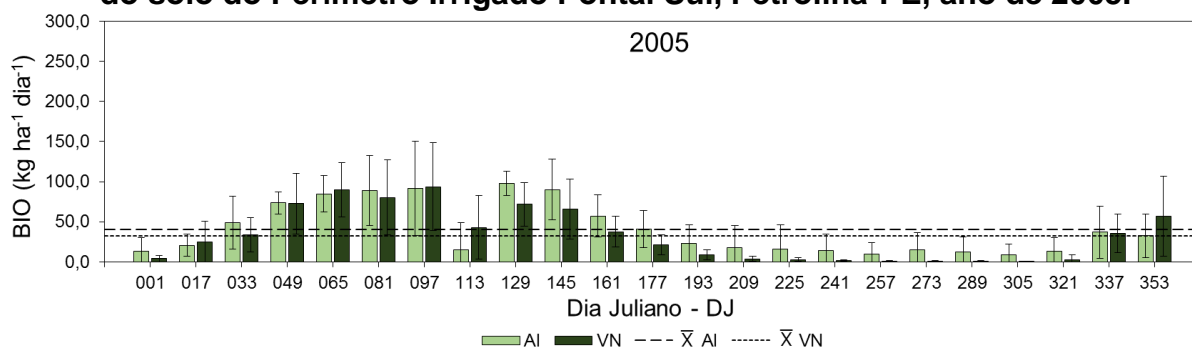


Figura 61. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.

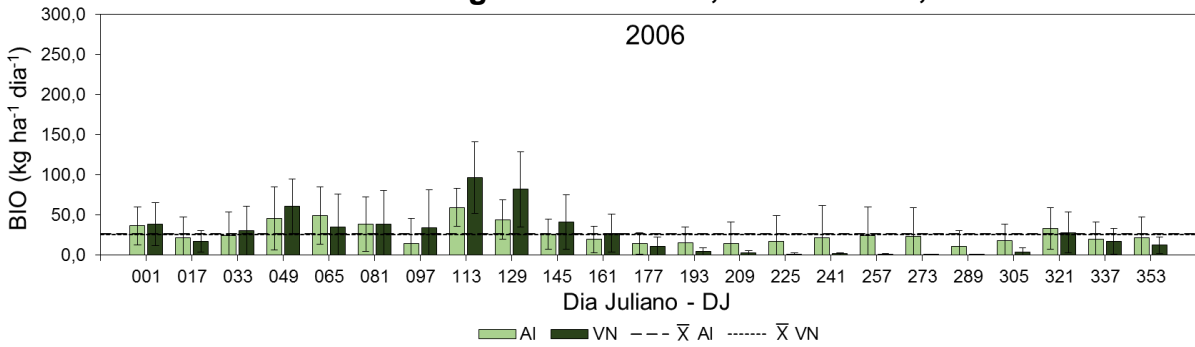


Figura 62. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.

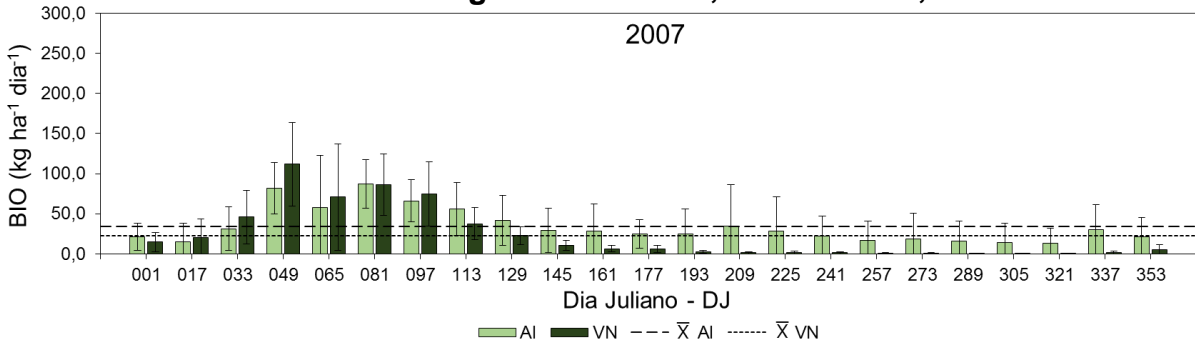


Figura 63. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.

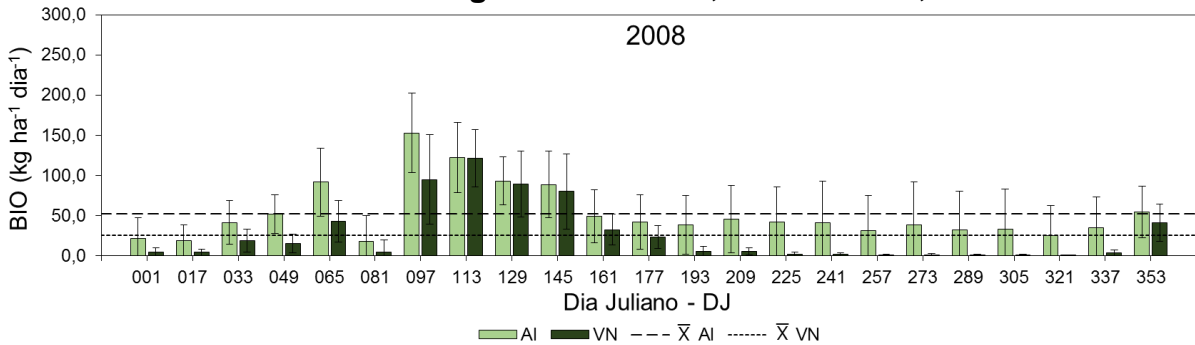


Figura 64. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.

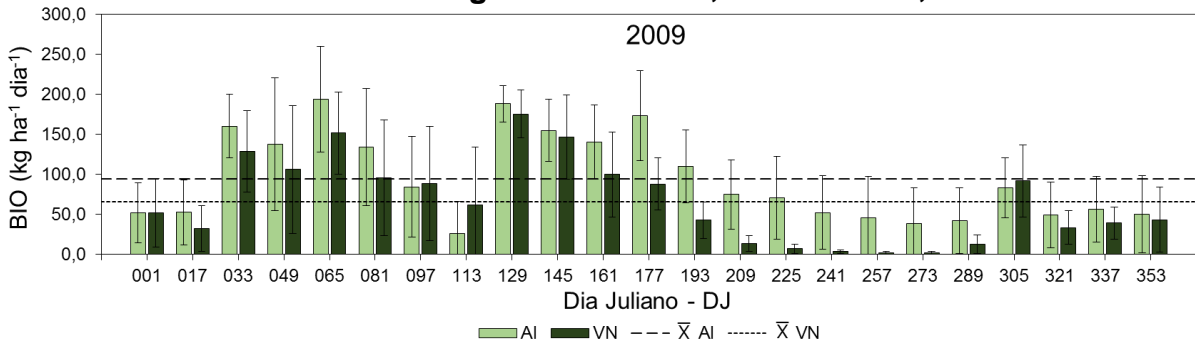


Figura 65. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010

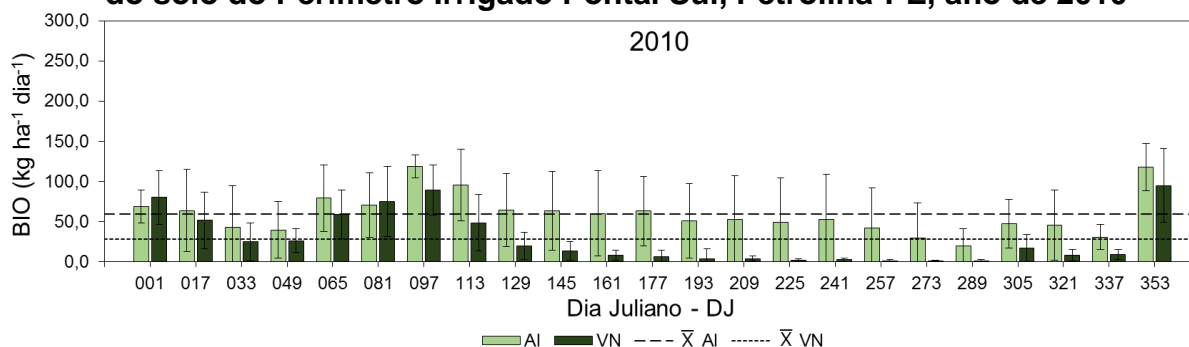


Figura 66. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.

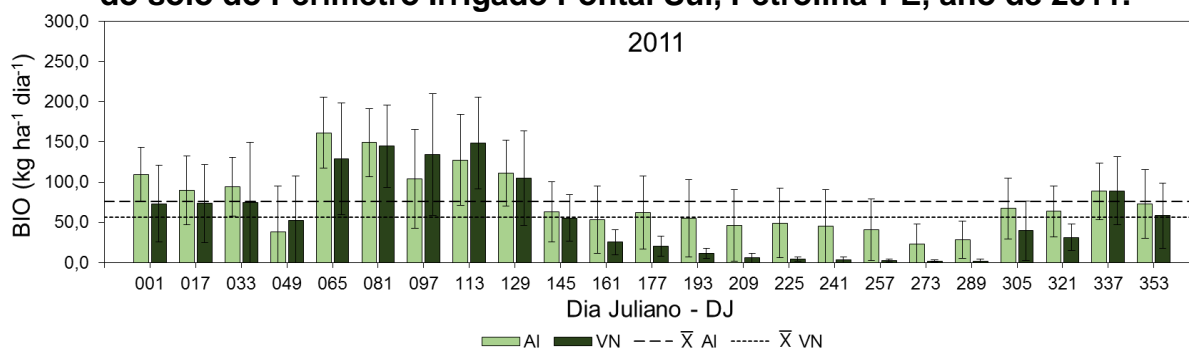


Figura 67. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.

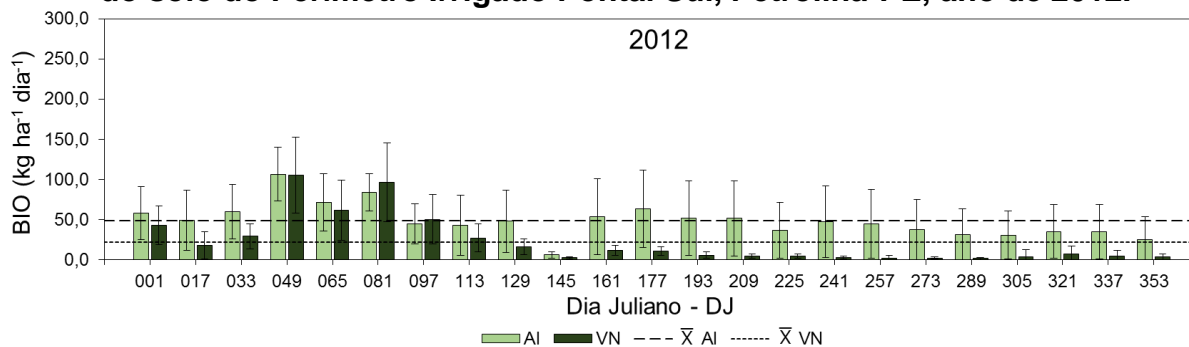


Figura 68. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.

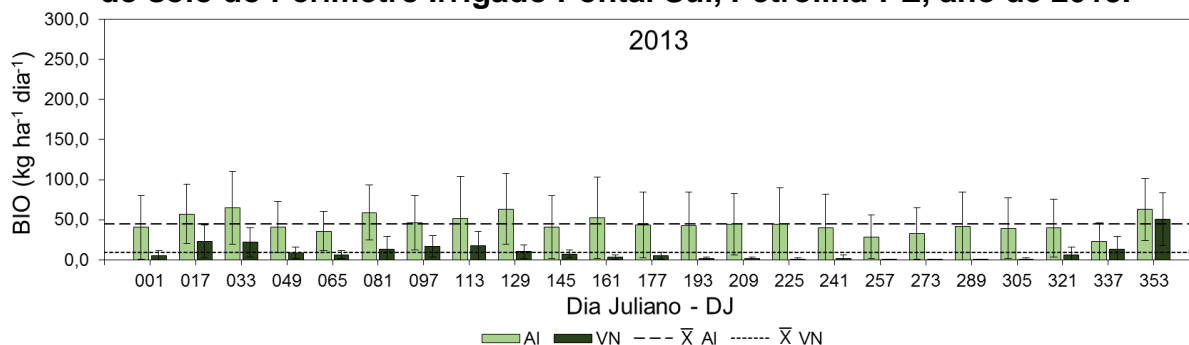


Figura 69. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.

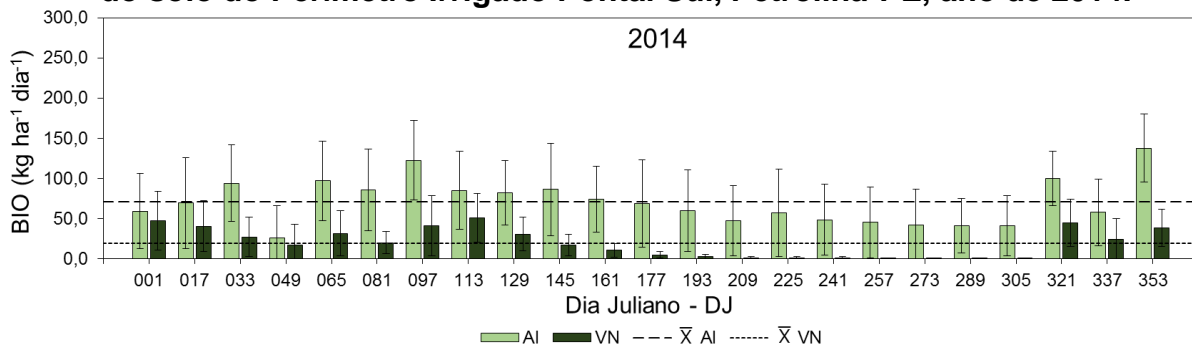
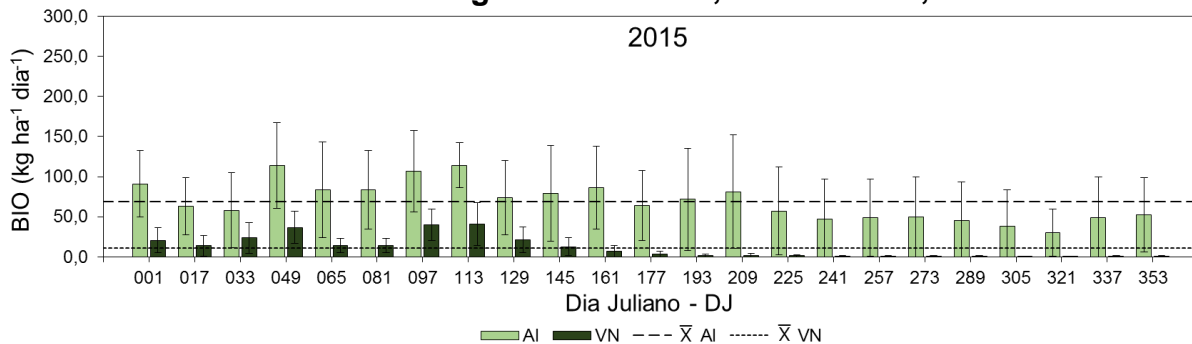


Figura 70. Médias e Desvio Padrão de biomassa (BIO) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.



Analisando separadamente as áreas de AI e VN nas Figuras 55 a 70, verifica-se que as médias mais elevadas de BIO estão nas áreas de AI, entre os anos de 2005 a 2006, principalmente na estação seca, onde a umidade do solo é menor na VN, diferentemente dos anos entre 2000 a 2004 onde a AI não era presente. Nas áreas onde solo é exposto e em áreas de VN raleada, os resultados de BIO são expressivos apenas na estação de chuvas, devido ao alto acumulado de P e de ET_0 (Tabela 4), e a elevadas médias de ET_r , aumentando assim os resultados de BIO neste período.

Em relação às áreas de VN, estas apresentaram média geral de $30,50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A menor média anual de BIO apresentada foi de $9,27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no ano de 2013 (Figura 68), e a maior média foi computada no ano de 2009 (Figura 64), com $65,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. No período de chuvas, as médias diárias de BIO estiveram acima de média anual nos meses de janeiro e março na maior parte dos anos estudados, proporcionado pelo acumulado de P nos meses anteriores e pelas médias significativas de ET_r . Para a estação seca, as médias diárias de BIO estiveram abaixo da média anual; no entanto, houve pequenas variações na extensão do

perímetro relacionado ao acúmulo de umidade do solo, especialmente nas áreas com VN densa, que restringem a ação dos processos climatológicos ao longo do ano. A menor média registrada foi de $0,15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos DJ entre 321 a 336 do mês de novembro de 2015, proveniente da ação de fenômenos naturais que restringiram o surgimento de nuvens sobre a região nesse ano, diminuindo assim o acumulado de P. Já a maior média foi de $174,10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nos DJ entre 129 a 144 no mês de maio de 2009, devido ao acumulado considerável de chuvas neste período.

Na área de AI, a média geral foi de $55,91 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A menor média anual foi registrada no ano de 2006 com valor igual a $26,88 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, e a maior média ocorreu no ano de 2009 com valor igual a $94,27 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Em grande parte dos anos estudados, os resultados de BIO para as áreas de AI estiveram abaixo da média anual, destacando-se a estação seca. No período de chuvas a maioria das médias diárias de BIO foram elevadas, devido ao acumulado de P associado a aplicação de água via irrigação, causando uma oscilação maior em suas médias, tendo como exemplo os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, correspondendo a estação de chuvas, com estimativas acima da média anual na maioria dos anos estudados. Na estação seca, o acumulado de P foi inferior, porém as médias diárias de BIO foram mais elevadas, quando comparadas as médias de BIO para as áreas de VN, em virtude da maior umidade do solo proporcionada pela irrigação. A menor média diária encontra-se no DJ entre 145 a 160 do mês de maio de 2012, com valor igual a $5,94 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, sendo relacionado a elevadas médias de RG e ao baixo acumulado de P entre estes dias. A maior média de BIO foi encontrada nos DJ entre 065 a 080, referentes ao mês de março de 2009, com valor de $193,60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, influenciado pelo acumulado elevado de P nos dias anteriores e pelas médias significativas de ET_r .

4.5 Produtividade da água (WP)

Nas Figuras 71 a 86 são apresentados os mapas de WP do Perímetro Irrigado Pontal Sul para os anos de 2000 a 2015.

Figura 71. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2000. Média \pm Desvio Padrão (DP).

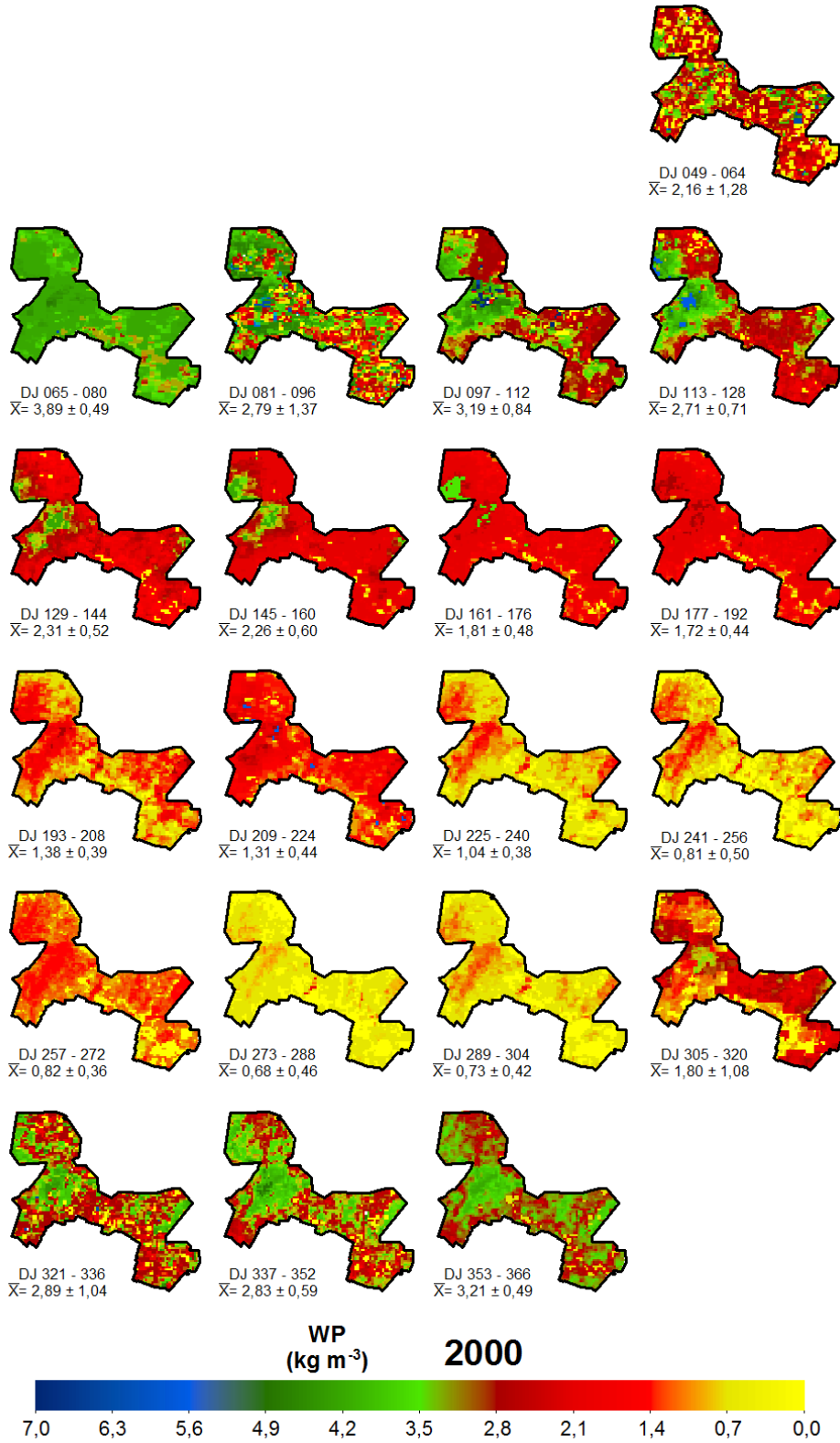


Figura 72. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2001. Média \pm Desvio Padrão (DP).

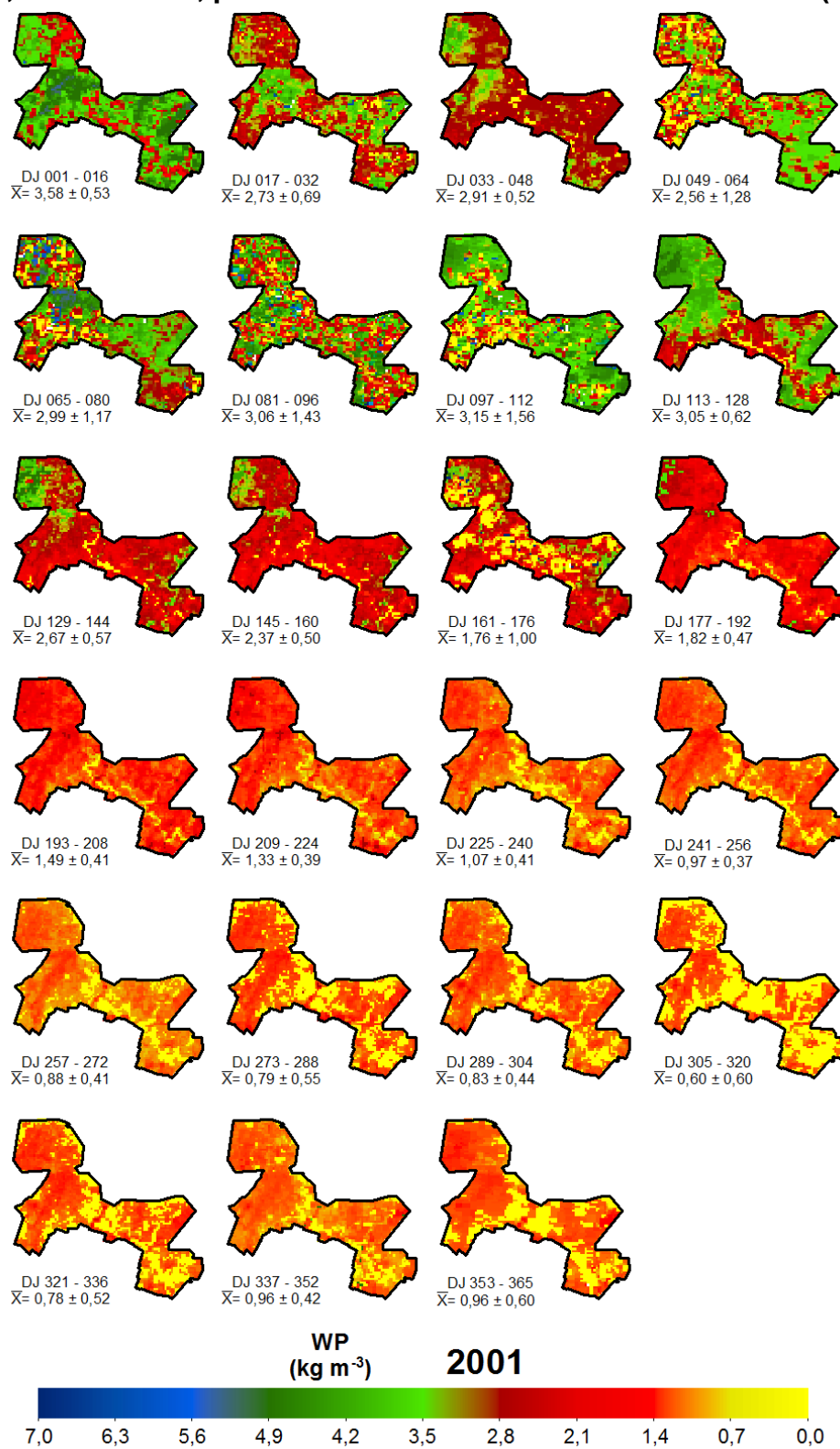


Figura 73. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2002. Média \pm Desvio Padrão (DP).

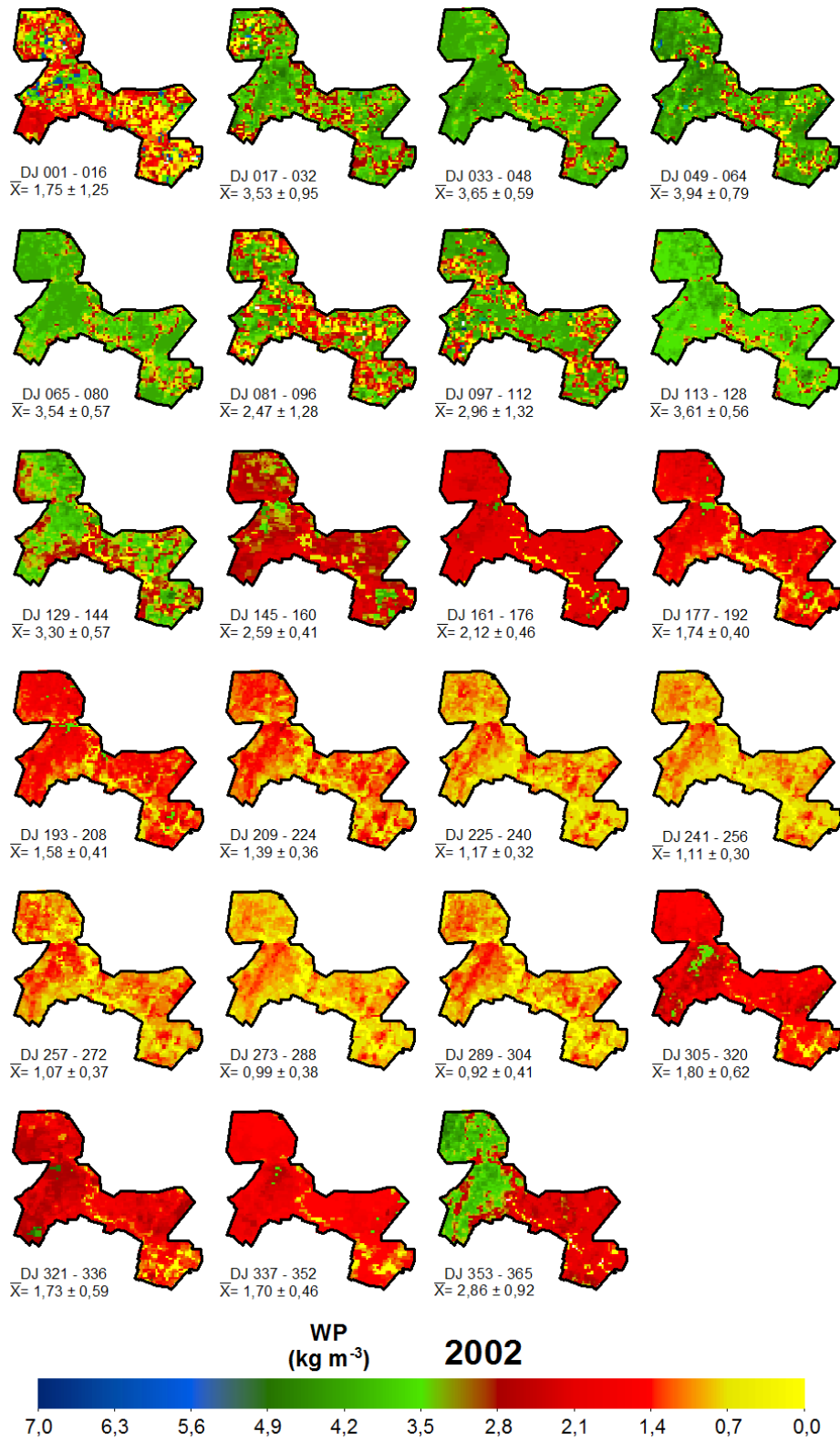


Figura 74. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2003. Média \pm Desvio Padrão (DP).

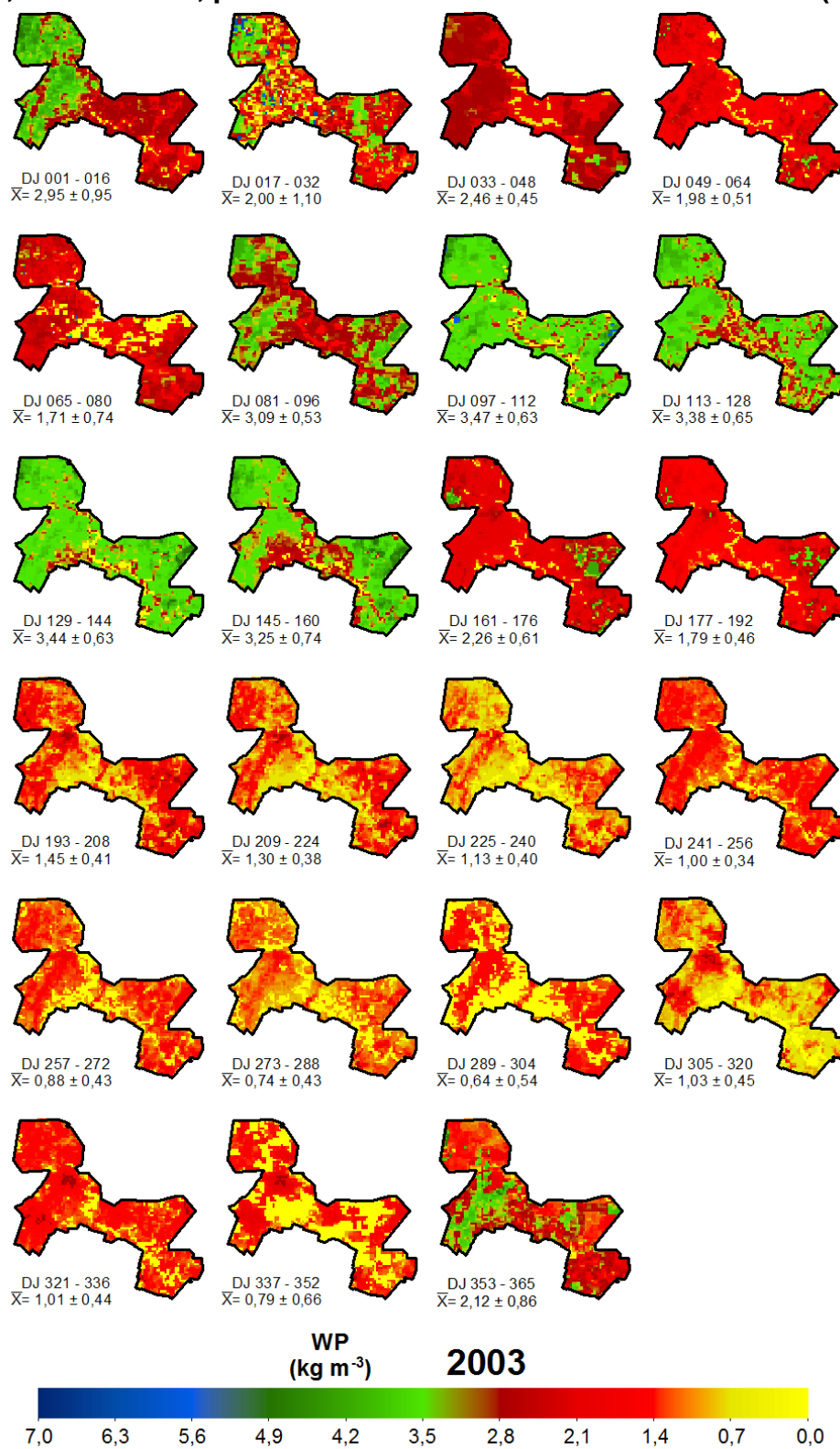


Figura 75. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2004. Média \pm Desvio Padrão (DP).

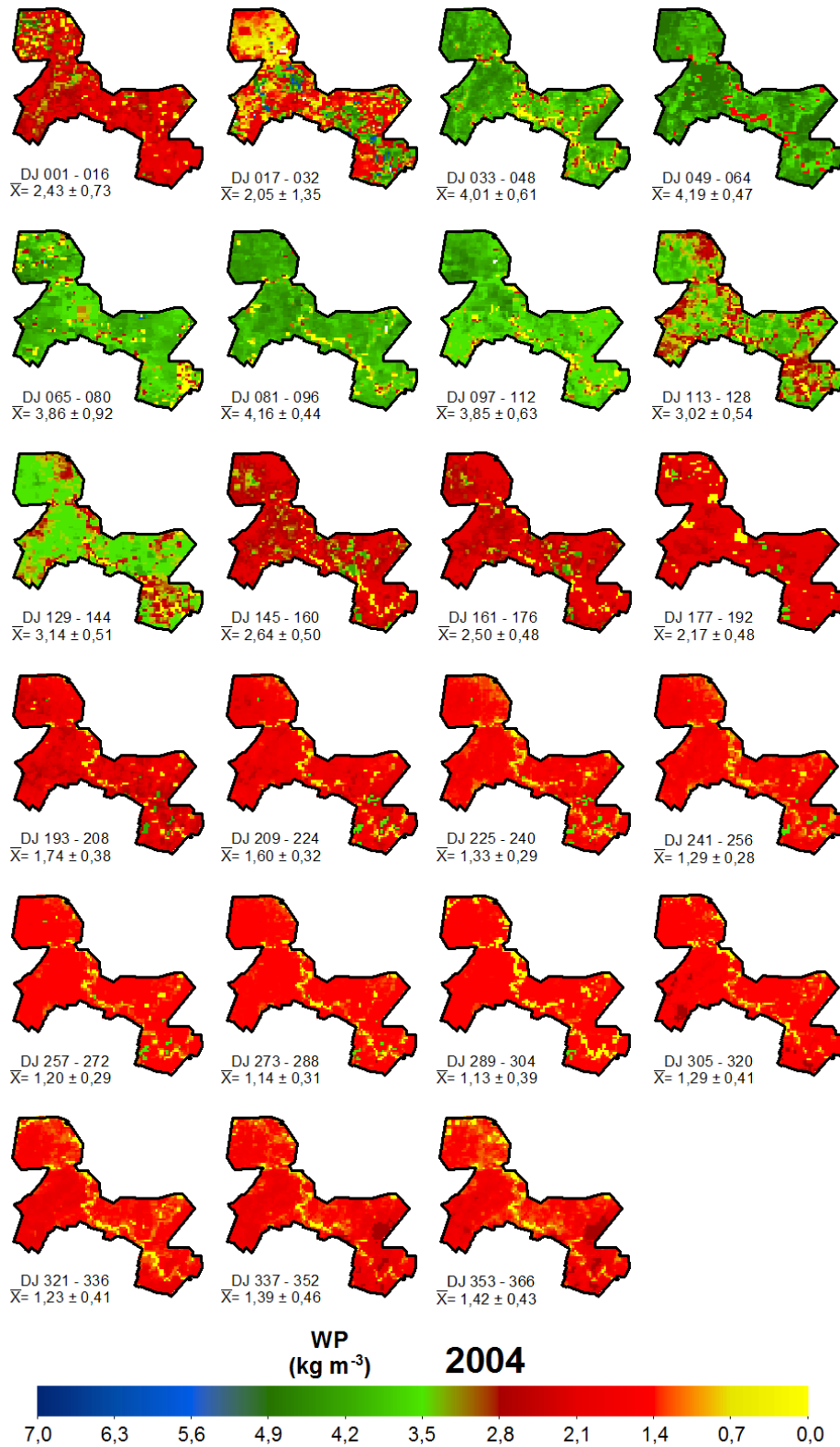


Figura 76. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2005. Média \pm Desvio Padrão (DP).

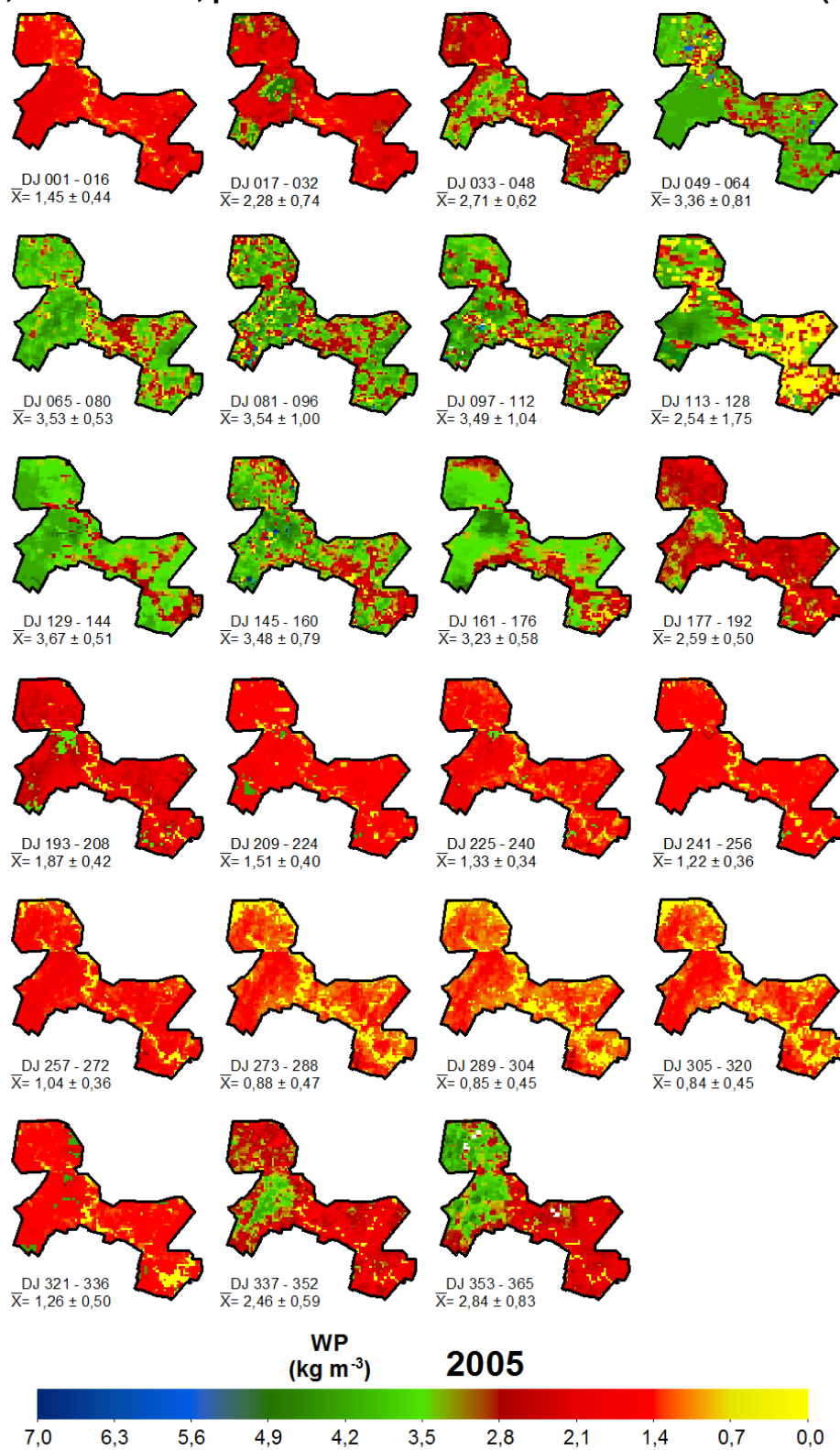


Figura 77. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2006. Média \pm Desvio Padrão (DP).

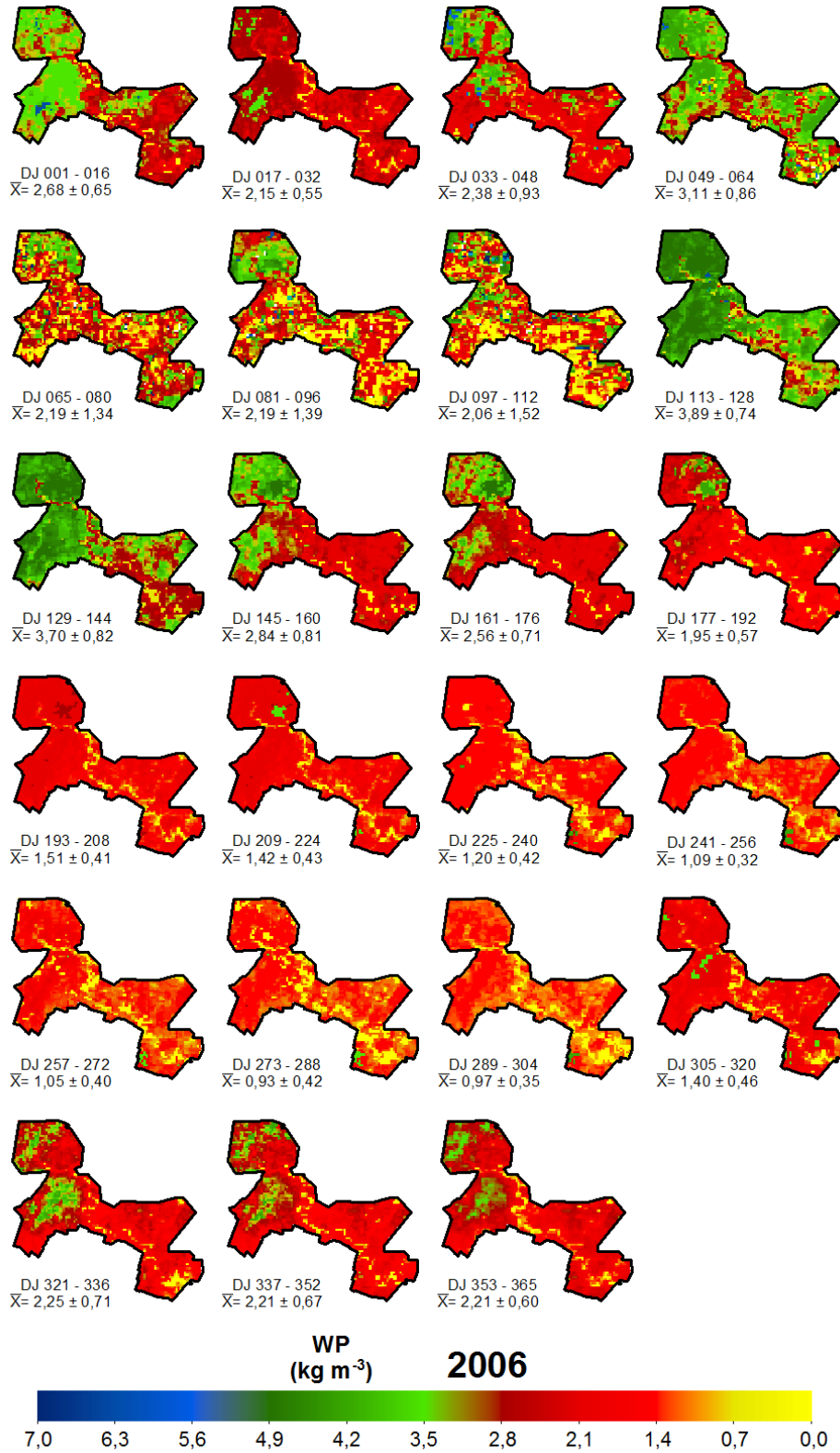


Figura 78. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2007. Média \pm Desvio Padrão (DP).

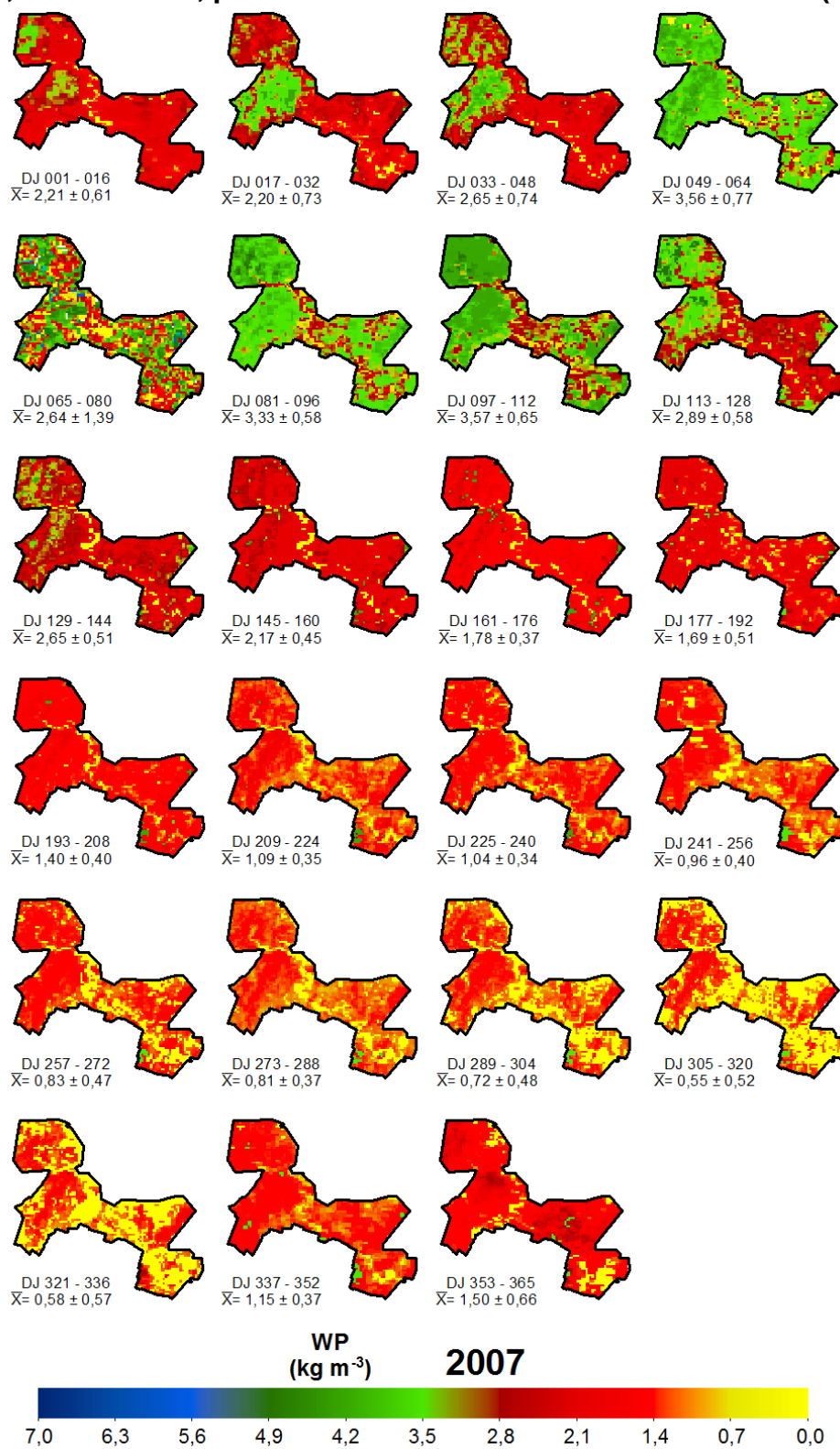


Figura 79. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2008. Média \pm Desvio Padrão (DP).

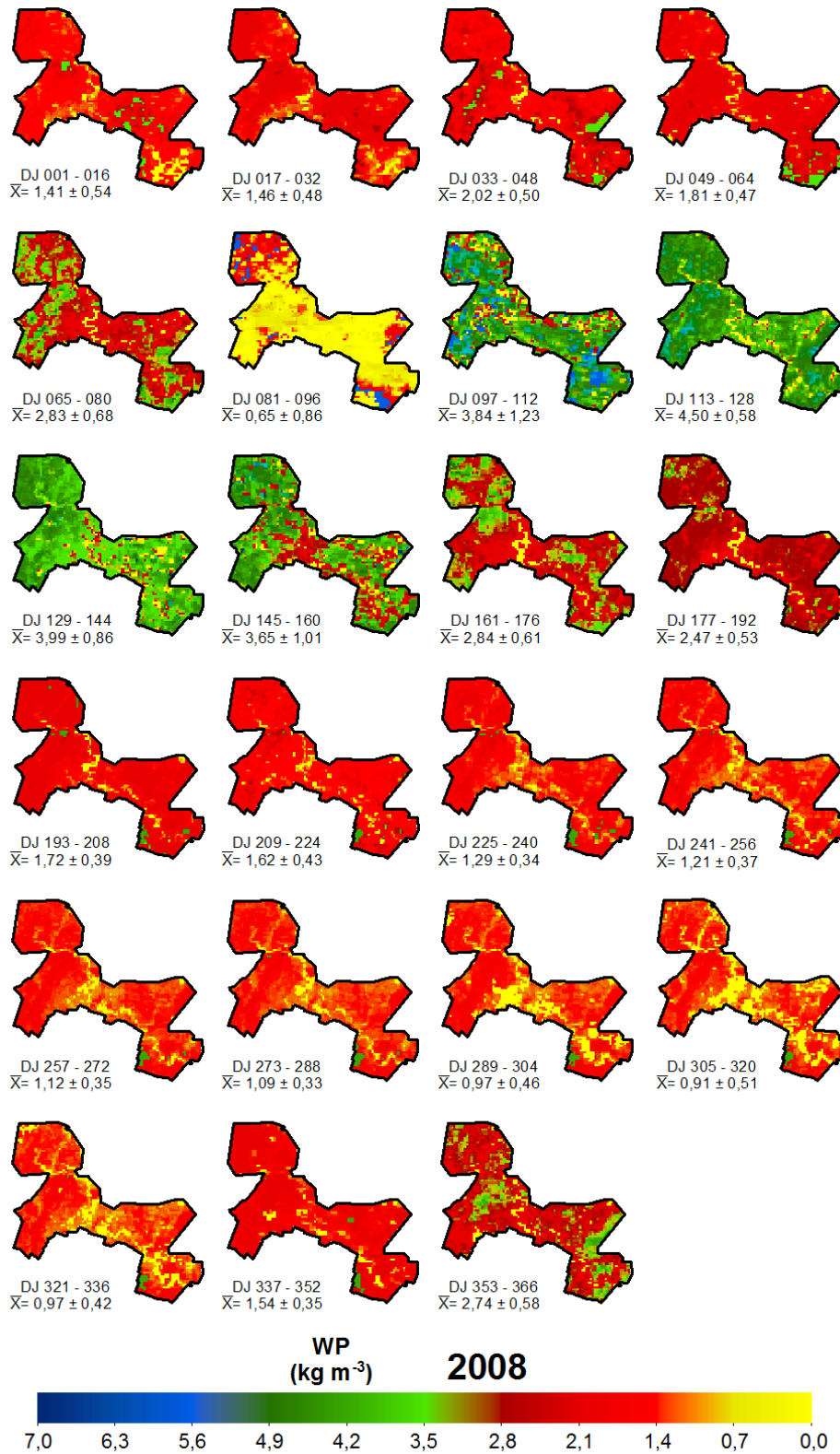


Figura 80. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2009. Média \pm Desvio Padrão (DP).

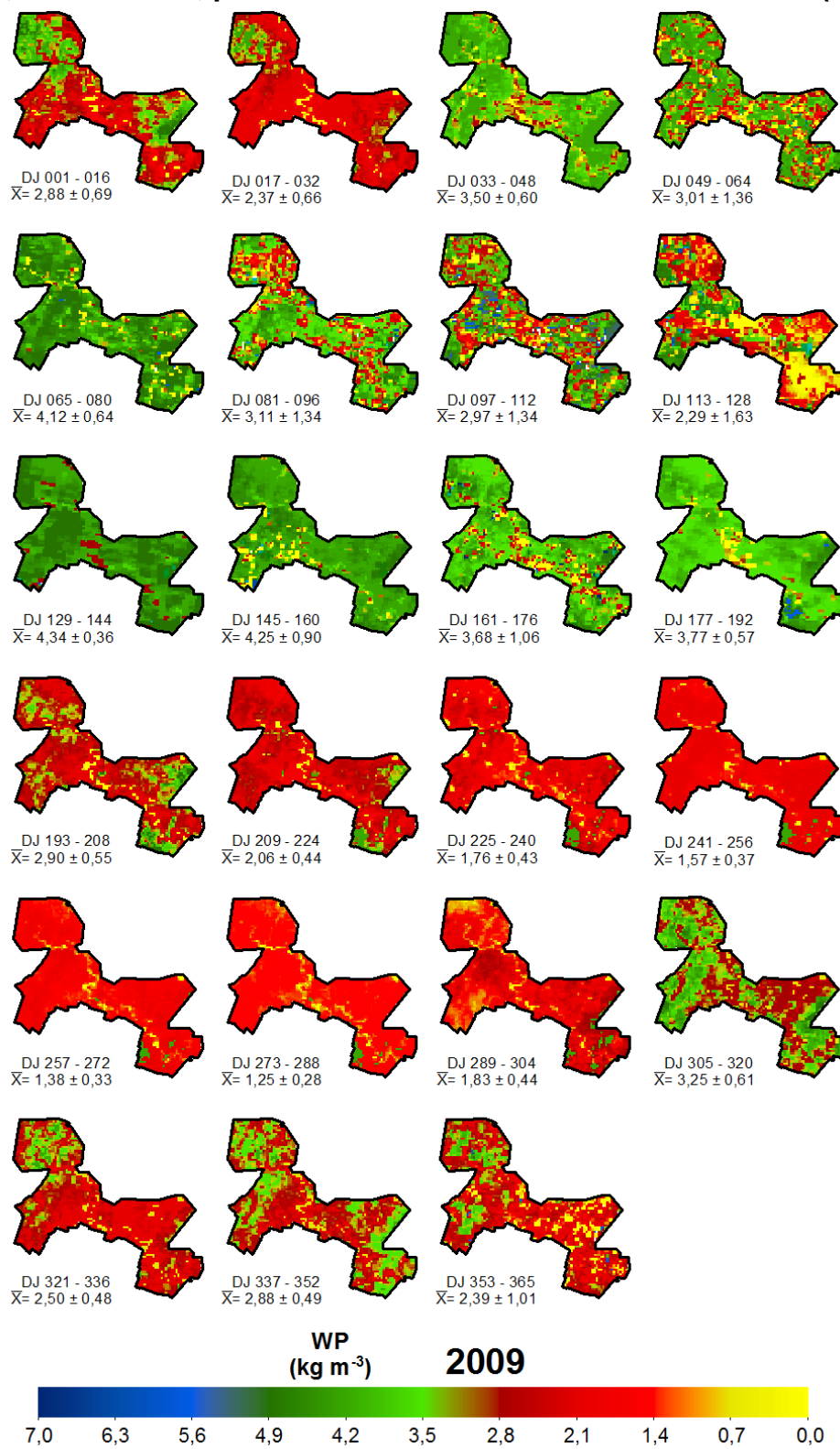


Figura 81. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2010. Média \pm Desvio Padrão (DP).

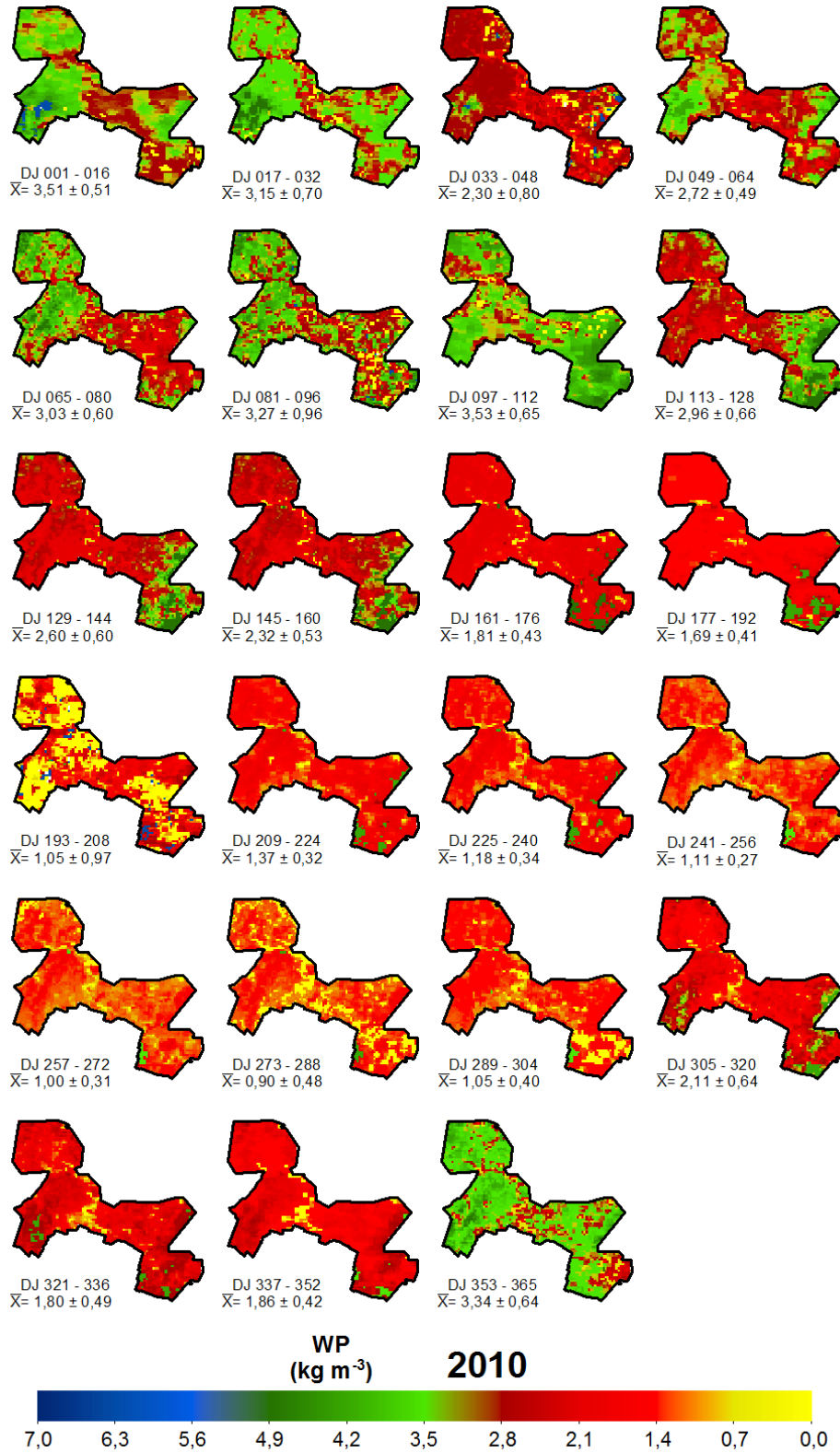


Figura 82. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2011. Média \pm Desvio Padrão (DP).

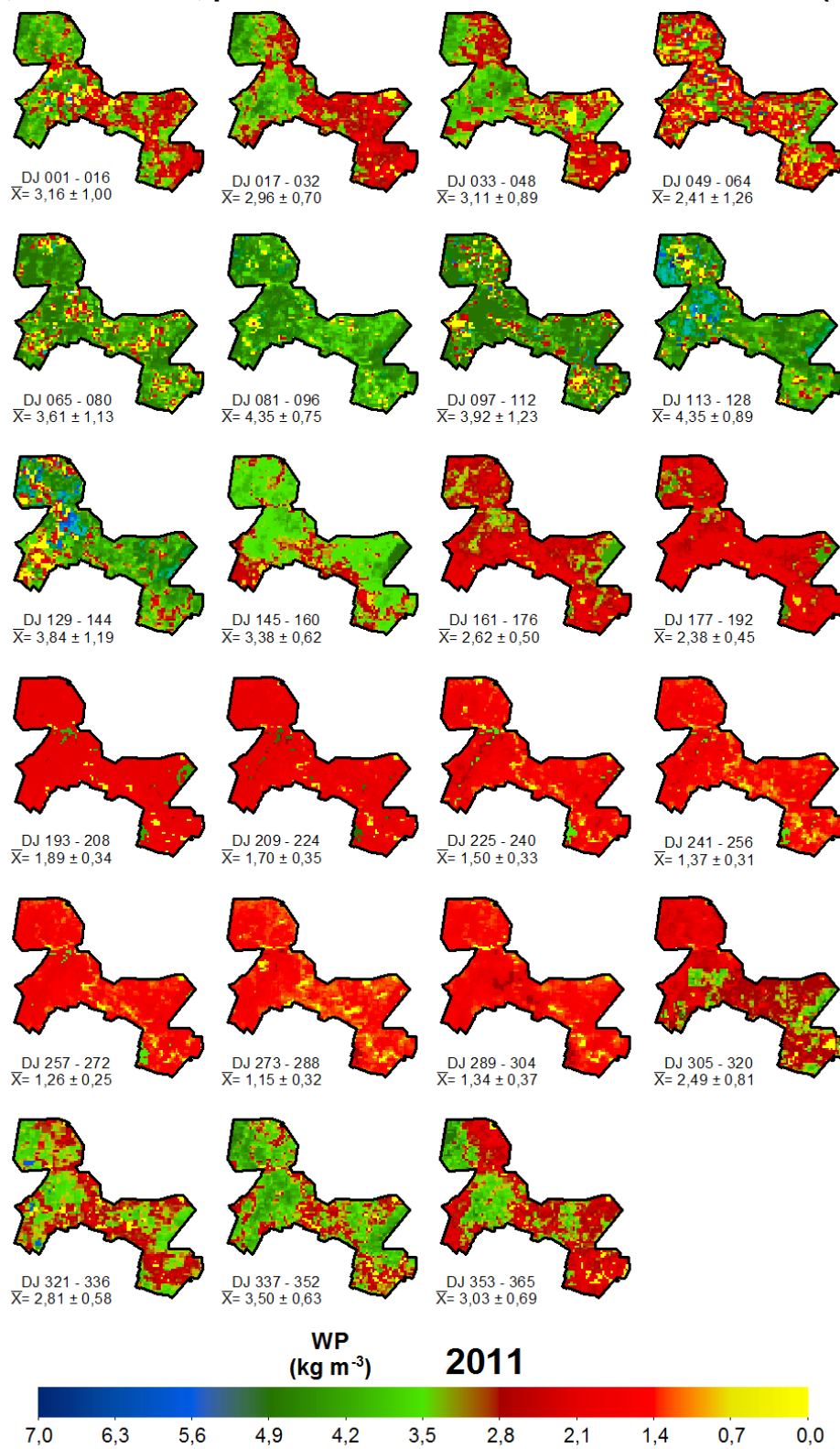


Figura 83. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2012. Média \pm Desvio Padrão (DP).

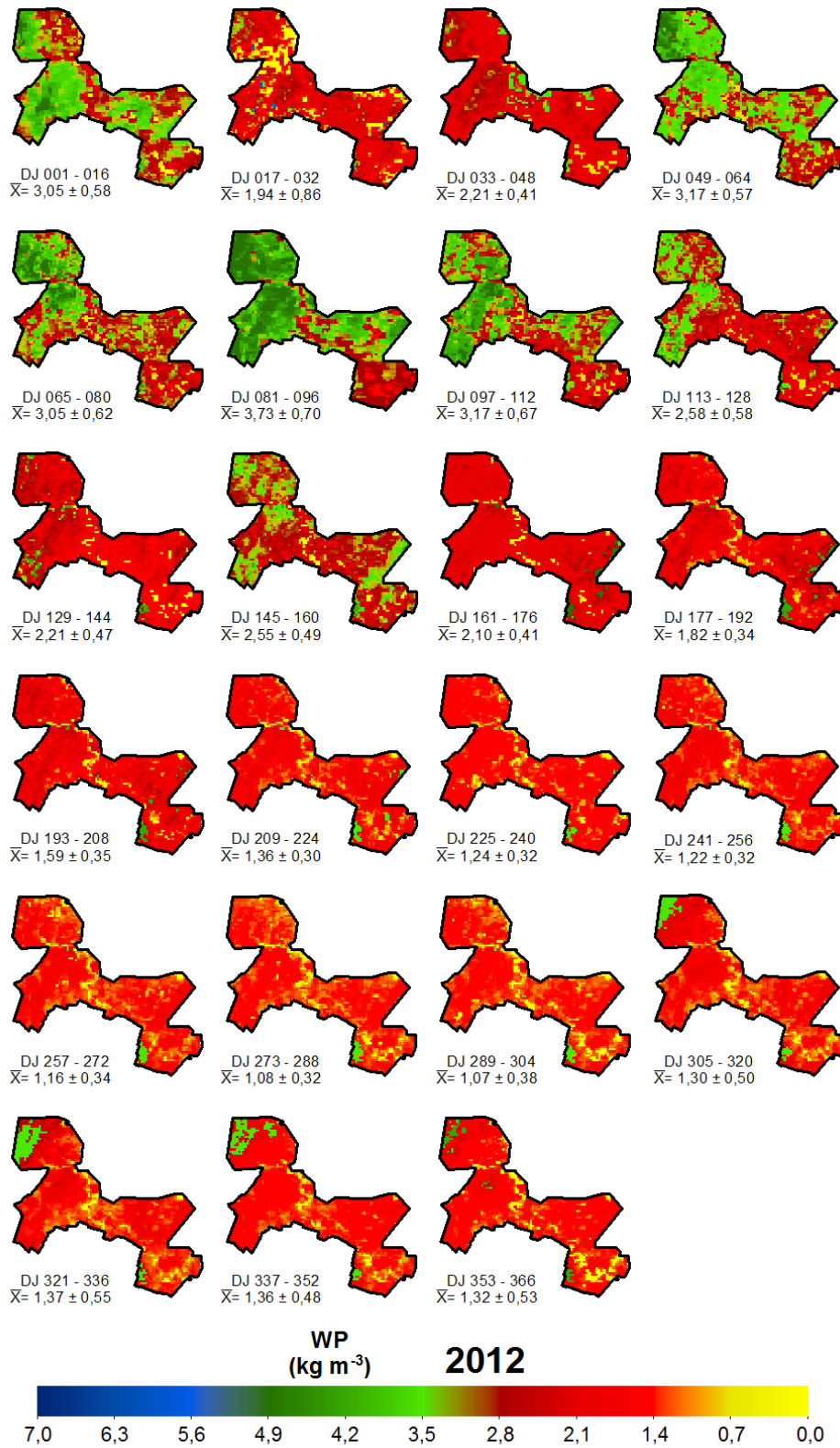


Figura 84. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2013. Média \pm Desvio Padrão (DP).

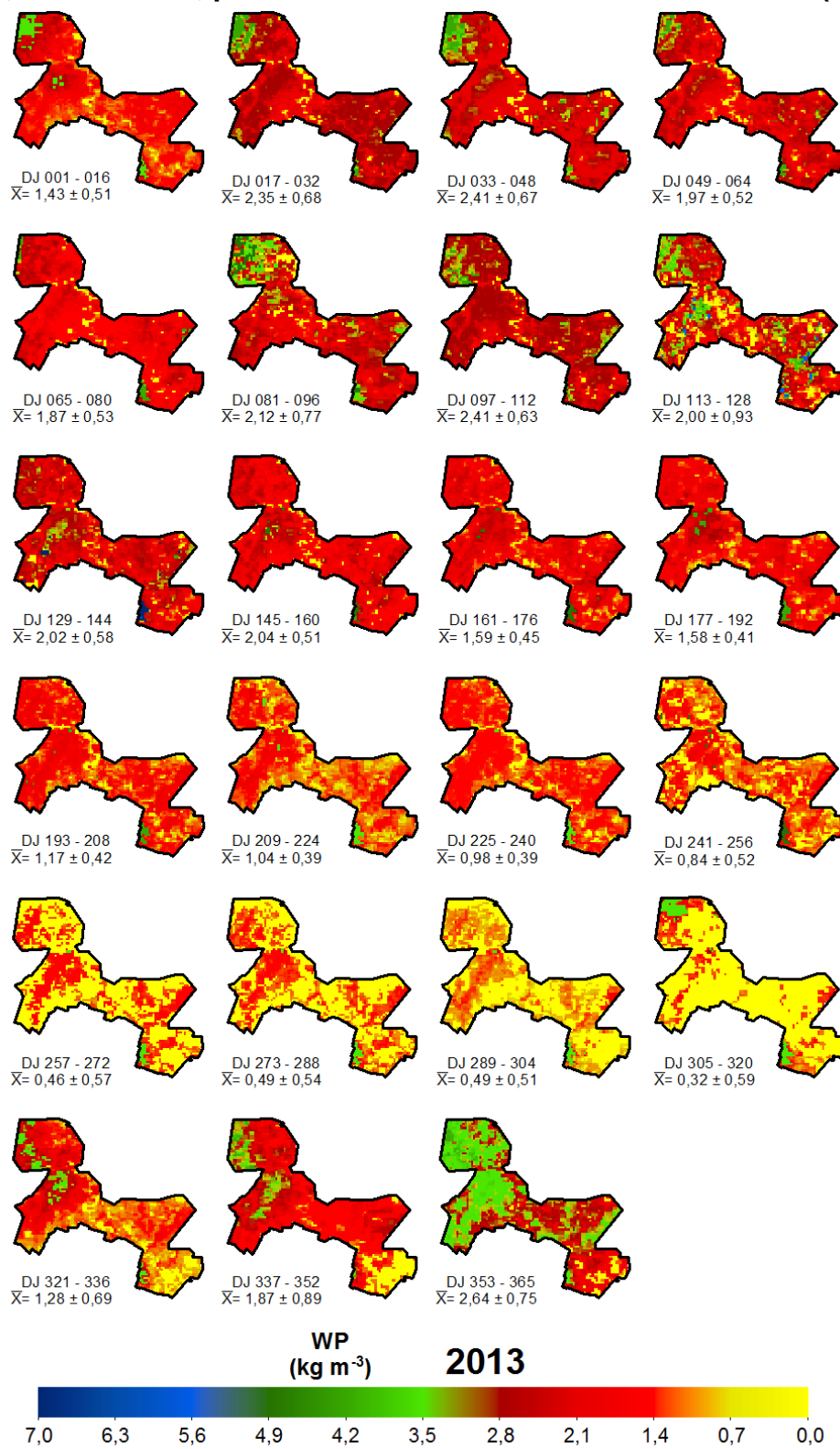


Figura 85. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2014. Média \pm Desvio Padrão (DP).

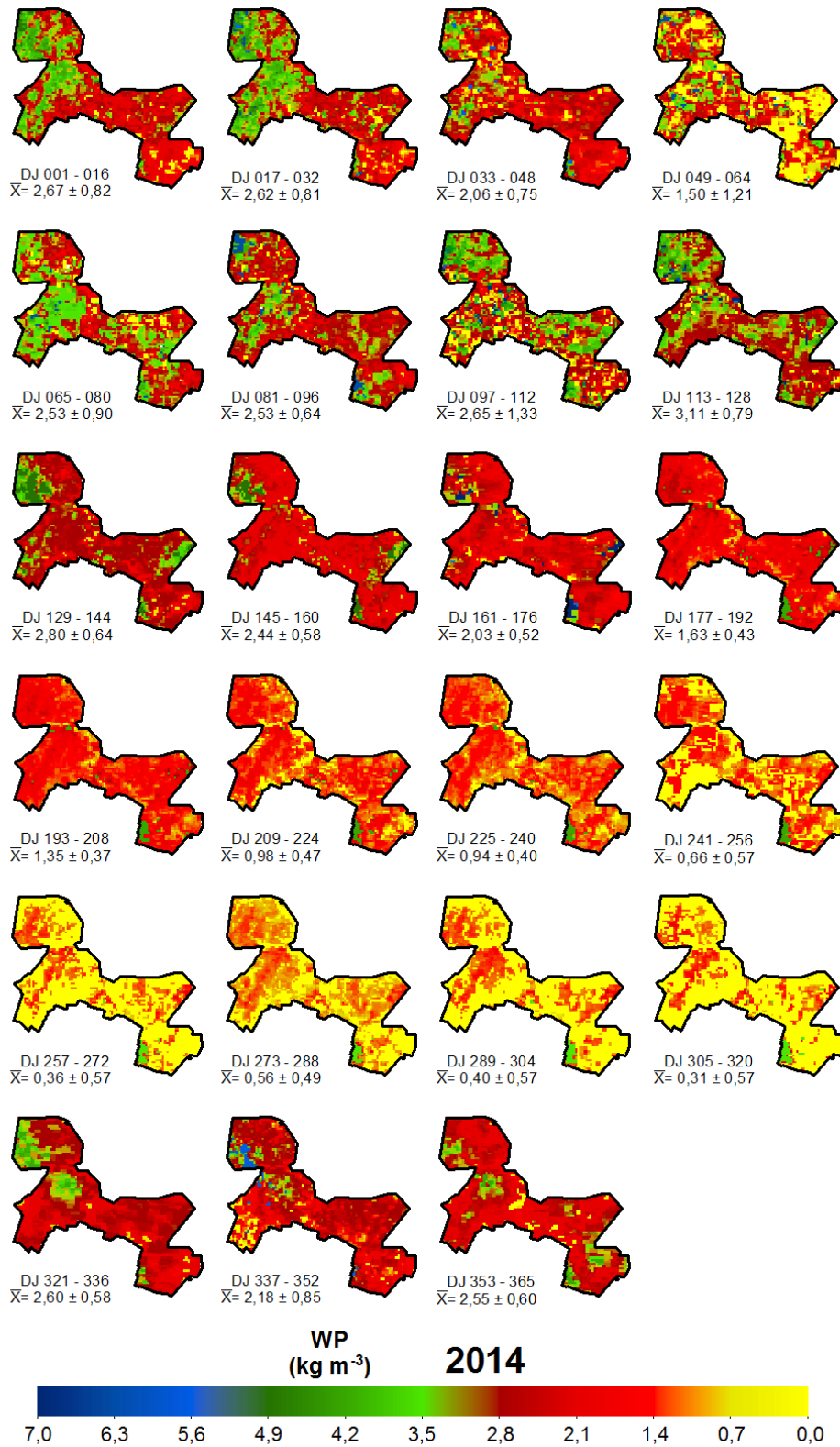
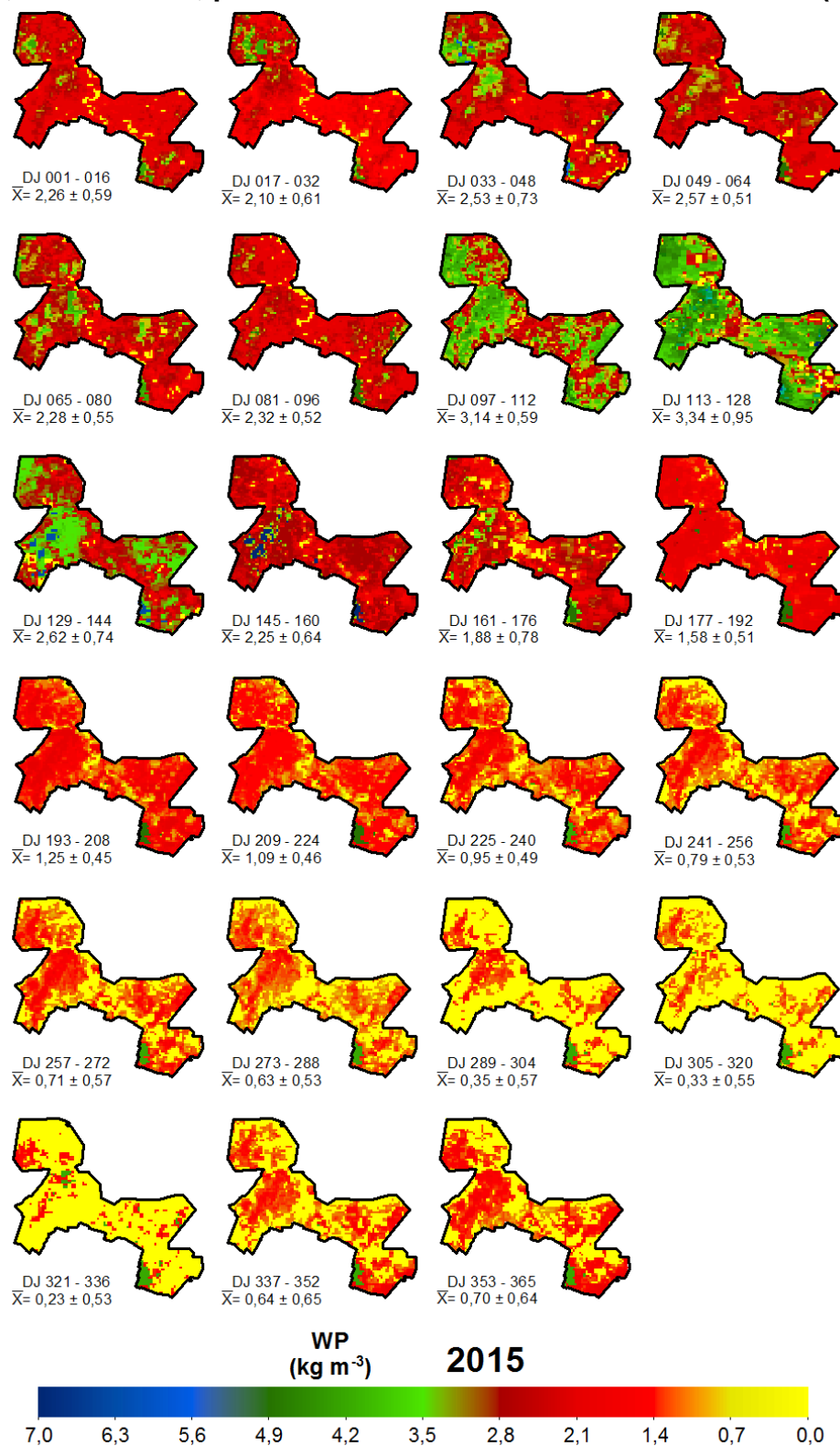


Figura 86. Mapas de produtividade da água (WP) do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, para o ano de 2015. Média \pm Desvio Padrão (DP).



Ao analisar as Figuras de 71 a 86 verifica-se que as maiores médias se concentraram na estação de chuvas em sua grande maioria, alcançando valor máximo de $7,23 \text{ kg m}^{-3}$ no intervalo de 16 dias nos DJ entre 113 a 128 do ano de 2015 (Figura 86), no mês de abril. No decorrer da estação de chuvas os resultados de WP se apresentam elevados devido ao acumulado considerável de P (Tabela 4) nos dias anteriores, as baixas médias de ET_r e elevadas médias de BIO, de modo que ao longo deste intervalo os resultados de WP foram reduzindo. Alguns anos foram marcados com baixos resultados de WP neste período, chegando a valores próximos ou iguais a zero, devido a fenômenos naturais que ocasionaram baixos índices de P nos meses anteriores, como ocorreram em 2000, 2003, 2005, 2008 e 2013 (Figuras 71, 74, 76, 79 e 84, respectivamente).

No decorrer dos anos estudados, os valores de WP foram expressivos nas áreas onde se concentram a maior parte da VN densa; entretanto, nas regiões em que apresentaram solo exposto e VN raleada, os resultados de WP foram próximos ou iguais a zero. No início da estação de chuvas os resultados de WP foram expressivos em grande parte dos anos estudados, chegando a um valor máximo de $6,21 \text{ kg m}^{-3}$ nos DJ entre 321 a 336 do ano de 2000 (Figura 71), que representam o mês de novembro. Porém, alguns anos registraram resultados abaixo quando comparados aos demais estudados, como em 2001, 2004, 2007, 2012 e 2015 (Figuras 72, 75, 78, 83 e 86, respectivamente), devido a elevadas médias de ET_r e baixas médias de BIO.

Nos intervalos que compõem o final da estação de chuvas, os resultados de WP foram elevados, dado ao acumulado considerável de P na estação de chuvas, comum para este período, de modo que ao longo deste intervalo os picos foram reduzindo em função do espalhamento das nuvens e diminuição da umidade no solo. Alguns dos anos estudados apresentaram resultados distintos, obtendo resultados de WP acima do comum para este período na região, como verificado em 2003, 2005, 2008, 2009 e 2011 (Figuras 74, 76, 79, 80 e 82, respectivamente), resultante do atraso das ocorrências de P na estação de chuvas. Por outro lado, em outros anos os resultados foram abaixo do normal climatológico devido ao baixo acumulado de P nos que antecedem, como apresentado nos anos de 2007, 2013 e 2015 (Figuras 78, 84 e 86, respectivamente).

Para a estação seca, os resultados encontrados foram próximos ou iguais a zero na grande maioria dos anos estudados, principalmente nos DJ referente aos meses de setembro e outubro. No entanto, em meio a este período, houve regiões nos mapas em que a WP é superior à média diária, na qual encontrou-se áreas com AI e VN mais densa, obtendo valor máximo de $4,68 \text{ kg m}^{-3}$ nos DJ entre 241 a 256 no mês de agosto de 2013, estando relacionado a umidade do solo retida na zona radicular da vegetação.

A média geral de WP entre os anos de 2000 a 2015 no Perímetro Irrigado Pontal Sul foi de $2,07 \text{ kg m}^{-3}$. A maior média de WP foi computada no ano de 2009 com valor de $2,79 \text{ kg m}^{-3}$, já a menor média foi no ano de 2013, com valor de $1,54 \text{ kg m}^{-3}$.

As Figuras 87 a 102 apresentam as médias e o DP separadamente para a AI e a VN nos anos entre 2000 a 2015.

Figura 87. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2000.

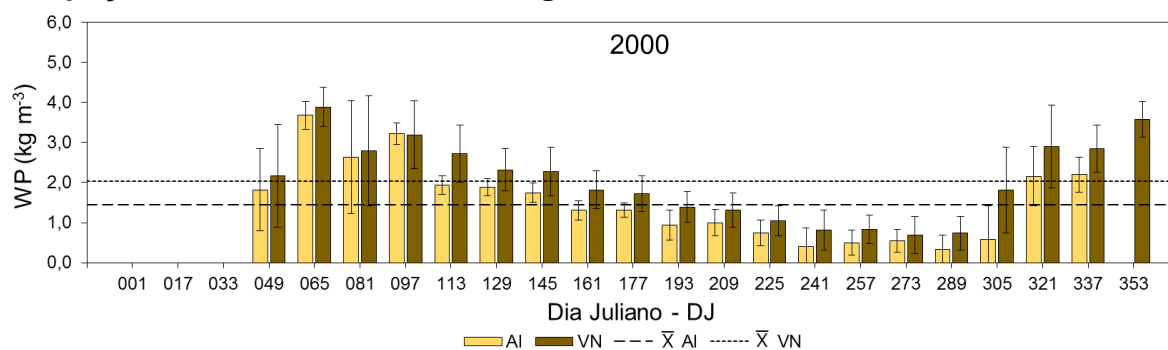


Figura 88. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2001.

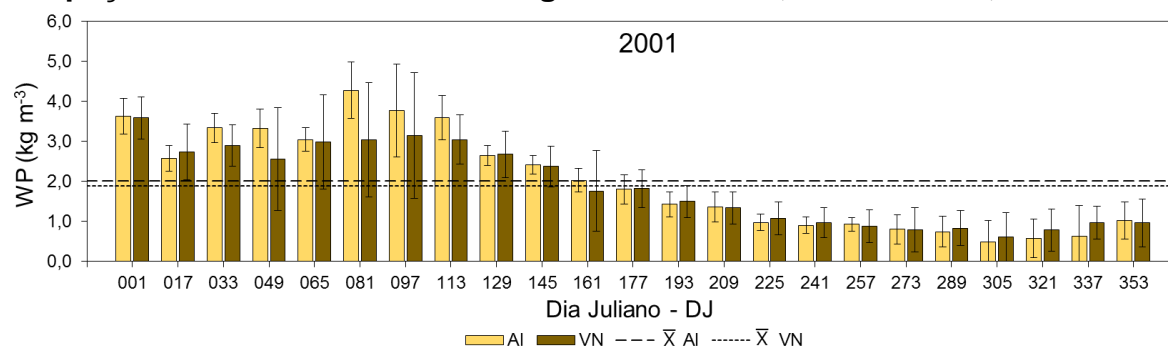


Figura 89. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2002.

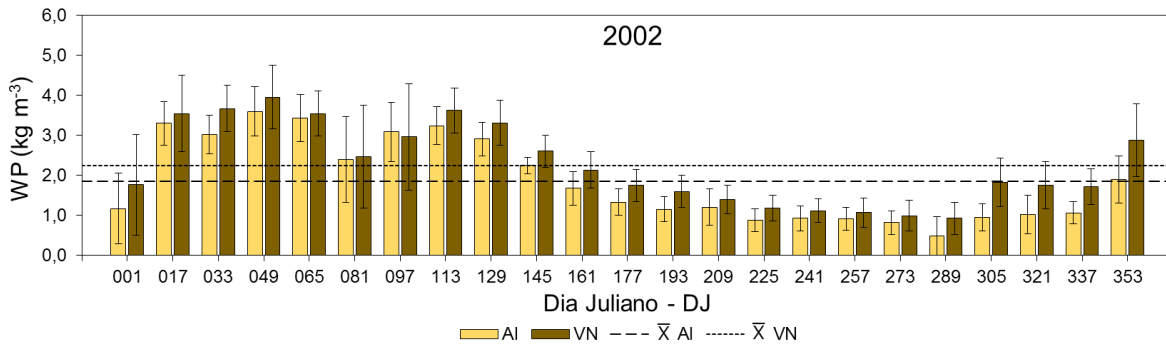


Figura 90. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2003.

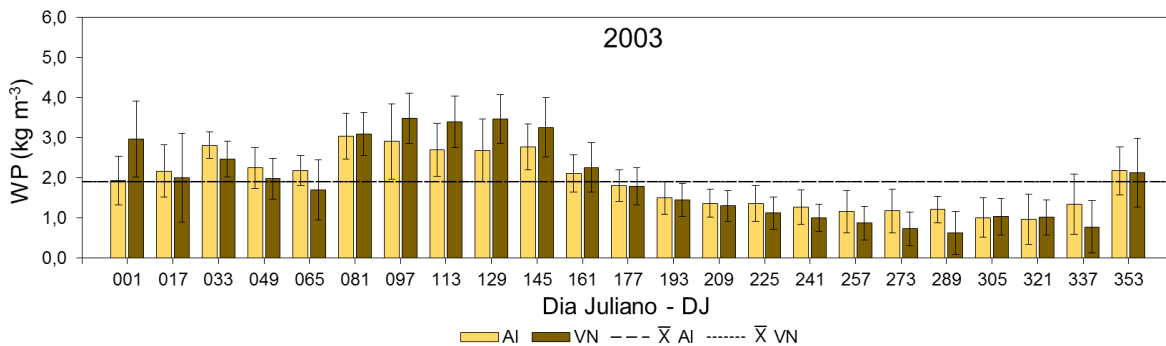


Figura 91. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2004.

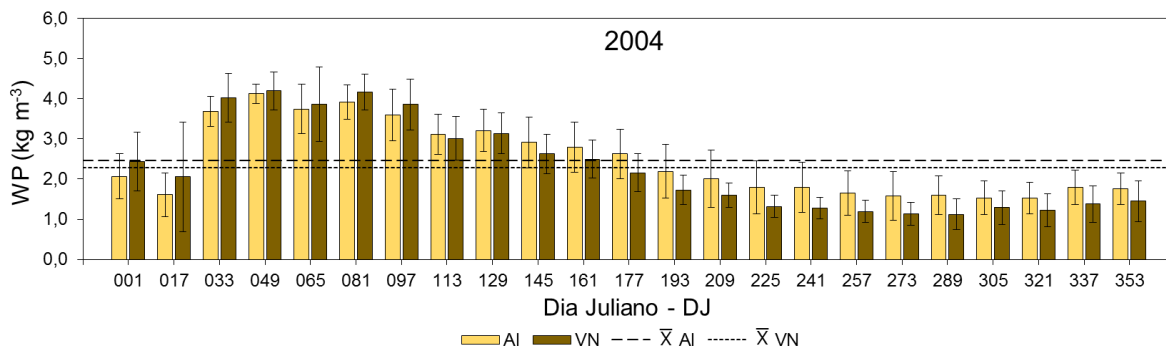


Figura 92. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2005.

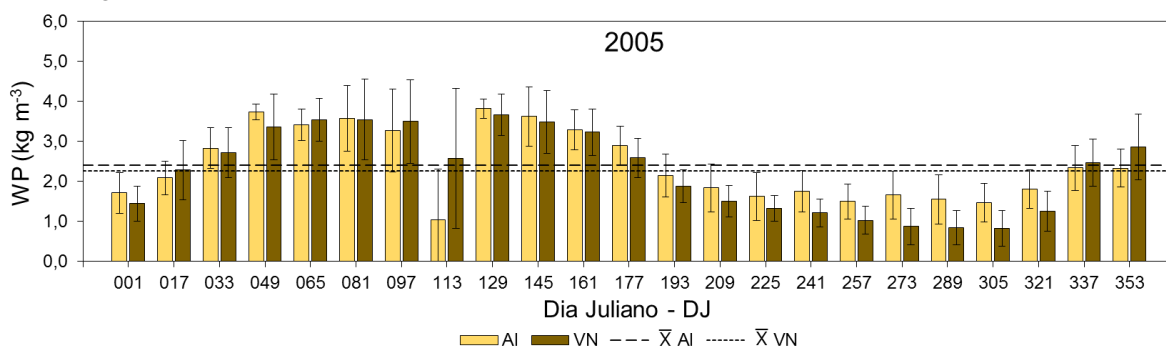


Figura 93. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2006.

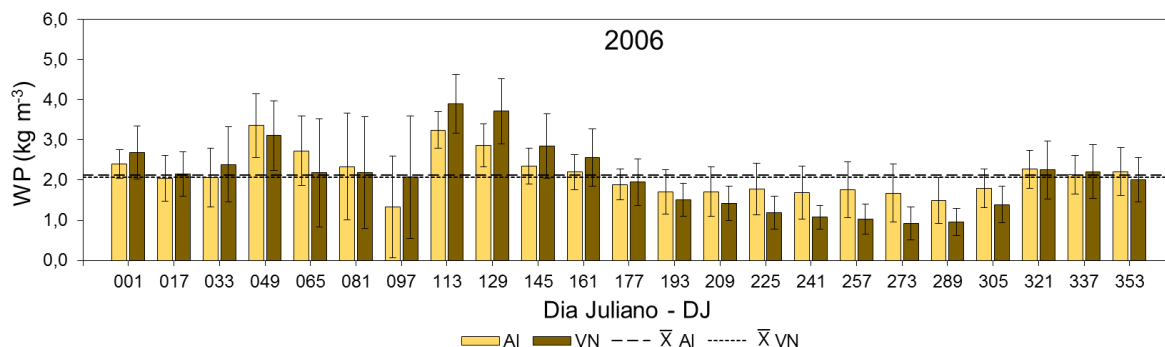


Figura 94. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2007.

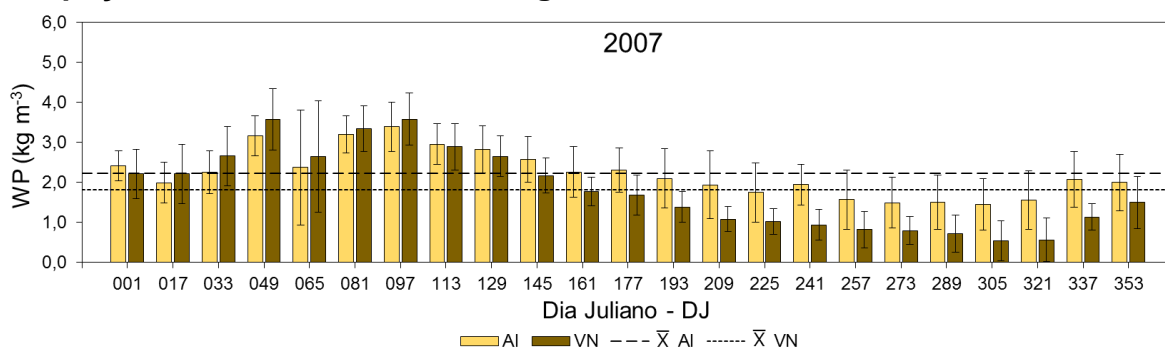


Figura 95. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2008.

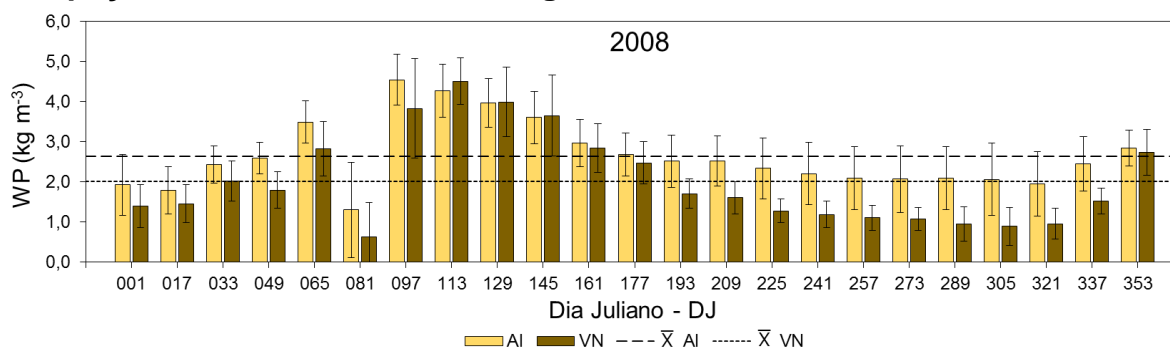


Figura 96. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2009.

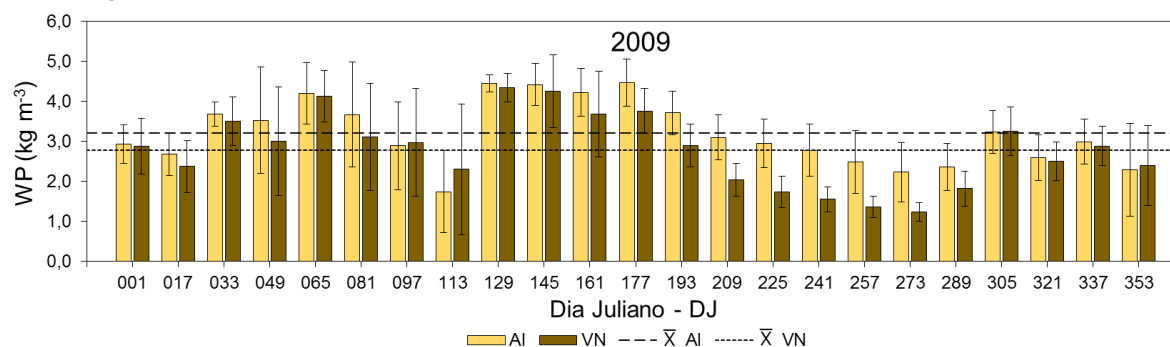


Figura 97. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2010.

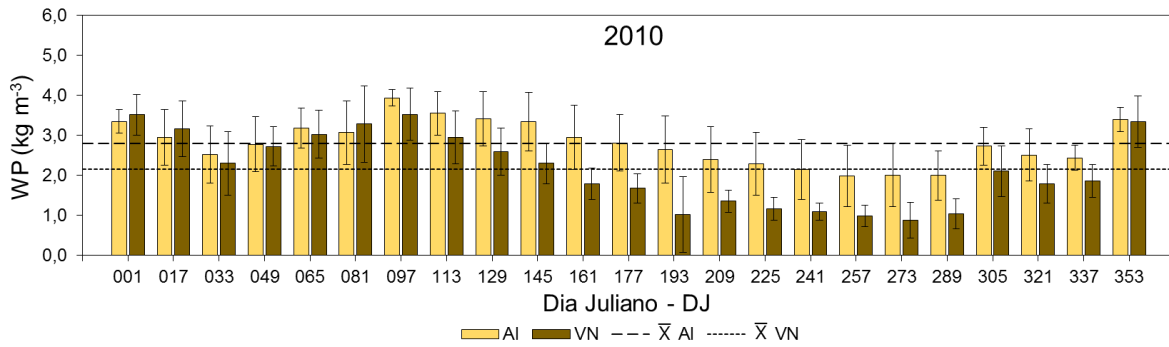


Figura 98. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2011.

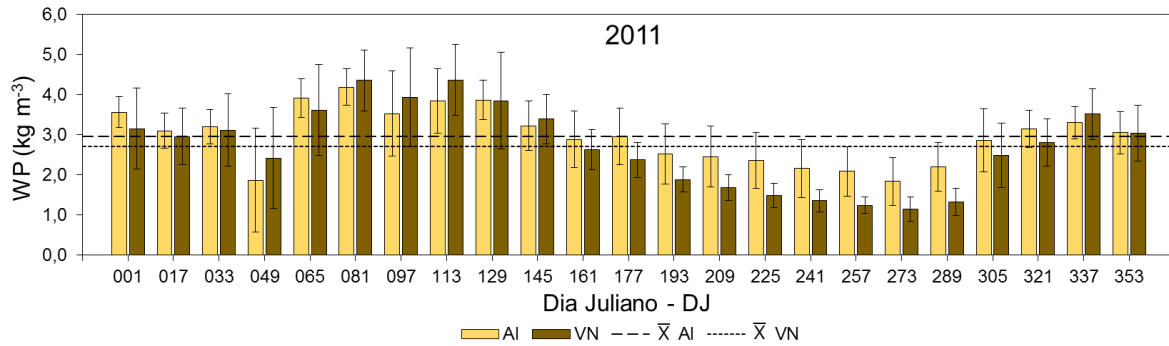


Figura 99. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2012.

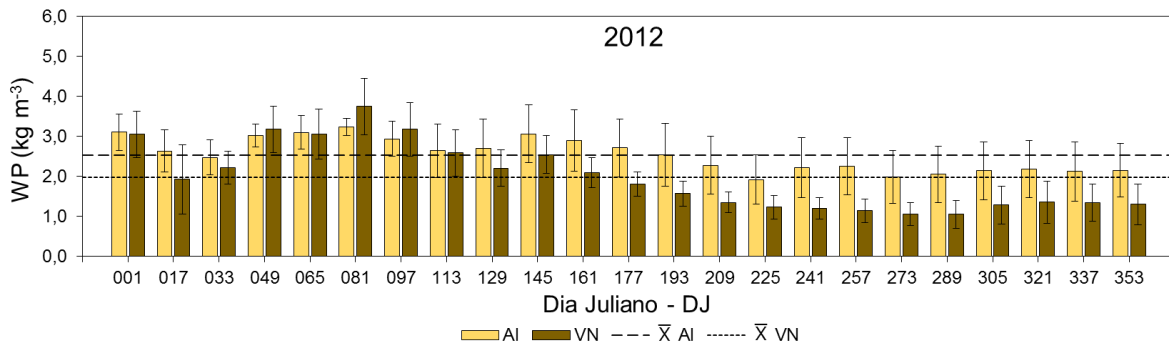


Figura 100. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2013.

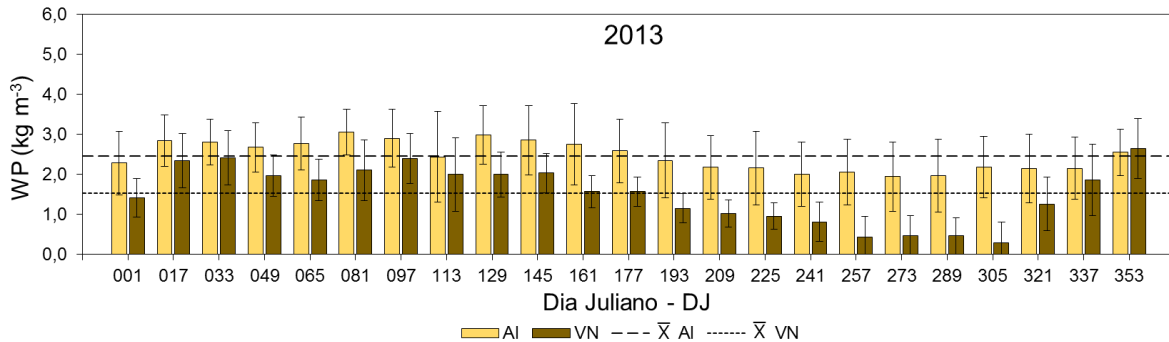


Figura 101. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2014.

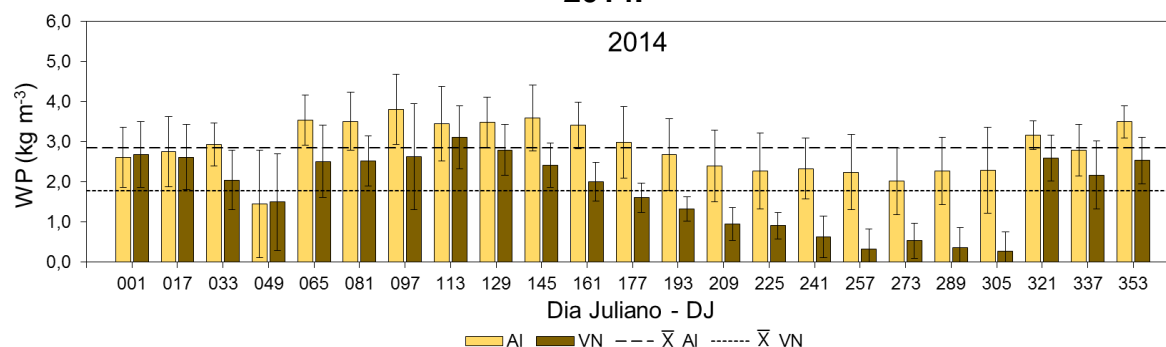
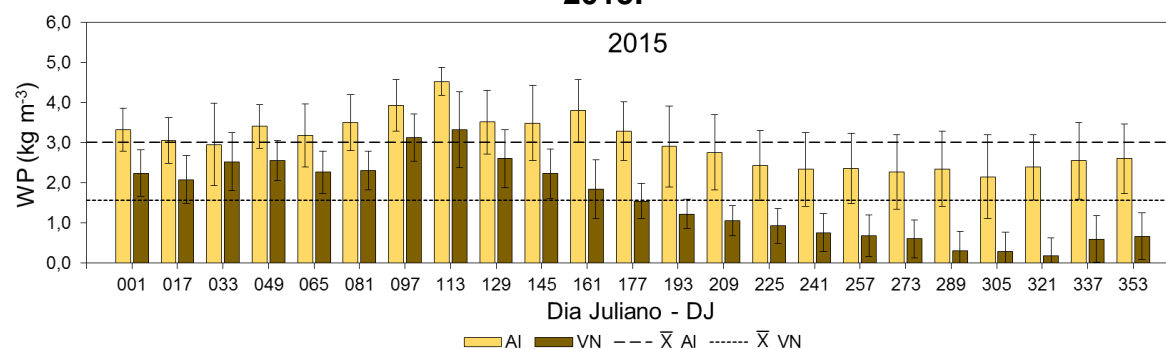


Figura 102. Médias e Desvio Padrão de produtividade da água (WP) para o uso e ocupação do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul, Petrolina-PE, ano de 2015.



Avaliando individualmente as áreas de AI e VN nas Figuras 87 a 102, observa-se que as médias WP mais elevadas estão nas áreas de AI, entre os anos de 2005 a 2006, principalmente na estação seca, onde a umidade do solo é menor, diferentemente dos anos entre 2000 a 2004 quando a AI não era presente. Nas áreas onde solo é exposto e em áreas de VN raleada, os processos climáticos são mais intensos (Tabela 4), reduzindo as médias de WP na estação seca.

Em referência as áreas de VN, as mesmas apresentaram média geral de 2,06 kg m⁻³. A menor média anual de WP foi encontrada no ano de 2013 (Figura 100) com 1,52 kg m⁻³, e a maior média foi computada no ano de 2009 (Figura 96), com 2,78 kg m⁻³. No período de chuvas, as médias diárias de WP estiveram acima de média anual nos meses de janeiro e março na maior parte dos anos estudados, proporcionado pelo acumulado de P nos meses anteriores. Na estação seca os resultados foram abaixo da média anual; contudo, houve pequenas variações na extensão do perímetro relacionado ao acúmulo de umidade do solo proporcionado pela vegetação, especialmente nas áreas com VN densa, que restringem a ação dos

processos climáticos ao longo do ano, regulando as taxas de ET_r . A menor média diária registrada foi de $0,19 \text{ kg m}^{-3}$ nos DJ entre 321 a 336 que caracterizam o mês de novembro 2015, proveniente da ação de fenômenos naturais que restringiram o surgimento de nuvens sobre a região neste ano, diminuindo assim o acumulado de P. Já a maior média foi de $4,51 \text{ kg m}^{-3}$ nos DJ entre 113 a 128 no mês de abril de 2008, dado a maior concentração de chuvas neste período.

Para a área de AI, a média geral encontrada foi de $2,65 \text{ kg m}^{-3}$. A menor média anual ocorreu em 2006 com valor igual a $2,13 \text{ kg m}^{-3}$, e a maior média foi verificada no ano de 2009 com valor igual a $3,20 \text{ kg m}^{-3}$. Na grande maioria dos anos estudados a WP esteve abaixo da média anual, principalmente na estação seca. No período de chuvas suas médias foram elevadas, devido ao acumulado de P e a aplicação de água via irrigação, causando uma oscilação maior em suas médias, tendo como destaque, na maioria dos casos, os meses de janeiro, fevereiro, março e abril, correspondendo a estação de chuvas com estimativas acima da média anual.

Na estação seca, o acumulado de P foi inferior, contudo as médias de WP apresentaram-se com menores variações entre os dias, em virtude do umedecimento do solo proporcionado pela irrigação. A menor média diária foi encontrada nos DJ entre 113 a 128 do mês de abril de 2005, com valor igual a $1,04 \text{ kg m}^{-3}$, sendo relacionado a elevadas médias de ET_r e ao baixo acumulado de P, resultado incomum para este período. A maior média de WP foi registrada nos DJ entre 097 a 112, referentes ao mês de abril de 2008, com valor de $4,54 \text{ kg m}^{-3}$, influenciado pelo acumulado elevado de P nos dias que antecedem este intervalo e pelas médias significativas de BIO.

5 DISCUSSÃO

5.1 Uso e ocupação no Perímetro Irrigado Pontal Sul

O crescimento da agricultura irrigada vem levantando questionamentos sobre o uso da água de modo sustentável, evitando afetar a qualidade e a quantidade de água aplicada (OLIVEIRA et al., 2017). O conhecimento prévio dos recursos naturais e da climatologia local favorecem a prática do manejo hidrológico inteligente, limitando os danos causados a este recurso natural, garantindo a segurança da prática agrícola e do meio ambiente (CAMPOS et al., 2010; MURIITHI, 2016).

As mudanças ocorridas no Perímetro Irrigado Pontal Sul, observadas nas Figuras 4, 5 e 6, anos de 2000, 2005 e 2015, respectivamente, expõem a redução das áreas de VN, densa e raleada, a ampliação de áreas com solo exposto e o surgimento de regiões com AI. Mensurar as mudanças, a distribuição espacial e as características presentes no ambiente proporcionam a identificação das condições reais do local, levando em consideração a vulnerabilidade da VN às atividades antrópicas, e possibilitando realizar alterações de planejamento (FREITAS et al., 2012). A VN do local deve ser tomada como ponto de partida para o planejamento e estudos climáticos, de uso do solo e da implantação de áreas agrícolas, visto que nestas áreas se encontram condições nativas menos afetadas pela atividade humana (CORRÊA et al., 2009).

É possível observar no Perímetro a presença de canal e de estradas em torno dos lotes que, em um futuro próximo, entrarão em funcionamento. Dos 4800 ha representados pelos lotes que serão utilizadas para a prática da AI, 620,24 ha já estão em funcionamento conforme retratado na Figura 5.

No perímetro, alguns estudos relacionados a variação do clima e do solo em relação ao tempo e espaço (RAMOS, 2012), definição das características físicas e hídricas do solo (LIMA, 2016) e uso da terra e infiltração de água no solo (CORREIA, 2016) foram desenvolvidos com o objetivo de se ter informações que venham a contribuir para o planejamento de implantação/expansão do perímetro irrigado de forma a minimizar os impactos antrópicos e preservar ao máximo os insumos naturais.

O levantamento das alterações físicas ocorridas no perímetro irrigado é de grande importância, pois a retirada da VN de forma desregrada impulsiona o aumento da temperatura do ar, que por sua vez eleva a quantidade necessária de água para saturação do ar, tornando a demanda hídrica atmosférica cada vez mais elevada.

5.2 Caracterização climática do Perímetro Irrigado Pontal Sul

Na região semiárida brasileira, a estação de chuvas ocorre entre os meses de janeiro a abril, porém, o máximo acumulado de P concentra-se entre os meses de fevereiro a abril devido a interferência da zona de convergência intertropical (ZCIT) que se posiciona mais ao sul neste período (MARENGO et al., 2011). Nesta região, a ocorrência de estiagem em meio a estação de chuvas é algo comum, causando prejuízos à agricultura, conforme a grandeza e o intervalo de tempo (NAE, 2005).

Na maioria das regiões caracterizadas como semiáridas, a estação seca ocorre entre os meses de agosto a outubro, devido a variação da temperatura no Oceano Atlântico, provocado pelo Dipolo do Atlântico, que culminam em alterações na Zona de Convergência Intertropical, resultando em pequenas proporções de chuva no Nordeste (MARENGO et al., 2011). Associado ao aquecimento do oceano, fenômenos meteorológicos de larga escala, como o El Niño, provocam esta variabilidade do acumulado de P ao longo do ano (SOUZA et al. 2001). Em regiões áridas e semiáridas, pequenas variações de precipitação e de temperatura causam mudanças significativas no processo hidrológico da região (HUO et al., 2013).

Em meio aos intervalos em que houve escassez de chuvas, a temperatura do ar atingiu valores elevados, ampliando as taxas de ET_0 que, como consequência, reduzem a umidade do solo, causando um balanço hídrico negativo nesta região (CORREIA et al., 2011). A ET_0 influencia o movimento da água no solo, pois controla a distribuição de água nas camadas superficiais e do sistema radicular das plantas através da evaporação e transpiração, respectivamente (YU et al., 2016). O computo da ET_0 também sofre interferência da umidade presente na atmosfera, o qual está ligada a quantidade de nuvens que influenciam diretamente na distribuição das ondas longas e curtas, e a demanda hídrica do solo, variando conforme o local e a

estação do ano (SOUZA et al., 2001; CARVALHO et al., 2011a; HUO et al., 2013; CARVALHO et al., 2015).

Conforme Allen et al. (1998), as variações da ET_0 estão condicionadas a fatores meteorológicos como a umidade do ar, a velocidade do vento, a temperatura do ar e a radiação solar, podendo variar conforme as características da região, como a cobertura da superfície, tipo de vegetação, localização geográfica, fotoperíodo e disponibilidade hídrica. Para Izuka, Giambelluca e Nullet (2005), as variações da ET_0 estão ligadas diretamente a cobertura de nuvens orográficas, ou seja, quando houver maior cobertura de nuvens ou maior quantidade de P acumulada a ET_0 será menor, e quando houver menor cobertura de nuvens a RG será mais incidente sobre a superfície, elevando a temperatura do ar, e causando o aumento das taxas de ET_0 .

A intensa quantidade de nuvens reduz a temperatura máxima do ar, visto que uma pequena porcentagem da RG incidirá sobre a superfície, e por outro lado, as temperaturas noturnas serão mais elevadas, uma vez que as nuvens limitam a perda de calor por meio da radiação de ondas longas (ALLEN et al., 1998; ALVES et al., 2013). A RG corresponde ao total de energia que atinge a superfície da terra, sendo dividida em radiação solar direta, a qual atinge diretamente a superfície, e radiação solar difusa, que é dispersa na atmosfera para, posteriormente, atingir a superfície (ELEKALACHI et al., 2016). Portanto, quanto maior a energia disponível maior será as taxas de evapotranspiração (SILVA et al., 2010).

5.3 Comportamento da Evapotranspiração real (ET_r) no Perímetro Irrigado Pontal Sul

Os resultados de ET_r apresentaram variações ao longo dos anos estudados, passando por interferência provindas dos fenômenos meteorológicos ativos no perímetro irrigado como a precipitação pluvial e a radiação solar global. Estes fenômenos regulam a intensidade da ET_r sobre a superfície, atuando na temperatura e na umidade do ar (REDDY, 1987; SCOTT, et al., 2000; TRNKA et al., 2007), de modo que a umidade presente no solo determina a quantidade de energia que será utilizada para tal processo (SCOTT; BASTIAANSEN; AHMAD, 2003; MELLO; LIMA; SILVA, 2004; ANDRADE et al., 2016).

Desta forma, as médias elevadas de ET_r na estação de chuvas estão relacionadas a concentração de umidade presente no solo, aliada aos altos índices de RG neste período. No final da estação de chuvas, o solo apresenta uma concentração significativa de umidade que é facilmente disponível para a vegetação, atingindo médias de ET_r elevadas, de maneira que até o mês de julho, esta umidade se esgota, dando início a estação seca. Neste período, o acumulado de P é praticamente nulo com baixos índices de RG, apresentando picos isolados de ET_r provenientes de chuvas eventuais. Setembro e outubro são considerados os meses com maior déficit hídrico e RG abaixo da média anual. No início da estação de chuvas, por apresentar acumulado de P e limites de RG expressivos, as médias de ET_r se encontram elevadas na maioria dos anos estudados.

Entre os anos de 2000 a 2015, o Perímetro Irrigado Pontal Sul registrou médias anuais de ET_r que foram de $0,40 \text{ mm dia}^{-1}$ no ano de 2013 a $1,81 \text{ mm dia}^{-1}$ no ano de 2009, com média geral igual a $0,93 \text{ mm dia}^{-1}$ para os 16 anos de estudo. Trabalhos realizados em regiões próximas ao perímetro registraram resultados semelhantes, como o desenvolvido por Teixeira e Leivas (2017) no ano de 2014, para o município de Juazeiro-BA, avaliando o desempenho da ET_r com imagens Landsat-8 representativas para a estação de chuvas, final da estação de chuvas e estação seca, as quais apresentaram médias iguais a $1,40$, $1,40$, e $0,20 \text{ mm dia}^{-1}$, nessa ordem, com média anual igual a $1,00 \text{ mm dia}^{-1}$. Em pesquisa desenvolvida no Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Petrolina - PE e Casa Nova - BA, Teixeira et al. (2015b) avaliaram a ET_r entre as estações de seca dos anos de 2013 e 2014, e encontraram média mínima de $1,30 \text{ mm dia}^{-1}$ no mês de outubro de 2013 e máxima de $3,30 \text{ mm dia}^{-1}$ no mês de janeiro. Teixeira et al. (2013) estimaram a ET_r para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro - BA, obtendo médias anuais iguais a $1,81$ e $1,28 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente para os dois municípios. Teixeira et al. (2012) no município de Petrolina-PE, durante o ano de 2011, registraram média anual de $1,81 \text{ mm dia}^{-1}$. Realizando a estimativa da ET_r na região do Nordeste que compreende os municípios de Santa Mara da Boa Vista - PE, Lagoa Grande - PE, Petrolina - PE, Juazeiro - BA e Casa Nova - BA no ano de 2006, Teixeira (2010) encontrou média anual diversificada entre $1,05$ a $2,28 \text{ mm dia}^{-1}$. Utilizando o SEBAL para a estimativa da ET_r na bacia do baixo-médio Rio São

Francisco, Teixeira et al. (2009) computaram, no ano de 2003, média anual igual a 2,50 mm dia⁻¹.

Resultados equivalentes aos reportados neste trabalho foram encontrados em diferentes campos de pesquisa. Coaguila et al. (2017), realizando a estimativa da ET_r na Bacia Hidrográfica de Cabaceira Comprida, no município de Santa Fé do Sul – SP em 2015, sob diferentes usos da terra, registraram valores que variam entre 1,87 mm dia⁻¹ e 0,25 mm dia⁻¹, respectivamente, para o período de chuvas e período seco. Perante os diferentes usos da terra na microbacia do Córrego da Mula, localizado no mesmo município, Coaguila, Hernandez e Teixeira (2015) obtiveram médias iguais a 0,39 mm dia⁻¹ em setembro de 2013, e 1,35 e 0,40 mm dia⁻¹ respectivamente para os meses de março e setembro de 2014. Na região do Pantanal mato-grossense, Teixeira et al. (2015a) apresentaram uma estimativa média anual de ET_r para o ano de 2012 igual a 1,48 mm dia⁻¹ observada por meio do saldo de radiação e da fração evaporativa com valores respectivos de 6,98 MJ m⁻² dia⁻¹ e 0,54. Teixeira et al. (2016b), na região noroeste do Estado de São Paulo, nos anos de 2013 e 2014, apresentaram médias máxima e mínima iguais a 2,40 e 0,90 mm dia⁻¹ para os meses de dezembro e setembro do ano de 2013, respectivamente, e médias iguais a 2,80 e 1,00 mm dia⁻¹ nos meses de janeiro e outubro de 2014, respectivamente. Franco et al. (2016), realizando trabalho na bacia do Rio Tietê nos anos de 2013 e 2014, encontraram médias iguais a 1,15 e 1,20 mm dia⁻¹, nesta ordem.

Com relação ao uso e ocupação do solo, no que diz respeito às áreas de VN e AI, as médias anuais máximas e mínimas de ET_r variaram em diferentes períodos. A área de VN apresentou médias anuais que variaram de 0,37 mm dia⁻¹ no ano de 2013 a 1,80 mm dia⁻¹ no ano de 2009, com média total de 0,91 mm dia⁻¹. Tais resultados foram próximos aos encontrados para a área do perímetro como um todo, devido ao seu tamanho que representa 96,88% do total e a forte dependência da vegetação às chuvas que a mantém com folhas e suprida hidricamente (TEIXEIRA et al., 2015b). Em relação a área de AI, a mesma apresentou variações que vão de 0,77 mm dia⁻¹ no ano de 2000 a 2,51 mm dia⁻¹ no ano de 2009, com média geral igual a 1,50 mm dia⁻¹, médias estas relacionadas a disponibilidade frequente de água pela irrigação ao longo dos anos em estudo. Contudo, no ano de 2000 a

prática da irrigação ainda não era presente no perímetro, justificando a média registrada para este ano.

Trabalhos acerca da estimativa da ET_r sob diferentes usos do solo, desenvolvidos próximos a região do Perímetro Irrigado Pontal Sul, encontraram resultados equivalentes aos evidenciados neste trabalho. Em Juazeiro-BA, no ano de 2014, Teixeira e Leivas (2017) registraram médias anuais iguais a $0,50 \text{ mm dia}^{-1}$ para a área de VN e $3,30 \text{ mm dia}^{-1}$ para AI. No Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Casa Nova-BA e Petrolina-PE, Teixeira et al. (2015b) encontraram médias anuais de ET_r para as áreas de VN e AI iguais a $2,00$ e $2,80 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente, para o ano de 2014. Teixeira et al. (2013) estimaram a ET_r para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro – BA, obtendo médias anuais respectivas das áreas de VN e AI iguais a $1,05$ e $2,57 \text{ mm dia}^{-1}$, e $0,53$ e $2,02 \text{ mm dia}^{-1}$ nesta ordem para os dois municípios. Teixeira et al. (2012), registraram médias anuais de $1,06$ e $2,57 \text{ mm dia}^{-1}$ no município de Petrolina-PE, para as áreas de VN e AI, respectivamente, no ano de 2011. A partir de técnicas micrometeorológicas, em áreas de pastagem no município de São João-PE, Amazonas et al. (2014) registraram médias para o ano de 2011 iguais a $3,33$ e $4,05 \text{ mm dia}^{-1}$ utilizando os métodos da Razão de Bowen e do domo, respectivamente. Estimando a ET_r nos municípios de Santa Mara da Boa Vista - PE, Lagoa Grande - PE, Petrolina - PE, Juazeiro - BA e Casa Nova – BA em conjunto no ano de 2006, Teixeira (2010) encontrou médias anuais que apresentaram variações de $0,56$ a $1,10 \text{ mm dia}^{-1}$ em áreas de vegetação da Caatinga, e de $1,30$ a $2,88 \text{ mm dia}^{-1}$ em pomares de mangueiras e videiras. Teixeira et al. (2009), utilizando o SEBAL para a estimativa da ET_r na bacia do baixo-médio Rio São Francisco, para o ano de 2003, obtiveram médias anuais para as culturas de videira e mangueira irrigadas iguais a $3,90$ e $3,60 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente, e para culturas não irrigadas a média foi igual a $1,40 \text{ mm dia}^{-1}$.

Em regiões distintas, as médias de ET_r foram semelhantes aos registrados no Pontal Sul. No Pantanal mato-grossense, Teixeira et al. (2015a) obtiveram médias para o ano de 2012 iguais a $1,46 \text{ mm dia}^{-1}$ para as áreas que representam o Cerrado e a formação de florestas, e $1,47 \text{ mm dia}^{-1}$ em áreas de pastagem e modificadas antropicamente. Diferente foram os resultados encontrados na bacia de Cabaceira

Comprida, em Santa Fé do Sul-SP, por Coaguila et al. (2017), no ano de 2015, apresentando médias de ET_r iguais a $1,32 \text{ mm dia}^{-1}$ nas áreas que apresentam florestas remanescentes e plantas invasoras, e $1,03 \text{ mm dia}^{-1}$ nas regiões em que se encontram pastagem, culturas anuais e perenes. Teixeira et al. (2016a) estimaram a ET_r em áreas com AI nos municípios do noroeste do Estado de São Paulo entre os meses de maio de 2013 a outubro de 2014, obtendo média igual a $1,40 \text{ mm dia}^{-1}$. Em áreas com cultivo de cana-de-açúcar no interior do Estado de São Paulo, Teixeira et al. (2016b) registraram, nos anos de 2011 e 2012, médias iguais a 2,03 e $3,22 \text{ mm dia}^{-1}$, nesta ordem. Em diferentes níveis de degradação de pastagem, na bacia hidrográfica do Alto Tocantins, Estado de Goiás, Andrade et al. (2016) realizaram uma escala temporal entre os anos de 2002 e 2012, obtendo média de ET_r igual a $1,47 \text{ mm dia}^{-1}$.

5.4 Comportamento da biomassa (BIO) no Perímetro Irrigado Pontal Sul

Considerando a forte ligação entre a BIO e a ET_r , nos intervalos em que a ET_r é mais elevada a BIO também o será (TEIXEIRA et al., 2016a), devido a sua vulnerabilidade a ação das chuvas, a radiação solar global e a concentração de umidade no solo (CLAVERIE et al., 2012). Conforme Teixeira et al. (2016a), a produção de BIO é favorecida pela radiação fotossinteticamente ativa (PAR), ou seja, quanto maior a disponibilidade de água e os índices de RG, maior será a produção de BIO.

As elevadas médias de BIO encontradas na estação de chuvas estão relacionadas ao acumulado de P neste período, conferindo uma concentração elevada de umidade no solo, associadas às altas médias de RG. No final da estação de chuvas, o solo apresenta umidade que é facilmente disponível para a vegetação, atingindo médias de BIO elevadas, de maneira que até o mês de julho, esta umidade diminui, dando início a estação seca. Neste período, o acumulado de P é praticamente nulo com baixos índices de RG, apresentando picos isolados de BIO provenientes de chuvas eventuais. Setembro e outubro são considerados os meses com maior déficit hídrico e RG abaixo da média anual. No início da estação de chuvas, por apresentar acumulado de P e limites de RG expressivos, as médias de BIO se encontram elevadas na maioria dos anos estudados.

No Perímetro Irrigado Pontal Sul, entre os anos de 2000 a 2015, as médias anuais de BIO apresentaram variações que foram de 9,95 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2013 a 66,48 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2009, com média geral igual a 30,73 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Em pesquisas realizadas no Semiárido, resultados próximos aos aqui encontrados no Perímetro Irrigado Pontal Sul podem ser citados, como o desenvolvido por Teixeira e Leivas (2017), em Juazeiro-BA no ano de 2014, avaliando a BIO na estação de chuvas, final da estação de chuvas e estação seca. Foram obtidas médias iguais a 30,00, 39,00, 6,00 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, com média anual igual a 25 kg ha⁻¹ dia⁻¹. No Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Petrolina - PE e Casa Nova - BA, Teixeira et al. (2015b) encontraram, entre os anos de 2013 e 2014, média mínima de 43 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no mês de outubro de 2013 e máxima de 105 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no mês de janeiro. Teixeira et al. (2013) estimaram a BIO para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro – BA, obtendo médias anuais iguais a 52,53 e 35,49 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente para os dois municípios. No ano de 2011, no município de Petrolina-PE, Teixeira et al. (2012) registraram média anual de BIO igual a 52,53 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Teixeira et al. (2009), utilizando o SEBAL para a estimativa da BIO na bacia do baixo-médio Rio São Francisco, no ano de 2003, obtiveram média anual variando entre 38,36 a 93,12 kg ha⁻¹ dia⁻¹.

Em regiões distintas, pesquisas desenvolvidas apresentaram resultados próximos aos evidenciados neste trabalho. A estimativa de BIO realizada por Coaguila et al. (2017) na Bacia Hidrográfica de Cabaceira Comprida, no município de Santa Fé do Sul - SP em 2015, sob diferentes usos da terra, registraram valores que variaram entre 5,50 kg ha⁻¹ dia⁻¹ e 64,21 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, para a estação de seca e estação de chuvas. Coaguila, Hernandez e Teixeira (2015), diante dos diferentes usos da terra na microbacia do Córrego da Mula, localizado no mesmo município, computaram médias de BIO iguais a 9,17, 52,19 e 10,98 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, para os meses de setembro de 2013, março e setembro de 2014. No noroeste do Estado de São Paulo, nos anos de 2013 e 2014, Teixeira et al. (2016b) obtiveram médias máxima e mínima de BIO iguais a 55 e 11 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para os meses de dezembro e setembro do ano de 2013, respectivamente, e médias iguais a 79 e 18 kg ha⁻¹ dia⁻¹ nos meses de janeiro e outubro de 2014, nesta ordem. Na bacia do Rio Tietê, nos anos de 2013 e 2014, Franco et al. (2016) encontraram médias de BIO iguais a 61,4 e 48,52 mm dia⁻¹, respectivamente.

Para os diferentes usos e ocupação do solo, tratando-se das áreas de VN e AI, as médias anuais máximas e mínimas de BIO variaram em diferentes períodos. A área de VN apresentou médias anuais que variaram de 9,28 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2013 a 65,95 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2009, com média total de 30,50 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Esses resultados são próximos aos encontrados para a área do perímetro como um todo, pois VN representa 96,88% da área total. A área de AI apresentou variações desde 22,62 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2003 a 94,27 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no ano de 2009, com média geral igual a 55,91 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Tais valores estão relacionados a disponibilidade frequente de água ao longo dos anos em estudo, proporcionada regularmente pela irrigação, mas no ano de 2003 a prática da irrigação ainda não era presente no perímetro, justificando a média registrada para este ano. Conforme Teixeira et al (2016b), o ganho de BIO pode ser conseguido por meio de aperfeiçoamentos no uso de fontes naturais, como na interceptação da RG e na gestão de águas.

Pesquisas sob diferentes usos do solo no Semiárido apresentaram resultados semelhantes aos reportados neste trabalho. No ano de 2014, Teixeira e Leivas (2017) registraram médias anuais iguais a 8,00 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para a área de VN e 115,00 kg ha⁻¹ dia⁻¹ para AI no município de Juazeiro-BA. Teixeira et al. (2015b) encontraram médias anuais de BIO para as áreas de VN e AI iguais a 65,00 e 100 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, para o ano de 2014, no Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Casa Nova - BA e Petrolina - PE. Teixeira et al. (2013) estimaram a BIO para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro - BA, obtendo médias anuais respectivas das áreas de VN e AI iguais a 27,04 e 78,03 mm dia⁻¹, e 12,63 e 63,84 mm dia⁻¹ nesta ordem para os dois municípios. Teixeira et al. (2012) registraram médias anuais de 27,04 e 78,03 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no município de Petrolina-PE, para as áreas de VN e AI, respectivamente, no ano de 2011. Teixeira et al. (2009), utilizando o SEBAL para a estimativa da BIO na bacia do baixo-médio Rio São Francisco, para o ano de 2003, obtiveram médias anuais para áreas cultivadas com videira e mangueira irrigadas alternando entre 137 a 273,97 kg ha⁻¹ dia⁻¹ e 82,19 a 273,97 kg ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente.

Nas diferentes regiões do país, as médias de BIO obtidas em pesquisas de larga escala apresentaram resultados equivalentes. Teixeira et al. (2016a) encontraram

médias de BIO em áreas com AI, nos municípios do noroeste do Estado de São Paulo, entre os meses de maio de 2013 a outubro de 2014, igual a $43,00 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. Em áreas com cultivo de cana-de-açúcar no interior do Estado de São Paulo, Teixeira et al. (2016b) registraram, nos anos de 2011 e 2012, médias iguais a 81,67 e $162,89 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, nesta ordem. No entanto, os resultados encontrados nesse trabalho diferiram do desenvolvido por Coaguila et al. (2017), para o ano de 2015 sob diferentes usos da terra na Bacia Hidrográfica de Cabaceira Comprida, município de Santa Fé do Sul - SP, que computaram médias de iguais a $51,87 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nas áreas que apresentam florestas remanescentes e plantas invasoras, e $36,49 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ nas regiões em que se encontram pastagem, culturas anuais e perenes. Andrade et al. (2016) realizaram uma escala temporal entre os anos de 2002 e 2012, em diferentes níveis de degradação de pastagem, na bacia hidrográfica do Alto Tocantins, Estado de Goiás, e encontraram uma média de BIO igual a $77,54 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

5.5 Comportamento da produtividade da água (WP) no Perímetro Irrigado Pontal Sul

A WP é vinculada aos dados de BIO e pela quantidade de água presente na superfície (umidade do solo), seja ela oriunda de chuvas, de escoamento superficial ou de irrigação (MOLDEN et al., 2010). Há diferentes indicadores para a WP, como o tipo de solo, a ET_r e a transpiração real, associados a dados de produção de BIO (TEIXEIRA; BASSOI, 2009). A estreita relação da ET_r e da BIO com a WP explicam suas médias elevadas na estação de chuvas que, como dito anteriormente, estão relacionadas ao acumulado de P neste período, conferindo uma concentração elevada de umidade no solo, associadas às altas médias de RG. No final da estação de chuvas ainda houve uma concentração significativa de umidade do solo facilmente disponível para a vegetação, atingindo médias superiores de WP, de maneira que até o mês de julho, essa umidade do solo se esgota, dando início à estação seca. Neste período, o acumulado de P é praticamente nulo com baixos índices de RG, apresentando picos isolados de WP provenientes de chuvas eventuais. Setembro e outubro são considerados os meses com maior déficit hídrico e RG abaixo da média anual. No início da estação de chuvas, por apresentar

acumulado de P e limites de RG expressivos, as médias de WP se encontram elevadas na maioria dos anos estudados.

Durante os 16 anos estudados, o Perímetro Irrigado Pontal Sul apresentou uma diversificação das médias anuais de WP que foram de 1,54 kg m⁻³ no ano de 2013 a 2,79 kg m⁻³ no ano de 2009, com média geral igual a 2,07 kg m⁻³. Estudos desenvolvidos em regiões próximas ao perímetro reportaram resultados semelhantes. No município de Juazeiro-BA, Teixeira e Leivas (2017) avaliando o desempenho da WP para o ano de 2014 com imagens Landsat-8 representativas para a estação de chuvas, final da estação de chuvas e estação seca, determinaram médias iguais a 1,60, 2,20 e 0,60 kg m⁻³, respectivamente, com média anual de 1,47 kg m⁻³. No Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Petrolina - PE e Casa Nova - BA, Teixeira et al. (2015b) avaliaram a WP nas estações de chuvas, final da estação de chuvas e estação seca do ano de 2014, computando médias iguais a 2,65, 2,85 e 1,80 kg m⁻³, respectivamente, e apresentando média anual igual a 2,43 kg m⁻³. No ano de 2001, Teixeira et al. (2013) estimaram a WP para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro – BA, obtendo médias anuais iguais a 1,70 e 1,40 kg m⁻³, respectivamente para os dois municípios. Teixeira et al. (2012) realizou a estimativa da WP para o município de Petrolina-PE, durante o ano de 2011, obtendo média anual de 2,29 kg m⁻³. Utilizando o SEBAL para a estimativa da WP na bacia do baixo-médio Rio São Francisco, Teixeira et al. (2009) computaram, no ano de 2003, média anual igual a 1,72 kg m⁻³.

Em pesquisas realizadas em outras regiões, os resultados foram equivalentes aos reportados neste trabalho. Na bacia hidrográfica de Cabaceira Comprida, no município de Santa Fé do Sul – SP, Coaguila et al. (2017) estimaram a WP sob diferentes usos da terra no ano de 2015, obtendo valores que variam entre 2,17 e 4,16 kg m⁻³, respectivamente, para o período seco e período de chuvas. No mesmo município, diante de diferentes usos da terra na microbacia do Córrego da Mula, Coaguila, Hernandez e Teixeira (2015) computaram médias iguais a 1,73 kg m⁻³ em setembro de 2013, e 3,39 e 1,34 kg m⁻³, respectivamente, para os meses de março e setembro de 2014. Teixeira et al. (2016a), na região noroeste do Estado de São Paulo, nos anos de 2013 e 2014, apresentaram médias máxima e mínima iguais a 2,90 e 1,30 kg m⁻³ para os meses de maio e setembro do ano de 2013,

respectivamente, e médias iguais a 2,80 e 1,00 kg m⁻³ nos meses de janeiro e outubro de 2014, respectivamente. Em pesquisa realizada na bacia do Rio Tietê, nos anos de 2013 e 2014, Franco et al. (2016) encontraram médias iguais a 1,15 e 1,20 kg m⁻³, respectivamente.

Com referência a cada uso e ocupação do solo, tratando-se das áreas de VN e AI, as médias anuais máximas e mínimas de WP alternaram em diferentes anos. A área de VN apresentou médias anuais variando de 1,52 kg m⁻³ no ano de 2013 a 2,78 kg m⁻³ no ano de 2009, com média total de 2,06 kg m⁻³. Tais resultados são próximos aos encontrados para a área do perímetro irrigado como um todo, devido ao tamanho da VN que representa 96,88% do total. Em relação a área de AI, a mesma apresentou variações de 1,45 kg m⁻³ no ano de 2000 a 3,20 kg m⁻³ no ano de 2009 com média geral igual a 2,43 kg m⁻³, médias estas relacionadas a disponibilidade frequente de água pela irrigação ao longo dos anos em estudo. Contudo, no ano de 2000, por apresentar um número limitado de imagens e pela prática da irrigação não ser presente neste ano, a média reduzida pode ser justificada. Para culturas irrigadas, os resultados de WP variam com o clima, o tipo de solo e com o período de cultivo (CHOOYOK et al., 2013).

Estimativas de WP sob diferentes usos do solo, desenvolvidas em regiões próximas ao Perímetro Irrigado Pontal Sul, encontraram resultados equivalentes aos evidenciados neste trabalho. Em Juazeiro-BA, no ano de 2014, Teixeira e Leivas (2017) registraram médias anuais iguais a 1,10 kg m⁻³ para a área de VN e 3,30 kg m⁻³ para AI. No Perímetro Irrigado Nilo Coelho, localizado entre os municípios de Casa Nova-BA e Petrolina-PE, Teixeira et al. (2015b) encontraram médias anuais de WP para as áreas de VN e AI iguais a 2,20 e 2,70 kg m⁻³, respectivamente, para o ano de 2014. No ano de 2001, Teixeira et al. (2013) estimaram a WP para municípios de Petrolina - PE e Juazeiro – BA, obtendo médias anuais respectivas das áreas de VN e AI iguais a 1,81 e 2,77 kg m⁻³, e 1,34 e 2,39 kg m⁻³ nesta ordem para os dois municípios. Teixeira et al. (2012), registraram médias anuais de 1,81 e 2,77 kg m⁻³ no município de Petrolina-PE, para as áreas de VN e AI, respectivamente, no ano de 2011. Teixeira et al. (2009), utilizando o SEBAL para a estimativa da WP na bacia do baixo-médio Rio São Francisco para o ano de 2003,

obtiveram médias anuais para áreas cultivadas com videira e mangueira irrigadas iguais a 2,16 e 1,27 kg m⁻³, respectivamente.

Em regiões distintas, os resultados foram semelhantes aos registrados no Perímetro Irrigado Pontal Sul. Teixeira et al. (2016a) estimaram a WP em áreas com AI nos municípios do noroeste do Estado de São Paulo entre os meses de maio de 2013 a outubro de 2014, obtendo média igual a 2,30 kg m⁻³. Tais resultados divergiram dos obtidos na bacia de Cabaceira Comprida, em Santa Fé do Sul-SP, por Coaguila et al. (2017), no ano de 2015, apresentando médias de WP iguais a 3,77 kg m⁻³ nas áreas que apresentam florestas remanescentes e plantas invasoras, e 3,23 kg m⁻³ nas regiões em que se encontram pastagem, culturas anuais e perenes. Em áreas com cultivo de cana-de-açúcar no interior do Estado de São Paulo, Teixeira et al. (2016b) registraram, nos anos de 2011 e 2012, médias iguais a 3,67 e 4,96 kg m⁻³, nesta ordem. Utilizando imagens dos satélites Indian Remote Sensing (IRS) e Quickbird, por meio do modelo *simplified surface energy balance* (SSEB), para a estimativa da WP na cultura do algodão na Ásia Central, Cai et al. (2009) registraram médias iguais a 0,285 e 0,289 kg m⁻³ para os respectivos satélites no ano de 2006. Utilizando a covariância de Eddy para o município de Luiz Antônio-SP, Cabral et al. (2013) obtiveram uma média de WP para dois ciclos da cana-de-açúcar com valor igual a 4,2 kg m⁻³. No Sugarcane Research Institute (SASRI), na África do Sul, Eksteen, Single e Ngxaliwe (2014) alcançaram resultados de WP, para duas variedades de cana-de-açúcar, com valor igual a 5,80 e 7,80 kg m⁻³.

6 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados pelo algoritmo SAFER foram satisfatórios para o período estudado, possibilitando o processamento simplificado de dados em grande quantidade e a representação da totalidade da área do Perímetro Irrigado Pontal Sul.

A estimativa da ET_r , bem como da BIO e da WP entre os anos de 2000 a 2015 foram de grande importância para a compreensão da atividade climática no Perímetro Irrigado Pontal Sul, associando suas variações a mudanças no uso e ocupação do solo. Os resultados obtidos para BIO e WP são dependentes do desempenho apresentado pela ET_r que, de modo geral, são sujeitas as condições de umidade do solo proporcionada pelas chuvas ou via irrigação, assim como a intensidade da radiação solar global sobre a superfície terrestre.

A redução da vegetação natural ocasionou degradação do solo, reduzindo a sua função de estoque de água, principalmente para a estação seca. A área de agricultura irrigada apresentou uma constante evolução durante o período estudado, proporcionando um incremento nas médias de ET_r , BIO e WP, destacando-se na estação seca, devido as condições de umidade do solo possivelmente proporcionada pela irrigação.

O uso de técnicas de sensoriamento remoto aliado a dados agrometeorológicos são meios fundamentais e indispensáveis para o manejo da irrigação e planejamentos agrícolas no Perímetro Irrigado Pontal Sul, possibilitando estimar ET_r , BIO e WP, que permitem compreender de maneira mais ampla a demanda hídrica em escala regional no decorrer do período estudado, relacionando seus resultados aos efeitos causados pelo uso e ocupação da terra e as mudanças climáticas da região.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 26, p. 4011–4027, 2011.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO. **Irrigation and Drainage**, v. paper 56, n. 9, p. 318, 1998.

ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007.

ALLEN, R. G.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Surface energy balance algorithms for land: advance training and user's manual. Version 1.0. **Surface Energy Balance Algorithms for Land: Advance training and users manual**, 2002.

ALVES, M. DE C.; SANCHES, L.; NOGUEIRA, J. DE S.; SILVA, V. A. M. Effects of sky conditions measured by the clearness index on the estimation of solar radiation using a digital elevation model. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 3, n. 04, p. 618, 2013.

AMAZONAS, I. B. do; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; LIMA, J. R. de S.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Avaliação da Evapotranspiração de Pastagem pelo Método do Domo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 716-723, 2014.

ANDRADE, R. G.; TEIXEIRA, A. H. D. C.; LEIVAS, J. F.; NOGUEIRA, S. F. Analysis of evapotranspiration and biomass in pastures with degradation indicatives in the Upper Tocantins River Basin, in Brazilian Savanna. **Revista Ceres**, v. 63, n. 6, p. 754-760, 2016.

ARAÚJO, A. L. **Operacionalização do Balanço de Energia e Evapotranspiração em escala regional com dados de sensores orbitais**. 101f. Tese (Doutorado em Meteorologia) Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

ARAUJO, G. L.; MANTOVANI, E. C.; VIEIRA, G. H. S.; COSTA, M. S. Modelos para a estimativa da produção de biomassa aplicados à cultura do milho. **Revista Pensar Acadêmico**, v. 12, n. 1, p. 43-56, 2015.

ARAÚJO-FILHO, M. da C.; MENESES, P. R.; SANO, E. E. Sistema de classificação de uso e cobertura da terra com base na análise de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, n. 2, 2007.

AVERY, T. E.; BERLIN, G. L. L. **Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation**. 5^o ed. New Jersey: Prentice Hall, 1992.

BASTIAANSSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 273f. Tese de Doutorado. Ph. D. (Thesis)-Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of hydrology**, v. 229, n. 1, p. 87-100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. **Journal of hydrology**, v. 212–213, p. 198–212, 1998a.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G., THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85–93, 2005.

BASTIAANSSEN, W. G. M; ALI, S. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 94, n. 3, p. 321-340, 2003.

BORMA, L. S.; DA ROCHA, H. R.; CABRAL, O. M.; VON RANDOW, C.; COLLICCHIO, E.; KURZATKOWSKI, D.; BRUGGER, P. J.; FREITAS, H.; TANNUS R.; OLIVEIRA, L.; RENNÓ, C. D.; ARTAXO, P. Atmosphere and hydrological controls of the evapotranspiration over a floodplain forest in the

Bananal Island region, Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, n. G01003, 2009.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, v. 27, p. 779–787, 1926.

BRITO, L. T. de L.; CAVALCANTI, N. de B.; SILVA, A. de S.; PEREIRA, L. A. Produtividade da água de chuva em culturas de subsistência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 102-109, 2012.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the Atmosphere. Dordrecht: D Reidel Publishing Company. 1982.

BURROUGH, P. A. Principles of geographical information systems for land resources assessment. 1986.

CABRAL, O. M.; ROCHA, H. R.; GASH, J. H.; LIGO, M. A.; RAMOS, N. P., PACKER, A. P.; BATISTA, E. R. Fluxes of CO₂ above a sugarcane plantation in Brazil. **Agricultural and forest meteorology**, v. 182, p. 54-66, 2013.

CAI, X.; ROSEGRANT, M. W. World Water Productivity: Current Situation and Future Options. **Water Productivity in Agriculture**, p. 163, 2003.

CAI, X.; THENKABAIL, P. S.; BIRADAR, C. M.; PLATONOV, A.; GUMMA, M.; DHEERAVATH, V.; COHEN Y.; GOLDSHLEGER N.; BEN-DOR E.; ALCHANATIS V.; VITHANAGE J.; MARKANDU A. Water productivity mapping using remote sensing data of various resolutions to support. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 3, n. 1, p. 033557, 2009.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CAMPOS, A. T.; CAMPOS, A. T. DE. Balanços energéticos agropecuários: uma importante ferramenta como indicativo de sustentabilidade de agroecossistemas. **Ciência Rural**, v. 34, n. 6, p. 1977–1985, 2004.

CAMPOS, S.; SORES, M. C. E.; CAVASINI, R.; GRANATO, M.; MASHIKI, M. Y.; RUGGIERO, J.; MOREIRA, K. F.; BARROS, Z. X. de. SIG aplicado na análise do

conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente numa microbacia.

Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, p. 65-73, 2010.

CARVALHO, D. F. de; ROCHA, H. S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A. P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 1, p. 1-11, 2015.

CARVALHO, H. de P.; DOURADO NETO, D.; TEODORO, R. E. F.; MELO, B. de. Balanço hídrico climatológico, armazenamento efetivo da água no solo e transpiração na cultura de café. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, p. 221–229, 2011a.

CARVALHO, L. G. de; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011b.

CHOOYOK, P.; PUMIJUMNOG, N.; USSAWARUJIKULCHAI, A. The water footprint assessment of ethanol production from molasses in Kanchanaburi and Supanburi province of Thailand. **APCBEE Procedia**, v. 5, p. 283-287, 2013.

CHOUDHURY, B. J.; REGINATO, R. J.; IDSO, S. B. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 37, n. 1, p. 75-88, 1986.

CLARK, M. L.; AIDE, T. M.; GRAU, H. R.; RINER, G. A scalable approach to mapping annual land cover at 250 m using MODIS time series data: A case study in the Dry Chaco ecoregion of South America. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 11, p. 2816–2832, 2010.

CLAVERIE, M. Ç; DEMAREZ, V.; DUCHEMIN, B.; HAGOLLE, O.; DUCROT, D.; MARAISSICRE, C.; DEJUOUX, JEAN-FRANÇOIS; HUC, M.; KERAVEC, P.; BÉZIAT, P.; FIEUZAL, R.; CESCHIA, E.; DEDIEU, G. Maize and sunflower biomass estimation in southwest France using high spatial and temporal resolution remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**, v. 124, p. 844-857, 2012.

COAGUILA, D. N.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H de C. Estacionalidade da evapotranspiração e produtividade da água na microbacia do córrego da Mula em Santa Fé do Sul-SP. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 9, n. 4, p. 232, 2015.

COAGUILA, D. N.; HERNANDEZ, F. B.; TEIXEIRA, A. H. D. C.; FRANCO, R. A.; LEIVAS, J. F. Water productivity using SAFER-Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 524-529, 2017.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). Concessão patrocinada do projeto público de irrigação "Pontal". 2007. Disponível em: < <http://ppp-projetopontal.codevasf.gov.br/licitacoes/ppp-projetopontal>>. Acesso em 13 de março de 2017.

Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF). Novo perímetro irrigado do Vale do São Francisco tem ritmo de implantação acelerado. Brasília, DF, 2014. Disponível em:< <http://www.codevasf.gov.br/principal/perimetrosirrigados/elenco-de-projetos/pontal>>. Acesso em: 21 de jun. de 2017.

CORRÊA, R. M.; FREIRE, M. B. G. dos S.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M.; MIRANDA, M. A.; MELO, D. V. M. de. Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 2, 2009.

CORREIA, J. de S. **Uso da terra e infiltração de água no solo no Perímetro de Irrigação Pontal Sul**. 2016. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu-SP, 2016.

CORREIA, R. C.; KIILL, L. H. P.; MOURA, M. S. B. DE; CUNHA, T. J. F.; JUNIOR, J.; ARAÚJO, J. L. P. A região semiárida brasileira. **Embrapa Semiárido** (ALICE), 48p., 2011.

COSTA, M. C. Evapotranspiração regional utilizando o SEBAL em condições de relevo montanhoso. **Primeira Versão**, v. 1, n. 122, p. 12, 2003.

COSTA, T. C.; OLIVEIRA, M. A. de; ACCIOLY, L. J. D. O.; SILVA, F. H. da. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 961-974, 2009.

COURAULT, D.; SEGUIN, B.; OLIOSO, A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: From empirical to numerical modeling approaches. **Irrigation and Drainage systems**, v. 19, n. 3-4, p. 223-249, 2005.

CRUZ-BLANCO, M.; LORITE, I. J.; SANTOS, C. An innovative remote sensing based reference evapotranspiration method to support irrigation water management under semi-arid conditions. **Agricultural Water Management**, v. 131, p. 135–145, 2014.

DEFRIES, R.; ACHARD, F.; BROWN, S.; et al. Earth observations for estimating greenhouse gas emissions from deforestation in developing countries. **Environmental Science & Policy**, v. 10, n. 4, p. 385–394, 2007.

DESCHEEMAER, K.; BUNTING, S. W.; BINDRABAN, P.; MUTHURI, C.; MOLDEN, D.; BEVERIDGE, M.; BRAKEL, M. van; HERRERO, M.; CLEMENT, F.; BORLEE, E.; Jarvis, D. I. Increasing water productivity in agriculture. **Managing Water and Agroecosystems for Food Security**, v. 10, p. 104, 2013.

DIMRI, S.; BALUNI, P.; SHARMA, C. M. Growing stock of various broad-leaved and conifer forests of Garhwal Himalaya. **International Journal of Conservation Science**, v. 5, n. 4, 2014.

DONHA, A. G.; SOUZA, LC de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 175-181, 2006.

EASTMAN, J. R. Idrisi for Windows, User's Guide, Version 2.0, Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. **Clark University**, Worcester, 1997.

EKSTEEN, A.; SINGELS, A.; NGXALIWE, S. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. **Field Crops Research**, v. 168, p. 86-100, 2014.

ELEKALACHI, C. I.; NWOKOYE, A. O. C.; EZENWA, I. A.; OKOLI, N. L. Estimation of Global Solar Radiation from Monthly Mean Sunshine Hour Data in Some Cities in South Eastern Zone of Nigeria. **Physics Journal**, v. 2, no. 2, p. 96-103, 2016.

FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimativa do estoque de biomassa em um fragmento florestal usando imagens orbitais. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 3, p. 286-296, 2014.

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.

FLORENZANO, T. G. Geotecnologias na geografia aplicada: difusão e acesso. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 17, p. 24–29, 2005.

FOKEN, T.; WIMMER, F.; MAUDER, M.; THOMAS, C.; LIEBETHAL, C. Some aspects of the energy balance closure problem. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 6, n. 12, p. 4395–4402, 2006.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R.; ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKOWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global Consequences of Land Use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 3, p. 403–410, 1991.

FRANCO, R. A. M.; HERNANDEZ, F. B. T.; TEIXEIRA, A. H. de. C.; LEIVAS, J. F.; COAGUILA, D. N.; NEALE, C. M. Water productivity mapping using Landsat 8 satellite together with weather stations. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII. **Anais...** p. 99981H-1, 2016.

FREITAS, D. A. F. de; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 417-428, 2012.

FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, v. 158, p. 281–294, 2015.

GOMES, H. B. **Balanços de radiação e energia em áreas de cultivo de cana-de-açúcar e Cerrado no Estado de São Paulo mediante imagens orbitais.** 108f. Tese (Doutorado em Meteorologia) Campina Grande - PB: Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

HAMADA, E.; GONÇALVES, R. R. do V. Introdução ao geoprocessamento: princípios básicos e aplicação. **Embrapa Meio Ambiente.** Documentos, 2007.

HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. de C.; TAGHVAEIAN, S. Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the northwest of Sao Paulo State, Brazil. **Acta Horticulturae**, v. 1038, p. 263-270, 2014.

HIGUCHI, N.; MINETTE, L.; SANTOS, J. dos; RIBEIRO, R. J.; BIOT, Y. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, n. 28, v. 2, p. 153-166, 1998.

HUO, Z.; DAI, X.; FENG, S.; KANG, S.; HUANG, G. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. **Journal of Hydrology**, v. 492, p. 24-34, 2013.

ILWIS 3.4 Open–Integrated Land and Water Information System. **ILWIS.** Versão 3.4. 2007. Disponível em: < <http://www.ilwis.org/>>. Acesso em: 28 de maio de 2016.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Biomas e vegetação. 2004. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>>. Acesso em: 17 de nov. de 2016.

IZUKA, Scot K.; GIAMBELLUCA, Thomas W.; NULLET, Michael A. **Potential Evapotranspiration on Tutuila, American Samoa**. US Department of the Interior, US Geological Survey, 2005.

JHORAR, R. K.; SMIT, A. A. M. F. R.; BASTIAANSEN, W. G. M.; ROEST, C. W. J. Calibration of a distributed irrigation water management model using remotely sensed evapotranspiration rates and groundwater heads. **Irrigation and Drainage**, v. 60, n. 1, p. 57–69, 2009.

KIILL, L. H. P. Flora. In: SOUZA, A.V. DE; CAMPECHE, D. F. B.; ARAÚJO, F. P. DE; SÁ, I. B.; ALVAREZ, I. A.; MOREIRA, J. N.; PETRERE, V. G.; KIILL, L. H. P.; PEREIRA, L. A.; BRITO, L. T. L.; MOURA, M. S. B. DE; RIBEIRO, M. DE F.; DRUMOND, M. A.; MELO, R. F. DE; TAURA, T. A.; CUNHA, T. J. F. **Árvore do Conhecimento do Bioma Caatinga**. Embrapa Semiárido. 2012. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/bioma_caatinga/arvore/CONT000fx t42i5k02wyiv804u7ypccpiahjr.html>. Acesso em: 17 de ago. de 2016.

KING, M.; HERRING, D. **Research Satellites for Atmospheric Science, 1978-Present**. 2001. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RemoteSensingAtmosphere/>>. Acesso em: 21 de jul. de 2016.

KLOSOWSKI, E. S.; GALVANI, E. Estimativas de Evapotranspiração Potencial para a região de Maringá: estudo comparativo entre os métodos do Tanque Classe “a”, Thornthwaite, Camargo e Penman simplificado. **Revista UNIMAR**, v. 19, n. 4, p. 1113–1124, 1997.

LAMBIN, E. F.; GEIST, H. J.; LEPERS, E. Dynamics of land-use and land-cover change in tropical regions. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 28, n. 1, p. 205–241, 2003.

LIMA JÚNIOR, C. D., ACCIOLY, L. J. de O., GIONGO, V., LIMA, R. L. F. de A., SAMPAIO, E. V. de S. B.; MENEZES, R. S. C. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 102, p. 289-298, 2014.

LIMA, G. S. **Caracterização físico-hídrica do solo do Perímetro Irrigado Pontal Sul por funções de pedotransferência**. 2016. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu-SP, 2016.

LUO, X.; WANG, K.; JIANG, H.; SUN, J.; XU, J.; ZHU, Q.; LI, Z. Advances in research of land surface evapotranspiration at home and abroad. **Sciences in Cold and Arid Regions**, v. 2, n. 2, p. 104–111, 2010.

MA, X.; HIYAMA, T.; FUKUSHIMA, Y.; HASHIMOTO, T. A numerical model of the heat transfer for permafrost regions. **Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources**, v. 11, n. 4, p. 346-359, 1998.

MALDONADO, F. D.; SANTOS, J. R.; GRAÇA, P. M. L. Change detection technique based on the radiometric rotation controlled by no-change axis, applied on a semi-arid landscape. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 8, p. 1789–1804, 2007.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, p. 384-422, 2011.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, p. 31-39, 1992.

MÄTZLER, C. **Physical Principles of Remote Sensing**. Bern, Switzerland: Institut für Angewandte Physik, Universität Bern, 2008.

MELLO, C. R. de; LIMA, J. M. de; SILVA, A. M. da. Evapotranspiração em microbacia hidrográfica de fluxo efêmero associada à umidade do solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p. 95-102, 2004.

MENDOZA, C. J. C.; MENEZES, R. H. N. Estimativa da Evapotranspiração de Referência para o Município de São Luís – MA. In: II Inovagri International Meeting. **Anais...** p.3694–3702, 2014.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília-DF: CNPQ, UNB. 2012. Disponível em: <http://www.academia.edu/download/33333156/MENESES__ALMEIDA_2012_INTRO_AO_PROCESSAMENTO_DE_IMAGEM.pdf>. Acesso em: 21 de jul. de 2016.

MENESES, P. R.; NETO, J. S. M. **Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais**. 1º ed. Brasília-DF: Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Áreas Prioritárias para Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira. **Série Biodiversidade**, v. 31. Brasília: MMA, 2007.

MOAYERI, M.; SIADAT, H.; PAZIRA, E.; ABBASI, F.; KAVEH, F.; OWEIS, T. Y. Assessment of maize water productivity in southern parts of the Karkheh river basin, Iran. **World Applied Sciences Journal**, v. 13, n. 7, p. 1586-1594, 2011.

MOLDEN, D.; OWEIS, T.; STEDUTO, P.; BINDRABAN, P.; HANJRA, M. A.; KIJNE, J. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 528-535, 2010.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of applied ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: UFV, 2007.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M. M. Evapotranspiração de

referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco-Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 2, p. 181–191, 2013.

MOURA, M. S. B. de; GALVINCIO J.; BRITO, L. D. L.; SOUZA, L. D.; SÁ, I.; SILVA, T. G. F da. Clima e água de chuva no Semi-Árido. In: BRITO, L. T. de L.; MOURA, M. S. B. de; GAMA, G. F. B. (Ed.). **Potencialidades da água de chuva no Semi-Árido brasileiro**. Petrolina: Embrapa Semi-Árido, Cap. 2, p. 37-59, 2007.

MURIITHI, F. K. Land use and land cover (LULC) changes in semi-arid sub-watersheds of Laikipia and Athi River basins, Kenya, as influenced by expanding intensive commercial horticulture. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 3, p. 73-88, 2016.

NAE (Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República). Mudança do clima: Negociações internacionais sobre a mudança do clima/ vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima. Vol. 1. **Cadernos NAE 3**, Secretária de Comunicação de Governo e Gestão, Brasília, 2005

NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. S. approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 77, n. 3, p. 263-293, 1995.

OLIVEIRA, S. C.; AMARAL, R. C.; ALMEIDA, K. C. de B.; PINTO, C. C. Qualidade das águas superficiais do Médio São Francisco após a implantação dos perímetros irrigados de Gorutuba/Lagoa Grande e Jaíba. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 22, n. 4, p. 711-721, 2017.

PAZ, M. R.; FRANÇA, F. A.; LOCH, C. A importância da adoção de técnicas de geoprocessamento no planejamento agroecológico de propriedades rurais familiares. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, 2009.

PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Jour Agric Sci**, v. 4, n. 1, p. 9-29, 1956.

PERES, J. G.; BOSCHI, R. S.; SOUZA, C. F.; MENDONÇA, T. G. Produtividade da água para seleção de cultivares de alface. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 59-65, 2016.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS**. Versão 2.18.1. 2017. Disponível em <<http://www.qgis.org/en/site/>>. Acesso em 07/05/2017.

RAMOS, C. M. C. **Variabilidade espacial e temporal de fatores edafoclimáticos na bacia do Rio Pontal, Pernambuco**. 2012. 68 f. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - UNESP, Botucatu, 2012.

REDDY, S. J. The estimation of global solar radiation and evaporation through precipitation—a note. **Solar energy**, v. 38, n. 2, p. 97-104, 1987.

ROCCHINI, D.; NETELER, M. Let the four freedoms paradigm apply to ecology. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 27, p. 310–311, 2012.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 25, n. 2, p. 147-157, 2000.

RUHOFF, A. L.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; ARAGAO, L. E.; ROCHA, H. R.; MALHI, Y. S. A MODIS-Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days in Brazilian Tropical Savannas. **Remote Sensing**, v. 4, n. 12, p. 703–725, 2012.

SCHERER-WARREN, M. Desmembramento de estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto nas componentes de evaporação e transpiração vegetal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 361-373, 2012.

SCOTT, C. A.; BASTIAANSSEN, W. G.; AHMAD, M. U. D. Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 5, p. 326-335, 2003.

SCOTT, D. F.; PRINSLOO, F. W.; MOSES, G.; MEHLOMAKULU, M.; SIMMERS, A. D. A. A re-analysis of the south african catchment afforestation experimental data. **Water Research Commission**, Pretoria, Report, v. 810, n. 1, p. 1-138, 2000.

SELLERS, P. J.; MEESON, B. W.; HALL, F. G., ASRAR, G.; MURPHY, R. E.; SCHIFFER, R. A.; BRETHERTON, F. P.; DICKINSON, R. E.; ELLINGSON, R. G.; FIELD, C. B.; HUEMMIRICH, K. F.; JUSTICE, C. O.; MELACK, J. M.; ROULET, N. T.; SCHIMEL, D. S.; TRY, P. D. Remote sensing of the land surface for studies of global change: Models-algorithms-experiments. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 3-26, 1995.

SILVA, R. A.; SILVA, V. de P. R. da; CAVALCANTI, E. P.; SANTOS, D. N dos. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 5, 2010.

SONG, S.; GONG, W.; ZHU, B.; HUANG, X. Wavelength selection and spectral discrimination for paddy rice, with laboratory measurements of hyperspectral leaf reflectance. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 5, p. 672-682, 2011.

SOUZA, S. S.; TOMASELLA, J.; GRACIA, M. G.; AMORIM, M. C.; MENEZES, P. C. P.; PINTO, C. A. M. O Programa de monitoramento climático em tempo real na área de atuação da SUDENE – PROCLIMA **Boletim da Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25 n. 1, p. 15-24, 2001.

STISEN, S.; JENSEN, K. H.; SANDHOLT, I.; GRIMES, D. I. F. A remote sensing driven distributed hydrological model of the Senegal River basin. **Journal of Hydrology**, v. 354, n. 1–4, p. 131–148, 2008.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 6, n. 1, p. 85-100, 2002.

TEIXEIRA, A. H. de C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) using

remote sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.

TEIXEIRA, A. H. de C. Modelling evapotranspiration by remote sensing parameters and agro-meteorological stations. **Remote Sensing and Hydrology**, n. 352, p. 154–157, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C., SCHERER-WARREN, M., HERNANDEZ, F. B. T., ANDRADE, R. G., LEIVAS, J. F. Large-scale water productivity assessments with MODIS images in a changing semi-arid environment: a Brazilian case study. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5783-5804, 2013.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil – Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 462–476, 2009.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. U. D.; MOURA, M. D.; BOS, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. **Journal of Hydrology**, v. 362, n. 1, p. 110-127, 2008.

TEIXEIRA, A. H. de C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L. Application of Landsat images for quantifying the energy balance under conditions of land use changes in the semi-arid region of Brazil. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV*. **Anais...** . v. 8531, p.1–9, 2012.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F. Determinação da Produtividade da Água com Imagens Landsat 8 na Região Semiárida do Brasil. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 11, n. 1, p. 22-34, 2017.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Water productivity assessments with Landsat 8 images in the Nilo Coelho irrigation scheme. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 1-10, 2015b.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; HERNANDEZ, F. B. T.; FRANCO, R. A.; NUÑEZ, D. N. Evapotranspiration, biomass production and water productivity acquired from Landsat 8 images in the northwestern side of the São Paulo state, Brazil. In: Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII. **Anais...** p. 99981D, 2016b.

TEIXEIRA, A. H. de C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. de C. Sugarcane water productivity assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, v. 6, p. 84-95, 2016a.

TEIXEIRA, A. H. de C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. de C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation and energy balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14597-14619, 2015a.

TEIXEIRA, A. H. DE C; BASSOI, L. H. Crop water productivity in semi-arid regions: From field to large scales. **Annals of Arid Zone**, v. 48, n. 3, p. 285, 2009.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55–94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton, NJ: **Drexel Institute of Technology** - Laboratory of Climatology, vol. VIII, n. 1, p. 104, 1955.

THORNTHWAITE, C. W; WILM, H. G. Report of the Comite of evapotranspiration and transpiration, 1943-1944. Washington, D.C.: **Transaction of the American Geographic Union**, p. 686-693, 1944.

TONELI, C. A. Z.; CARVALHO, L. M. T. de; ACERBI JUNIOR, F. W. Utilização das imagens Landsat TM nas épocas de verão e inverno para classificação de diferentes formações vegetais. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** . p.3127–3134, 2009.

TRNKA, M.; EITZINGER, J.; KAPLER, P.; DUBROVSKÝ, M.; SEMERÁDOVÁ, D.; ŽALUD, Z.; FORMAYER, H. Effect of estimated daily global solar radiation

data on the results of crop growth models. **Sensors**, v. 7, n. 10, p. 2330-2362, 2007.

UDA, P. K.; CORSEUIL, C. W.; KOBIYAMA, M. Evapotranspiração Real da Bacia do Alto Rio Negro, Região Sul Brasileira, por meio do SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e Balanço Hídrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 1, p. 205–217, 2014.

USGS. **About MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)**. 2016c. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>>. Acesso em, 25 de jul. de 2016.

USGS. **Landsat 8 «Landsat Science**. 2016b. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3186>>. Acesso em, 25 de jul. de 2016.

USGS. **MODIS Overview**. 2014. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis>. Acesso em, 16 de out. de 2017.

USGS. **The Final Journey of Landsat 5: A Decommissioning Story**. 2013. Disponível em:< http://landsat.usgs.gov/L5_Decommission.php> Acesso em, 25 de jul. de 2016.

USGS. **The Thematic Mapper «Landsat Science**. 2016a. Disponível em: <<http://landsat.gsfc.nasa.gov/?p=3229>>. Acesso em, 25 de jul. de 2016.

USGS/ESA. **Landsat 8**. 2015. Disponível em: <<https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-3rd-party-missions/landsat-8>>. Acesso em, 25 de jul. de 2016.

VALIENTE, J. A., NUNEZ, M., LOPEZ-BAEZA, E., & MORENO, J. F. Narrow-band to broad-band conversion for Meteosat-visible channel and broad-band albedo using both AVHRR-1 and-2 channels. **Remote Sensing**, v. 16, n. 6, p. 1147-1166, 1995.

VILLA NOVA, N. A. **Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz.** Livre Docência, Piracicava: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1973.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 245p., 1975.

WANG, Y. Q.; XIONG, Y. J.; QIU, G. Y.; ZHANG, Q. T. Is scale really a challenge in evapotranspiration estimation? A multi-scale study in the Heihe oasis using thermal remote sensing and the three-temperature model. **Agricultural and Forest Meteorology.** p.1-14, 2016.

YU, L.; ZENG, Y.; SU, Z.; CAI, H.; ZHENG, Z. The effect of different evapotranspiration methods on portraying soil water dynamics and ET partitioning in a semi-arid environment in Northwest China. **Hydrology and Earth System Sciences,** v. 20, n. 3, p. 975-990, 2016.

ZHAN, X.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. An intercomparison study on models of sensible heat flux over partial canopy surfaces with remotely sensed surface temperature. **Remote Sensing of Environment,** v. 58, n. 3, p. 242-256, 1996.

ZHAO, P.; FOERSTER, T.; YUE, P. The geoprocessing web. **Computers & Geosciences,** vol. 47, p. 3 - 12, 2012.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. **Agricultural water management,** v. 69, n. 2, p. 115-133, 2004.