

SANTOS HENRIQUE BRANT DIAS

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA PROJETO DE
IRRIGAÇÃO NO BRASIL UTILIZANDO O PRODUTO MOD16**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

D541e
2018
Dias, Santos Henrique Brant, 1992-
Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação
no Brasil utilizando o produto MOD16 / Santos Henrique Brant
Dias. – Viçosa, MG, 2018.
viii, 75 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Fernando França da Cunha.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 70-74.

1. Evapotranspiração. 2. Sensoriamento remoto.
3. Inteligência artificial. 4. Irrigação agrícola. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

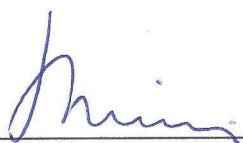
CDD 22. ed. 551.572

SANTOS HENRIQUE BRANT DIAS

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA PROJETO DE
IRRIGAÇÃO NO BRASIL UTILIZANDO O PRODUTO MOD16**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

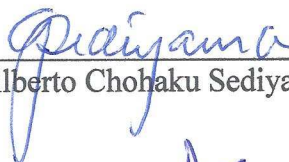
APROVADA: 22 de fevereiro de 2018.



Rubens Alves de Oliveira



Elpídio Inácio Fernandes Filho



Gilberto Chohaku Sedyama



Fernando França da Cunha
(Orientador)

A todos os amigos e familiares que tanto acreditaram em mim e apoiaram e acreditaram nos momentos mais difíceis, a minhas amadas tias do coração, ao meu grande avô, com quem aprendi a aproveitar ao máximo a vida. Aos meus pais, que tanto me prepararam para chegar onde cheguei.

DEDICO

AGRADECIMENTO

Todo o meu mérito deve ser atribuído às pessoas com quem convivi e compartilhei experiências pessoais e profissionais ao longo dos últimos anos e que tornaram a realização desta dissertação de mestrado possível e, de certa maneira, tão gratificante. Gostaria de agradecer especialmente às orientações que recebi, principalmente pelo auxílio nos momentos de dúvida, tanto pessoal como profissional.

A meus pais, Lilian Antunes Brant Dias e Wagner Danilo Santos Dias, meu irmão José dos Reis Dias Neto, minhas irmãs Fernanda Brant Dias e Sabrina Brant Dias, pelo amor incondicional e incentivo, contribuindo assim de forma significativa para o cumprimento desta etapa. A todos os meus familiares e amigos, pelo incentivo durante a realização do curso.

Aos meus amados avós José dos Reis Dias e Marieta Antunes Brant pelas excelentes conversas e estímulos, e in memória a Terezinha Auxiliadora Santos Dias e Sebastião Ferreira Brant.

A Gemima Santos Arcanjo por todo amor e companheirismo e principalmente pelas muitas horas corrigindo meus textos. Agradeço-te imensamente, não tenho palavras para explicar o quanto te devo!!!

As minhas amadas e queridas tias, Daianny, Kivany, Selma, Jannine e Rosana, que tanto me auxiliaram, amaram e me deram força. Nos momentos em que mais precisava e pela grande preocupação e amor comigo. Sem o seus apoios jamais conseguiria chegar onde cheguei.

Aos meus tios Alarico neto, Devay, Milton e Rogério.

Ao meu orientador, e grande profissional, o professor Fernando França da Cunha, pela amizade, confiança, paciência e a oportunidade de integrar o quadro discente de um excelente programa de pós-graduação, compartilhando comigo algumas de suas inúmeras ideias e grande parte de seu entusiasmo com a questão dos recursos hídricos e da vida.

Aos professores coorientadores Elpídio Inácio Fernandes Filho e Everardo Chartuni Mantovani, pela amizade, colaboração e assistência durante os trabalhos. Acho que não tenho nem o que falar e como agradecer ao Elpídio, pela gigantesca paciência e imensa vontade de ensinar tudo o que sabe, devo muito ao Elpídio, pois sem ele não seria quem sou hoje.

Aos professores orientados da graduação, Weyder Cristiano Santana e Reinaldo Bertola Cantarutti, pela amizade, ensinamentos e oportunidades que me deram.

Aos meus grandes amigos: Roberto Filgueiras, pela paciência em me mostrar os caminhos do conhecimento; a Gustavo Henrique, pelo companheirismo e trabalhos; a Jannaylton Éverton e Edcássio Dias, pelo companheirismo e inúmeras horas no GESAI; a Rodrigo Dal-Sasso, Daniel Althoff, Luan Peroni, Lucas Borges, Flávio Bastos, Vinicius Mendes, Dionei Lima, Francisco Cássio, Élvís da Silva, Jeffeson de Mesquita, Rafael Martins, Rafael Paes, Catariny Cabral.

E com certeza aqueles todos os amigos do grupo e da graduação que tanto me auxiliaram como pessoa e como profissional, que além da amizade, pela enorme colaboração no desenvolvimento.

Com certeza não poderia esquecer-me do Francisco Charles Santos Silva (Xicão) que tanto me ajudou a iniciar a publicação.

À minha banca de defesa da dissertação: Gilberto Chohaku Sedyama, Rubens Alves de Oliveira, Elpídio Inácio Fernandes Filho e Fernando França da Cunha. Que tiveram a paciência e interesse de ler todo o material e auxiliar no desenvolvimento desta dissertação.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais), pela oportunidade de realizar este treinamento.

Aos professores e funcionários do DEA, pelos ensinamentos e pela oportunidade de convívio diário.

A todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa para realização do curso.

BIOGRAFIA

SANTOS HENRIQUE BRANT DIAS, filho de Wagner Danilo Santos Dias e Lilian Antunes Brant, nasceu em Montes Claros, MG, em 25 de dezembro de 1992.

Em 2008, iniciou o ensino médio integrado ao Técnico em Agropecuária no Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG), em Januária, MG, onde descobriu o prazer de se trabalhar com agricultura, formando-se em dezembro de 2010.

Em 2011 iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, graduando-se em Janeiro de 2016.

Em março de 2016 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola UFV, em nível de Mestrado, área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, concluindo em fevereiro de 2018.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIAS	5
CAPÍTULO 1 - CALIBRAÇÃO DO PRODUTO MOD16 UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO BRASIL	8
RESUMO	8
CHAPTER 1 - CALIBRATION OF MOD 16 PRODUCT WITH MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN BRAZIL	9
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	12
2.1. Caracterização da área de estudo.....	12
2.2. Dados históricos BDMEP	13
2.3. Cálculo da ETo e preenchimento de falhas	14
2.4. O produto MOD16.....	15
2.5. Calibração de reconhecimento de padrões com dados do WordClim	16
2.6. Metodologia para calibração	18
2.7. Análises estatísticas	19
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4. CONCLUSÃO.....	31
REFERÊNCIAS	31
CAPÍTULO 2 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA PROJETO DE IRRIGAÇÃO NO BRASIL UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E MACHINE LEARNING.....	37
RESUMO	37
CHAPTER 2 – REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR IRRIGATION PROJECT IN BRAZIL USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING.....	38
ABSTRACT	38
1. INTRODUÇÃO	39
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
2.1. O produto MOD16.....	41
2.2. ETo para projeto de irrigação	41
2.3. Dados meteorológicos para cálculo da ETo	41
2.4. Cálculo da ETo e ETproj.....	42
2.5. Calibração com reconhecimento de padrões e dados WordClim	43
2.6. Metodologia da modelagem	44
2.7. Análises estatísticas	45
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.1. Seleção do modelo de calibração.....	46
3.2. ETproj	49
4. CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	70
CONCLUSÕES GERAIS	75

RESUMO

DIAS, Santos Henrique Brant, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação no Brasil utilizando o produto MOD16.** Orientador: Fernando França da Cunha. Coorientador: Everardo Chartuni Mantovani.

Neste trabalho objetivou-se estimar valores de evapotranspiração de referência mensal e a máxima dos doze meses, visando o dimensionamento de sistemas de irrigação para o território brasileiro, a partir da calibração do produto MOD16. Utilizaram-se dados das estações convencionais do INMET, a fim de validar e calibrar todos os valores de evapotranspiração das imagens MOD16. Após a calibração utilizando *machine learning* e covariáveis do worldclim, as imagens calibradas foram utilizadas para modelar a evapotranspiração de referência para projeto de irrigação. Para isso, processou-se por meio de uma operação fuzzy, para cada mês, os máximos valores mensais ao longo dos 15 anos, pixel a pixel e, posteriormente, dividiu-se pelo número de dias do mês, encontrando assim, a média diária da máxima mensal, de quinze anos de dados do produto MOD16. Com esse produto e as variáveis do wordclim, foi possível modelar a evapotranspiração de referência para projeto de irrigação para todo o Brasil, utilizando uma probabilidade de oitenta por cento de ocorrência. A calibração do produto MOD16 se mostrou efetiva, já que o resíduo médio reduziu de 58,62 para 6,36 mm por mês depois da calibração e o erro quadrático médio reduziu de 66,58 para 10,23 mm por mês. Para a evapotranspiração de referência para projeto chegou-se a um erro quadrático médio de 0,306 mm d⁻¹, os valores são viáveis para utilização em projetos de irrigação, já que os valores de estimativas se assemelham a diversos outros autores que trabalharam com essa evapotranspiração em uma coordenada específica.

ABSTRACT

DIAS, Santos Henrique Brant, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Reference evapotranspiration for irrigation project in Brazil using the product MOD16.** Advisor: Fernando França da Cunha. Co-advisor: Everardo Chartuni Mantovani.

The objective of this study was to estimate monthly evapotranspiration values and the maximum of twelve months, aiming at the design of irrigation systems for the Brazilian territory, based on the calibration of the product MOD16. Data from conventional INMET stations were used to validate and calibrate all evapotranspiration values of MOD16 images. After calibration using machine learning and covariates of the worldclim, the calibrated images were used to model the reference evapotranspiration for irrigation design. For this, a monthly fuzzy operation was performed for each month, and the maximum monthly values over the 15 years were processed pixel by pixel and, afterwards, it was divided by the number of days of the month, thus finding the daily average of monthly maximum of fifteen years of product data MOD16. With this product and the variables of the wordclim, it was possible to model the reference evapotranspiration for irrigation project for the whole Brazil, using an eighty percent probability of occurrence. The calibration of the MOD16 product proved to be effective, as the mean residue decreased from 58.62 to 6.36 mm per month after calibration and the mean square error reduced from 66.58 to 10.23 mm per month. For the reference evapotranspiration for design, an average square error of 0.306 mm d⁻¹ was obtained, and values of estimates very similar to several other authors that worked with this evapotranspiration in a specific coordinate.

INTRODUÇÃO GERAL

O desenvolvimento de qualquer civilização é basicamente limitado pela quantidade de recursos disponíveis, dentre eles, o hídrico é o maior limitante. A gestão sustentável deste recurso requer um planejamento e monitoramento cuidadoso, já que a água é um recurso finito em qualidade e quantidade (JONES, 2018; LIU et al., 2018).

De acordo com a FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), o uso de água doce no mundo está distribuído em: cerca de 8% para o uso doméstico; 22% para a indústria; e 70% para a agricultura. Destes 70%, quase todo ele é utilizado para a irrigação (BESHIR, 2017; FAO, 2016).

No cenário global, o setor agrícola é o maior usuário de água, portanto, a agricultura deve utilizar este recurso natural de forma mais eficiente e produtivo para sustentar a produção de alimentos (ZWART et al., 2010). Sendo assim, o desafio é produzir mais alimentos, fibra, ração animal e energia a partir da mesma quantidade de água (MOLDEN et al., 2010).

A irrigação é uma das tecnologias que mais impulsionou o desenvolvimento de toda a humanidade e revolucionando a agricultura. A irrigação é praticada desde os tempos antigos, onde se utilizava irrigação por superfície (LIU et al., 2018; MALIK; GIORDANO; RATHORE, 2018; SHEPHARD, 2018).

Para a agricultura irrigada ser sustentável é necessária a adequação de alguns fatores, dentre esses estão: o adequado dimensionamento do sistema de irrigação e a escolha do equipamento adequado, visto que essas são decisões que depende da compreensão da dinâmica temporal e da distribuição espacial da evapotranspiração, já que estas escolhas irão perdurar durante toda a vida útil do sistema (BLANKE et al., 2007; YIN; HUANG; WANG, 2018).

Para montagem de um equipamento de irrigação de alta eficiência, com o melhor custo benefício possível, é necessário destacar que quanto maior a taxa de aplicação do sistema, maiores são os seus custos para implementação. Desta forma, equipamentos com alta taxa de aplicação têm elevado custo de aquisição, e equipamentos com taxa de aplicação muito baixos, podem não atender à demanda evapotranspirométrica da cultura.

Para saber a taxa adequada de aplicação, é necessário realizar estudos hidrológicos do local onde será instalado o sistema. O estudo hidrológico é

elaborado pelo balanço de entrada e saída de água de um sistema. Depois de se determinarem os saldos históricos no balanço, o octogésimo maior valor “negativo” é aquela que o sistema de irrigação necessita atender, para uma probabilidade de oitenta por cento de ocorrência (ULIANA et al., 2017; DA SILVA et al., 2015; DENSKI e BACK., 2015).

A evapotranspiração de referência (ET_o) recomendada como padrão pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) é o método de Penman-Monteith FAO 56 (PM-FAO) (ALLEN et al., 1998). Esta metodologia também é utilizada na estimativa da ET_o para dimensionamento de sistemas agrícolas. De posse de valores de ET_o, Doorenbos e Pruitt (1977) propõem alguns níveis de probabilidade de ocorrência em diferentes situações para serem utilizados no dimensionamento de projetos de irrigação. Entretanto, para execução desta técnica são necessários dados históricos do local onde será instalado o sistema de irrigação.

No Brasil o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza dados meteorológicos para ensino e pesquisa de uma grande rede de estações distribuídas em todo território nacional. Entretanto, estas estações ainda apresenta um número limitado e não atende a todas as localidades. Atualmente, para realização do estudo da necessidade hídrica das culturas no dimensionamento de projetos de irrigação, são utilizados dados da estação meteorológica mais próxima, que pode ser tecnicamente inviável.

Diante do exposto, torna-se relevante criar uma fonte alternativa e fidedigna de valores de ET_o e evapotranspiração de referência para projeto (ETproj) para servir como referência no Brasil. A criação e disponibilização destes produtos, que atendam a todo o território nacional é indispensável para a realização de trabalhos técnicos e acadêmicos. Sendo assim, produtos de sensoriamento remoto devem ser explorados para atendimento desses objetivos.

O sensoriamento remoto constitui-se em uma poderosa ferramenta para obtenção de informações em diferentes escalas temporais e espaciais (COURAULT; SEGUIN; OLIOSSO, 2005; KUSTAS et al., 1996; LI; LYONS, 1999). Sua utilização vem crescendo a cada dia e na hidrologia ganhou impulso na última década, principalmente devido ao desenvolvimento de novos sensores orbitais que podem ser utilizados no monitoramento hidrológico e climático (DRUSCH et al., 2012; LI; ROY, 2017; PINTO et al., 2014; ROY et al., 2014). A técnica tem gerado produtos de importância para a aplicação na agricultura.

Muitos produtos de algoritmos que foram e vêm sendo desenvolvidos para tal finalidade, dentre estes o MOD16, que trata-se de um produto de evapotranspiração (ET).

Estudos na área de sensoriamento remoto para realização do balanço hídrico têm sido extensamente estudados. Campos et al. (2016) obtiveram erro quadrático médio (RMSE) de $0,48 \text{ mm d}^{-1}$ na determinação de evapotranspiração para estimativa da umidade do solo, mostrando a precisão e potencialidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração utilizando imagens orbitais.

Bastiaanssen e Steduto (2017) realizaram um trabalho de eficiência do uso da água utilizando imagens de satélite, com a determinação dos valores de eficiência de pixel a pixel e propondo valores regionais de eficiência para cada cultura. Esta ferramenta de sensoriamento remoto tem um grande potencial para seleção de cultivares mais eficientes e adaptados a cada região de grandes áreas de cultivo e produção vegetal.

O sensoriamento remoto pode ser utilizado como ferramenta para estudos que seriam inviáveis de serem realizados, como por exemplo, as mudanças hidrológicas ocasionadas por fenômenos naturais, que abrangem áreas muito grandes. Rodriguez et al. (2016) propuseram técnicas para serem utilizadas na avaliação das mudanças hidrológicas regionais depois da ocorrência de terremotos.

O produto MOD16 (MU et al., 2007; MU; ZHAO; RUNNING, 2011) é obtido indiretamente a partir de outros produtos provenientes do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), juntamente com informações meteorológicas (JOVANOVIC et al., 2015) provenientes de dados de uma rede meteorológica global. Alguns autores como Kim et al. (2012), Polhamus, Fisher e Tu (2013) e Westerhoff (2015), que trabalharam com o produto MOD16, constataram que os dados do produto original apresentam valores que superestimam o valor real de ET. Kim et al. (2012) encontraram RMSE de até $17,41 \text{ mm } 8\text{d}^{-1}$. Westerhoff (2015) constatou superestimativas ligeiramente maiores que o método padrão de PM-FAO nos meses frios, e que a discrepância aumenta nos meses mais quentes.

Entretanto, para a utilização destes dados é necessário realizar uma correção dos valores de evapotranspiração potencial (ETP) a partir de dados das estações meteorológicas disponíveis. Para a correção dos valores de ETP foi

calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) das estações do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) (INMET, 2018).

Partindo das imagens MOD16 calibradas, foi possível realizar a modelagem da ET_o de todo o Brasil e chegar à evapotranspiração de referência para projeto (ET_{proj}).

Neste trabalho teve-se como objetivo estimar e disponibilizar valores de evapotranspiração de referência mensal e a máxima dos doze meses para dimensionamento de sistemas de irrigação para todo o território brasileiro, a partir da calibração do produto MOD16.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- ARAÚJO, A. L. **OPERACIONALIZAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESCALA REGIONAL COM DADOS DE SENSORES ORBITAIS**. Tese de Doutorado - Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2014.
- BASTIAANSSEN, W. G. M.; STEDUTO, P. The water productivity score (WPS) at global and regional level: Methodology and first results from remote sensing measurements of wheat, rice and maize. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 595-611, jan. 2017.
- BESHIR, S. Review on Estimation of Crop Water Requirement, Irrigation Frequency and Water Use Efficiency of Cabbage Production. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 5, n. 7, p. 59-69, 2017.
- BLANKE, A. et al. Water saving technology and saving water in China. **Agricultural Water Management**, v. 87, n. 2, p. 139-150, jan. 2007.
- 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, nov. 2005.
- DA SILVA, A. O. et al. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM PETROLINA, PE / REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR DESIGN OF IRRIGATION SYSTEMS IN PETROLINA, BRAZIL. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 9, n. 1, p. 30, 31 mar. 2015.
- DENSKI, A. P. N.; BACK, Á. J. ADERÊNCIA DE DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADES AOS DADOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA DECENDIAL (GRIB'S DISTRIBUTION PROBABILITIES OF EVAPOTRANSPIRATION DATA TO DECENDIAL REFERENCE). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 31 dez. 2015.
- DOORENBOS, J. e PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements, FAO-24**. Rev ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977.
- DRUSCH, M. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25-36, maio 2012.
- FAO. **Aquastat—Water uses**. c. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm>. Acesso em: 19 jan. 2018.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados meteorológicos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

ISIDRO CAMPOS et al. Estimation of total available water in the soil layer by integrating actual evapotranspiration data in a remote sensing-driven soil water balance. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 427-439, mar. 2016.

JONES, P. J. **Climate change, water stress and agriculture in the Indus Civilisation, 3000-1500 BC**. Apollo - University of Cambridge Repository, 18 jan. 2018.

JOVANOVIC, N. et al. Dynamics of MODIS evapotranspiration in South Africa. **Water SA**, v. 41, n. 1, p. 79-90, 2015.

KIM, H. W. et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 229-238, fev. 2012.

KUSTAS, W. P. et al. Single and dual source modeling of surface energy fluxes with radiometric surface temperature. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 1, p. 110-121, 1996.

LI, F.; LYONS, T. J. Estimation of Regional Evapotranspiration through Remote Sensing. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 11, p. 1644-1654, 1999.

LI, J.; ROY, D. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, p. 902, 31 ago. 2017.

LIU, D. et al. Assessing the effects of adaptation measures on optimal water resources allocation under varied water availability conditions. **Journal of Hydrology**, v. 556, p. 759-774, jan. 2018.

MALIK, R. P. S.; GIORDANO, M.; RATHORE, M. S. The negative impact of subsidies on the adoption of drip irrigation in India: evidence from Madhya Pradesh. **International Journal of Water Resources Development**, v. 34, n. 1, p. 66-77, 2 jan. 2018.

MOLDEN, D. et al. Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 528-535, abr. 2010.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, ago. 2011.

PINTO, C. E. T. et al. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 507-516, maio 2014.

POLHAMUS, A.; FISHER, J. B.; TU, K. P. What controls the error structure in evapotranspiration models? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, p. 12-24, fev. 2013.

RODRIGUEZ, J. et al. Food, water, and fault lines: Remote sensing opportunities for earthquake-response management of agricultural water. **Science of The Total Environment**, v. 565, p. 1020-1027, set. 2016.

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

SHEPHARD, R. J. Irrigation and the Seductive Sedentary Lifestyle. In: SHEPHARD, R. J. (Ed.). **A History of Health & Fitness: Implications for Policy Today**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 23-39.

ULIANA, E. M. et al. ESTIMATE OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION THROUGH CONTINUOUS PROBABILITY MODELLING. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 257-267, abr. 2017.

WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman-Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 102-112, nov. 2015.

YIN, N.; HUANG, Q.; WANG, Y. Impacts of off-farm employment on groundwater irrigation in North China. **Environment and Development Economics**, p. 1-23, 1 fev. 2018.

ZWART, S. J. et al. WATPRO: A remote sensing based model for mapping water productivity of wheat. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 10, p. 1628-1636, out. 2010.

**CAPÍTULO 1 - CALIBRAÇÃO DO PRODUTO MOD16
UTILIZANDO APRENDIZADO DE MÁQUINA PARA ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO BRASIL**

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estimar e disponibilizar valores de evapotranspiração de referência mensal para todo o território brasileiro, a partir da evapotranspiração potencial disponibilizada pelo produto MOD16. Para utilização efetiva do produto MOD16 utilizaram-se as estações convencionais do INMET, a fim de validar e calibrar todos os valores de evapotranspiração obtidos pelas imagens MOD16. Depois de realizada a calibração com algoritmos de machine learning e como covariáveis as informações do worldclim, constatou-se a necessidade de realização deste trabalho. Foram adquiridos quinze anos de dados mensais, totalizando três mil e sessenta cenas do MOD16. Posteriormente, obtiveram-se cinquenta e cinco anos de dados, de duzentas e sessenta e cinco estações meteorológicas espalhadas no território brasileiro. Dentre os modelos avaliados, o cubist obteve os melhores desempenhos nas métricas avaliadas. A calibração do produto MOD16 se mostrou efetiva, já que o resíduo médio reduziu 89,15% após a calibração, assim como o primeiro e terceiro quartil diminuíram 94,50% e 88,47%, respectivamente. O erro quadrático médio diminuiu 84,64%, o erro do viés médio 102,35%, o erro médio absoluto 87,76%, o coeficiente de determinação aumentou 83,27%, e a eficiência de Nash-Sutcliffe, 171,51%. A calibração trouxe um ganho expressivo na acurácia da estimativa da evapotranspiração de referência mensal, abrindo possibilidades de utilização para diversos outros estudos e trabalhos.

CHAPTER 1 - CALIBRATION OF MOD 16 PRODUCT WITH MACHINE LEARNING TECHNIQUES TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN BRAZIL

ABSTRACT

This work was developed with the objective of estimating and making available monthly reference evapotranspiration values for the whole Brazilian territory, based on the potential evapotranspiration provided by the MOD16 product. For the effective use of the MOD16 product, the INMET conventional stations were used to validate and calibrate all the evapotranspiration values obtained by the MOD16 images. After calibration with machine learning algorithms and as covariates the information of the worldclim, it was verified the need to perform this work. Fifteen years of monthly data were acquired, totaling three thousand and sixty MOD16 scenes. Subsequently, fifty-five years of data were obtained, from two hundred and sixty-five meteorological stations scattered throughout Brazil. Among the evaluated models, the cubist obtained the best performances in the evaluated metrics. The calibration of the product MOD16 was effective, since the average residue reduced 89.15% after the calibration, as well as the first and third quartiles decreased 94.50% and 88.47%, respectively. The mean square error decreased by 84.64%, mean bias error 102.35%, mean absolute error 87.76%, determination coefficient increased 83.27%, and Nash-Sutcliffe efficiency, 171.51%. Calibration brought an expressive gain in the accuracy of the monthly reference evapotranspiration estimation, opening possibilities of use for several other studies and works.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de qualquer civilização é restringido aos seus recursos disponíveis. Dentre esses, os recursos hídricos são o maior limitante, portanto, é necessária sua gestão sustentável já que a água é um recurso finito em qualidade e quantidade (HARMANCIOGLU, 2017).

O setor agrícola utiliza cerca de 70% de toda a água utilizada no planeta (FAO, 2016; LUCKMANN et al., 2014), principalmente, por causa da irrigação das culturas. Devido à importância dos recursos hídricos e do montante utilizado na agricultura irrigada, é necessário conhecer a fundo a demanda hídrica das culturas (MUNIANDY; YUSOP; ASKARI, 2016). O componente mais relevante da fase terrestre do ciclo hidrológico é a evapotranspiração (ET) (SHI et al., 2017), crucial para o gerenciamento dos recursos hídricos (FARES et al., 2017; SOUCHA; WOLFE; GRIMMIND, 1996; ZHANG et al., 2016).

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), a FAO recomenda a utilização do método de Penman-Monteith (PM-FAO) (ALLEN et al., 1998). Entretanto, trata-se de um método que necessita de um grande número de variáveis meteorológicas, que são: radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar (ABDULLAH et al., 2015; FENG et al., 2017). Estas variáveis são muitas vezes de difícil obtenção, visto que os sensores necessários são de custo elevado, dificultando ainda mais o cálculo da ET, principalmente quando se deseja obter a sua dinâmica espacial (FENG et al., 2017; TANG; LI, 2015; TANG et al., 2013).

No Brasil, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) disponibiliza gratuitamente dados meteorológicos de uma grande rede de estações distribuídas em todo território nacional. A rede de estações que possuem dados históricos conta com 265 estações meteorológicas, que podem ser acessadas por meio do Banco de Dados Meteorológicos (BDMEP). Mesmo com essa quantidade de estações, como o país possui grande extensão territorial, existem muitas localidades com pouco ou nenhum ponto de medição, sem capacidade de representar com fidedignidade a realidade dos parâmetros. Fatos como esse levam a busca por técnicas alternativas que visam a sanar esses entraves.

O sensoriamento remoto constitui-se em uma poderosa ferramenta para obtenção de informações em diferentes escalas temporais e espaciais (COURAULT; SEGUIN; OLIOSO, 2005; KUSTAS et al., 1996; LI; LYONS,

1999). Com esta técnica é possível imagear grandes áreas com custo moderado e maior rapidez, além de possuir inúmeras soluções aplicadas à agricultura, dispondo de muitos produtos que vêm sendo desenvolvidos para tal finalidade. O uso do sensoriamento remoto na agricultura e hidrologia ganhou impulso nos últimos anos, devido, principalmente, ao desenvolvimento de novos sensores orbitais e a disponibilização de imagens gratuitas, que podem ser utilizados nos monitoramentos hidrológico e climático (DRUSCH et al., 2012; LI; ROY, 2017; PINTO et al., 2014; ROY et al., 2014).

Vários autores têm procurado desenvolver produtos de ET para aplicações na gestão de recursos hídricos (FISHER et al., 2009; MU et al., 2007a; SHEFFIELD; WOOD; MUNOZ-ARRIOLA, 2010). A capacidade de usar informações de sensores de satélite para estimar a ET vem se desenvolvendo rapidamente e oferece a oportunidade de compreender como a ET se comporta no espaço e no tempo, reduzindo, assim, os níveis de incerteza (MADUGUNDU et al., 2017; TANG et al., 2013; TANG; LI, 2015).

Um dos produtos de ET disponíveis é o MOD16 (MU et al., 2007b; MU; ZHAO; RUNNING, 2011), que calcula a evapotranspiração potencial (ETP). Este produto é obtido indiretamente a partir de outros produtos provenientes do sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), juntamente com informações meteorológicas (JOVANOVIC et al., 2015) provenientes de dados de uma rede meteorológica global. Alguns autores como Kim et al. (2012), Polhamus, Fisher e Tu (2013) e Westerhoff (2015), que trabalharam com o produto MOD16, constataram que os dados do produto original apresentam valores que superestimam o valor real de ET. Kim et al. (2012) encontraram erro médio quadrático (RMSE) de até 17,41 mm 8d⁻¹. Westerhoff (2015) constatou superestimativas ligeiramente maiores que o método padrão de PM-FAO nos meses frios, e essa discrepância aumenta nos meses mais quentes.

Dentro de uma filosofia de uso racional da água, do ponto de vista econômico e ambiental, levando em conta também a necessidade de estimar valores de ETP com acurácia e que a demanda por esta informação é grande por todo o território brasileiro, em locais muitas vezes distantes de estações meteorológicas. Neste trabalho, objetivou-se calibrar e disponibilizar, utilizando algoritmos de reconhecimento de padrões (*machine learning*), a evapotranspiração calculada no produto MOD16 utilizando dados meteorológicos do BDMEP como referência e dados do WorldClim como covariáveis auxiliares.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado para todo o Brasil, quinto maior país do mundo, com área de 8.514.817 km². A localização geográfica do país faz com que receba uma grande incidência de raios solares sobre a superfície e, por isso, o clima predominante é o tropical. Entretanto, existem outros tipos climáticos, como equatorial, subtropical e semiárido (ALVARES et al., 2013).

Segundo a classificação climática de Köppen (Figura 1), publicada por Alvares et al. (2013), o Brasil possui os seguintes grupos, tipos e variedades climáticas: Af - sem estação seca; Am - monção; Aw - com inverno seco; As - com verão seco; BSh - zona seca, semi-árida, baixa latitude e altitude; Cfa - zona subtropical úmida, clima oceânico, sem estação seca, com verão quente; Cfb - zona subtropical úmida, clima oceânico, sem estação seca, com verão temperado; Cwa - zona subtropical úmida, com inverno seco e verão quente; Cwb - zona subtropical úmida, com inverno seco e verão temperado; Cwc - zona subtropical úmida, com inverno seco e verão curto e frio; Csa - com verão seco e quente; Csb - com verão seco e temperado.

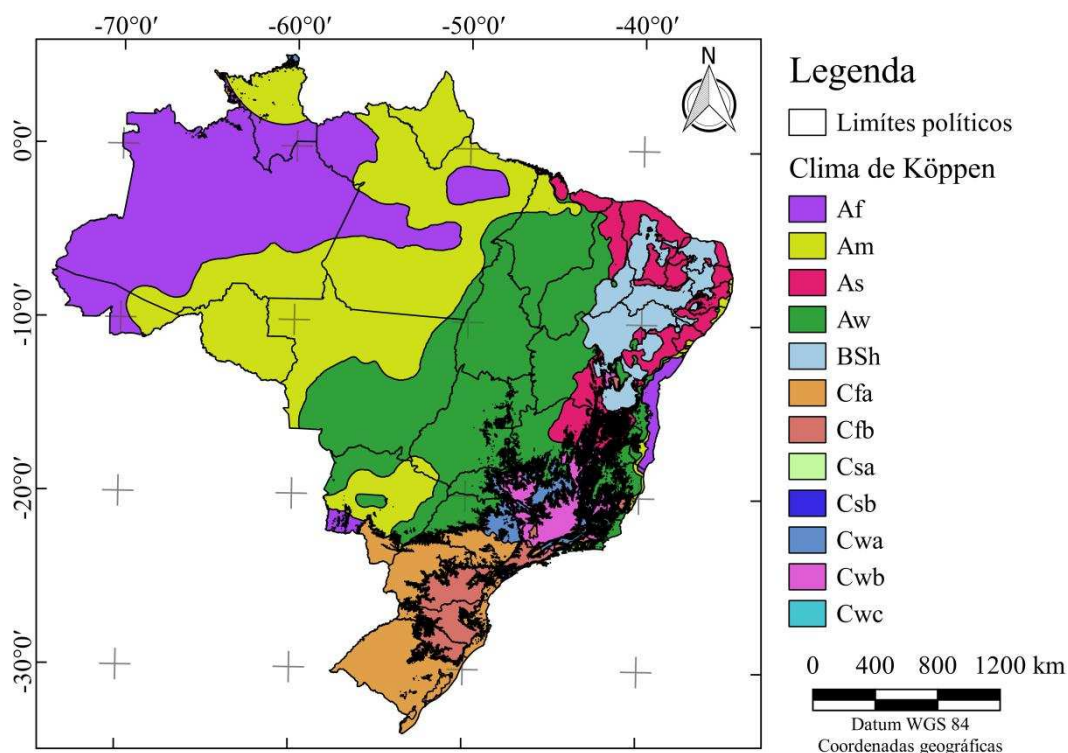


Figura 1 - Classificação do clima segundo Köppen por Alvares et al. (2013).

A agricultura no Brasil vem crescendo nas últimas décadas e atualmente é o setor com maior aporte da economia no país. A agricultura irrigada tem um papel importante neste crescimento. A estimativa de área irrigada em 2014 foi de 6,11 milhões de hectares, que representa 21% do potencial nacional (29,6 milhões de hectares), com aumento a taxas superiores a do crescimento da área plantada total (ANA, 2017). De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), no ano de 2015, no Brasil, foram consumidos $1.210 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, e a irrigação foi responsável por 75% de toda a água consumida.

2.2. Dados históricos BDMEP

Os dados meteorológicos necessários para a pesquisa foram retirados do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados foram referentes ao período de 01/01/1961 até 31/12/2016, porém, nem todas as estações possuíam disponibilidade de dados diários completos, para toda a série temporal. O banco de dados das estações convencionais do INMET conta com 265 pontos de medição distribuídos em todo o Brasil, os quais foram utilizados no presente estudo (Figura 2).

A localização geográfica das estações (Figura 2) serviu de base para extração dos valores de ETP proveniente do produto MOD16. Essa extração foi

feita por meio da ferramenta de amostragem de pontos presente no software QGIS® (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2017).

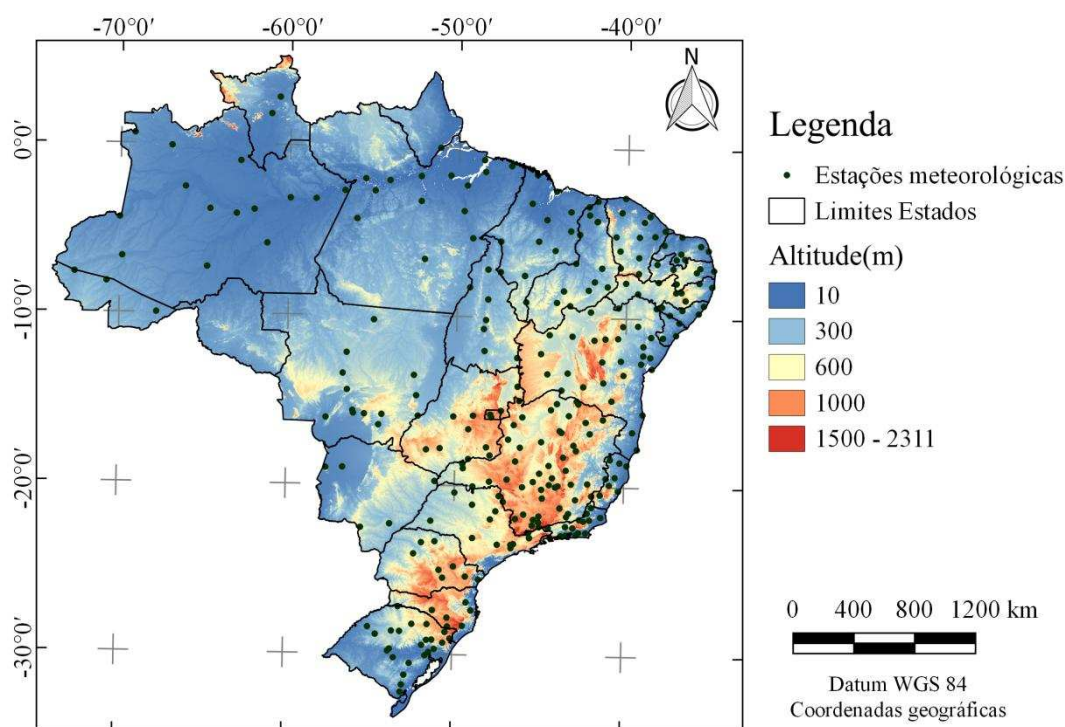


Figura 2 - Localização das estações do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET, 2018).

2.3. Cálculo da ETo e preenchimento de falhas

Depois de obtidos os dados das estações do BDMEP, procedeu-se com o cálculo da ETo, utilizando a equação padrão (Eq. 1), recomendada no documento 56 da FAO (ALLEN et al., 1998). Esta metodologia assume a evapotranspiração de uma superfície cultivada com grama hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23.

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que: ETo - evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; R_n - saldo de radiação na superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; G - fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; t - temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$; u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_s - pressão de saturação de vapor, kPa; e_a - pressão de vapor atual do ar, kPa; Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ - coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Devido ao grande volume de dados para o cálculo da ETo foi utilizado o software CLIMA®, desenvolvido por Faria et al (2002) no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) no Brasil.

A ETo foi calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56, em seguida, realizou-se o preenchimento de falhas, com métodos já validados e utilizados por diversos autores e que estão disponíveis no software CLIMA[®] (BARBIERI et al., 2016; DALLACORT et al., 2011; FANTE; SANT'ANNA NETO, 2016; FENNER et al., 2015; GARCIA GARCIA et al., 2013; PIZZATO et al., 2012; RAMOS et al., 2017, 2015).

2.4. O produto MOD16

O algoritmo descrito por Mu et al. (2011), melhorado a partir de Mu et al. (2007c), utiliza a abordagem de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), combinando dados de sensoriamento remoto com dados meteorológicos de reanálise para calcular a transpiração das plantas e do dossel, além da evaporação do solo. Os dados de entrada MODIS necessários para o algoritmo MOD16 incluem produtos globais de uso do solo e cobertura terrestre (MOD12Q1), índice de área foliar (LAI), radiação fotossinteticamente ativa (PAR-MOD15A2) e albedo (MCD43B2) (WESTERHOFF, 2015).

Em relação aos parâmetros meteorológicos necessários para o algoritmo MOD16, são utilizados dados de reanálise diária do *Global Modeling and Assimilation Office Research Site* (GMAO) referentes à radiação solar incidente, temperatura do ar e pressão de vapor de água, com resolução espacial de $1.00^\circ \times 1.25^\circ$ (KIM et al., 2012; MU et al., 2007b; NTSG, 2017; RAMOELO et al., 2014).

Neste estudo, foram utilizados os dados mensais. Os dados MOD16 estão disponíveis na projeção sinusoidal, sendo necessário reprojeção dos mesmos e a definição do *datum*. Dessa forma, procedeu-se à conversão para coordenadas geográficas referenciadas ao *datum* WGS 84. Para facilitar o manuseio, os dados foram convertidos de HDF (*Hierarchical Data Format*) para GeoTIFF. Todo esse processo foi realizado com o *MODIS reprojection tools* (MRT) (LIU et al., 2018; LP DAAC, 2018a). Dos dados disponíveis do produto MOD16, utilizou-se o PET (*potential evapotranspiration*).

Para realizar o download, as imagens foram padronizadas com suas respectivas órbitas pontos (*path row*) e para identificação destas órbitas pontos utilizou-se o mapa de *tiles* do MODIS (Figura 3). Para os resultados foram utilizadas imagens correspondentes ao período de 01 de janeiro de 2000 a 31 de dezembro de 2014 com base nos produtos mensais. Para cobrir o território

brasileiro, foram empregados os *tiles* h10v08, h10v09, h11v08, h11v09, h11v10, h12v08, h12v09, h12v10, h12v11, h13v08, h13v09, h13v10, h13v11, h13v12, h14v09, h14v10 e h14v11. Assim, foram utilizadas imagens dos 12 meses durante 15 anos, com 17 *tiles* diferentes, totalizando, então, para a análise, 3.060 imagens do produto MOD16, com downloads feitos no link: http://files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/.

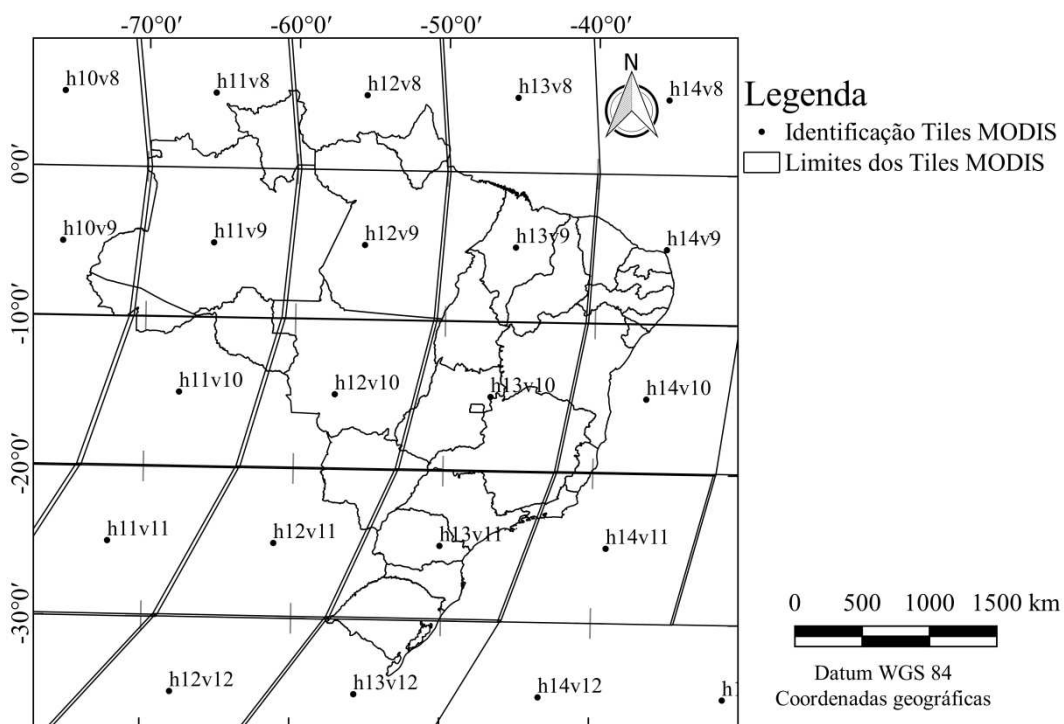


Figura 3 - *Tiles* produtos MODIS para o Brasil.

Mu et al. (2011), além de disponibilizarem para download o produto MOD16, propuseram algumas recomendações para o produto mensal. Como a correção da unidade da ET mensal MODIS, está escalonada para 0,1 mm por mês. Dessa forma, deve-se multiplicar pelo fator 0,1 para obter os valores reais ET / PET em mm por mês (LP DAAC, 2018b).

O produto em questão não abrange todos os usos da terra, apenas os que possuem presença de vegetação. Sendo assim, para os demais usos os valores dos pixels das imagens são preenchidos com os seguintes códigos: terra, 32767; corpo d'água, 32766; estéril ou vegetação escassa, 32765; neve permanente e gelo, 32764; zonas úmidas permanente, 32763; urbano ou construídos, 32762; não classificados, 32761 (LP DAAC, 2018b).

2.5. Calibração de reconhecimento de padrões com dados do WordClim

Para realizar a calibração dos dados proveniente do produto MOD16 testaram-se oito algoritmos de reconhecimento de padrões, que foram: LM (*Linear Regression*); RF (*Random Forest*); cubist; PLS (*Partial Least Squares*); PCR (*Principal Components Regression*); FoBa (*Adaptive Forward-Backward Greedy*); GBM (*Generalized Boosted Regression*) e GLMboost (*Generalized linear model by likelihood based boosting*). Todos os modelos foram implementados no *software* estatístico R.

Para auxiliar a capacidade de estimativa dos algoritmos, utilizaram-se, como fonte de dados adicionais, as variáveis bioclimáticas do Worldclim versão 2. Como variável dependente, ou seja, referência para a calibração dos dados MOD16, utilizou-se a ETo estimada pelo método PM-FAO calculado a partir das estações do BDMEP. Todos os métodos de aprendizagem de máquina utilizados estão disponíveis na biblioteca Caret (WING et al., 2017). Dentre as variáveis bioclimáticas do Worldclim V2 (FICK; HIJMANS, 2017) e o MOD16, fez-se a seleção das covariáveis com maior influência nos modelos. Para isso utilizou-se uma função denominada de *Recursive Feature Elimination*, presente no pacote Caret (WING et al., 2017), do *software* R. Verificada a maior importância das covariáveis, fez-se a seleção das mais importantes, que foram elencadas na ordem presente na Tabela 1 pelo *Recursive Feature Elimination*.

Tabela 1 - Variáveis selecionadas para treino dos modelos.

Variável	Descrição
ETP MOD16	Evapotranspiração potencial (mm por mês)
Srad	Radiação solar ($\text{kJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
Prec	Precipitação (mm)
Wind	Velocidade do vento (m s^{-1})
Bio02	Temperatura média diurna ($^{\circ}\text{C}$)
Bio12	Precipitação anual (mm)
Bio19	Precipitação do trimestre mais frio (mm)
Bio13	Precipitação do mês mais úmido (mm)
Altitude	Altitude WorldClim (m)
Bio07	Temperatura média anual ($^{\circ}\text{C}$)
Bio15	Sazonalidade da precipitação (coeficiente de variação)

Cada algoritmo testado tem suas características, vantagens e desvantagens de utilização. Porém, por se tratar de um grande número de modelos, serão descritos apenas os modelos que apresentam alto potencial para uso neste trabalho.

A regressão linear visa a encontrar o plano que minimiza a soma dos quadrados dos erros (SSE) entre os dados observados e os preditos. Uma vantagem desse método é a fácil interpretação dos coeficientes que são gerados no modelo, além de ter um custo computacional baixo em relação aos demais (KUHN; JOHNSON, 2013).

O modelo cubist implementa um algoritmo de árvores de regressão, que acopla técnicas baseadas em instâncias e modelos visando dar origem a modelos de regressão multivariada a partir do conjunto de dados de treinamento. Esse modelo possui como característica de se basear em múltiplos modelos de regressão para que o produto final seja a média de todos. O modelo cubist tem sido amplamente utilizado nas mais diferentes aplicações voltadas ao sensoriamento remoto (KE et al., 2016).

O produto Worldclim foi desenvolvido por Fick e Hijmans (2017) é um conjunto de camadas climáticas globais (dados de grade do clima) com uma resolução espacial de cerca de 1 km². Esses dados são gerados a partir de dados de 1970 a 2000, usando entre 9.000 a 60.000 estações meteorológicas. Os dados do WorldClim estão disponíveis para download no endereço eletrônico: <http://worldclim.org/version2>.

2.6. Metodologia para calibração

Para realizar a calibração foi necessário proceder com cálculo da ETo mensal dos locais onde estavam instaladas as estações (Figura 4), uma vez que o produto MOD16 é mensal.

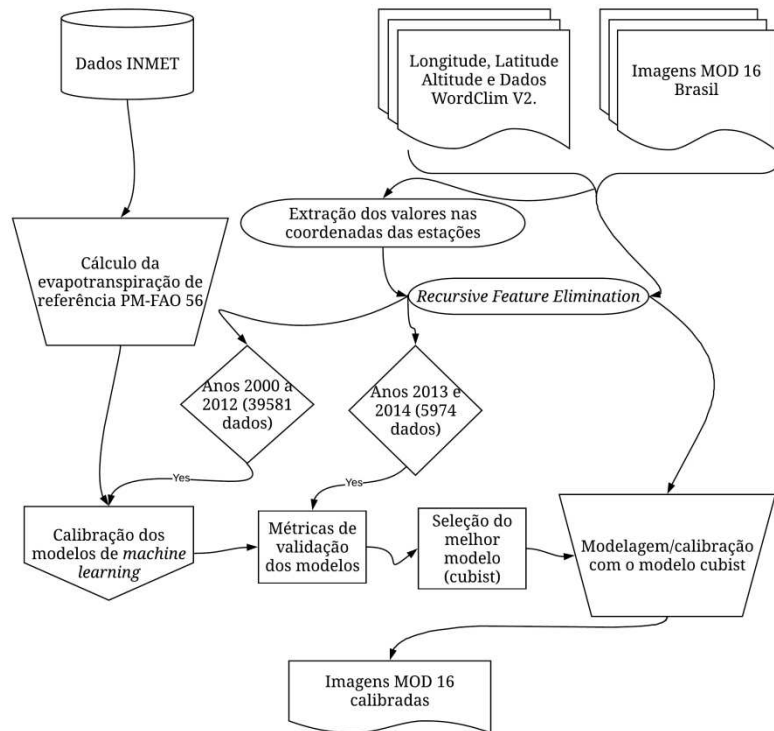


Figura 4 - Fluxograma da metodologia utilizada para a calibração do produto MOD16.

Como apresentado na Figura 4, utilizaram-se treze anos de dados para realizar a calibração e dois anos para a validação. A partir dos dados diários de evapotranspiração das estações, obtiveram-se os dados mensais. A calibração dos dados MOD16 com algoritmos de reconhecimento de padrões (machine learning) foi realizada utilizando dados do WordClim, altitude, latitude e longitude como covariáveis.

2.7. Análises estatísticas

As avaliações estatísticas foram realizadas com base em índices estatísticos que apresentam diferentes funções. O coeficiente de determinação (r^2) indica uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido, ou seja, quanto o modelo é capaz de explicar os dados observados. Entretanto, o índice não leva em consideração a falta de ajuste, que poderá ser grande, mesmo que os valores observados e preditos estejam não linearmente relacionados. Dessa forma, o r^2 não deve ser considerado sozinho, mas sempre aliado a outras métricas.

O erro médio quadrático (RMSE) fornece uma medida da magnitude média do erro através da diferença quadrática entre os dados estimados e observados. O erro médio absoluto (MAE) fornece um valor médio dos erros absolutos. Ambos variam de 0 a $+\infty$ e quantificam o erro com as mesmas unidades

da variável original. O RMSE dá um maior peso aos grandes erros e, dessa forma, evidencia a presença de outliers, útil quando grandes erros são particularmente indesejáveis (WILKS, 2011; WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

O erro do viés médio (MBE) é indicado para visualizar as tendências de subestimativas ou superestimativas. A eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é usada para avaliar o poder preditivo do modelo e varia de $-\infty$ a 1, sendo que 1 corresponde ao ajuste perfeito entre os dados estimados pelo modelo com os dados medidos (MORIASI et al., 2007; WILLMOTT, 1982).

As equações de 2 a 6 representam os índices estatísticos:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (4)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (5)$$

$$r^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right)} \quad (6)$$

em que: P_i - valor predito pelo modelo, mm por mês; O_i - valor observado, mm por mês; \bar{P} - valor médio predito pelo modelo, mm por mês; \bar{O} - valor médio observado, mm por mês; n - número de dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 são apresentados os índices estatísticos da comparação da evapotranspiração de referência mensal obtida do produto MOD16 e calibrada por diferentes métodos em relação ao método padrão (PM-FAO). Percebe-se que os valores dos índices estatísticos referentes ao produto não calibrado, MOD16, diferiram abruptamente de todos os métodos de calibração.

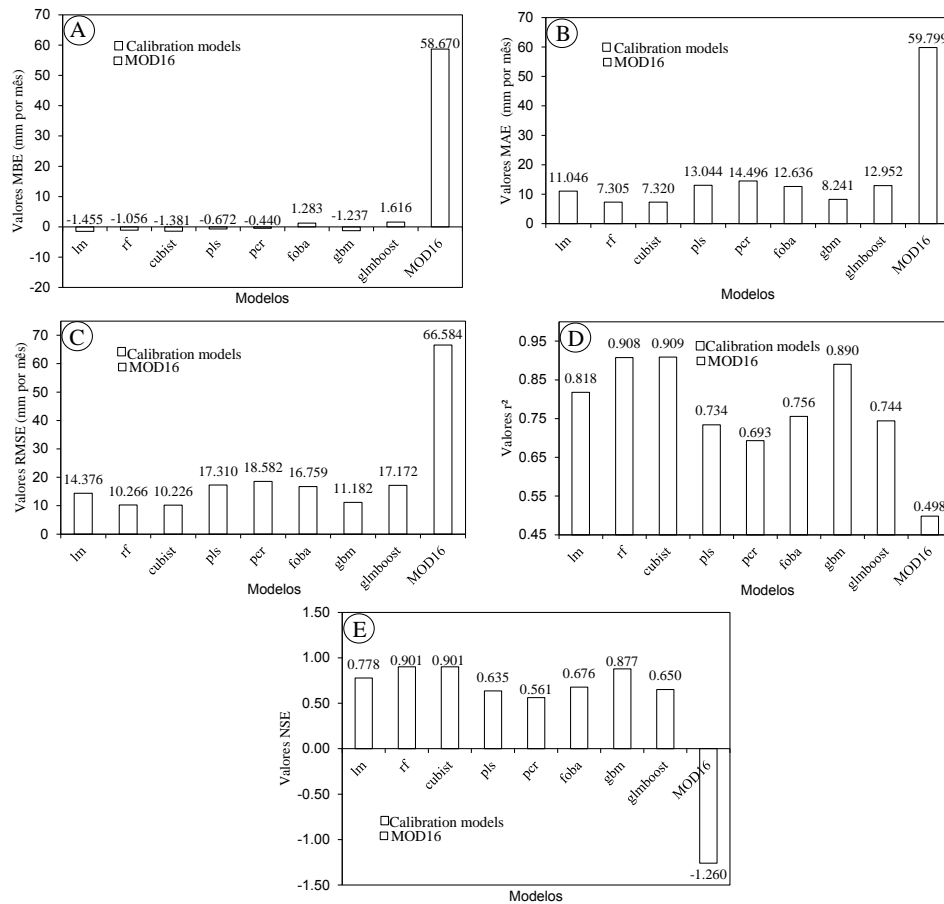


Figura 5 - Resultado dos índices estatísticos usados para avaliar os modelos pré-selecionados em relação ao método padrão (PM-FAO). A) MBE, B) MAE, C) RMSE, D) r^2 , E) NSE.

De acordo com Yao et al. (2017), algoritmos baseados em processos de *machine learning* têm sido largamente utilizados para estimativa da evapotranspiração, porém, quando utilizados de maneira única na estimativa do parâmetro, esses ainda apresentam incerteza na predição. Devido a isso, no estudo desses autores foi implementado o *support vector machine* (SVM), *Bayesian Model Averaging* (BMA) e *General Regression Neural Networks* (GRNNs) para aprimorar os resultados obtidos de evapotranspiração estimados por três algoritmos de evapotranspiração baseados em processos: MOD16 (MODIS ET products algorithm), PT-JPL (Priestley-Taylor ET algorithm of Jet Propulsion Laboratory) e SEMI-PM (Semi-empirical Penman ET algorithm). Esses autores constataram que o SVM foi o modelo que mais se destacou frente aos demais, nos resultados de evapotranspiração analisados, reduzindo consideravelmente os erros.

Observa-se, na Figura 5A, que todos os algoritmos utilizados para calibração do produto apresentaram valores baixos de MBE, o que indica que os valores superestimados e subestimados pelos métodos foram próximos, mas ainda

assim, alguns métodos como o cubist e regressão linear tendem a subestimar os valores de ETo. Já os modelos foba, glmboost e o produto MOD16 superestimam a ETo.

Posterior à calibração do MOD16, o MAE foi drasticamente reduzido, ou seja, os modelos calibrados, quando comparados ao produto não calibrado, obtêm resultados mais próximos aos observados nas estações meteorológicas (Figura 5B). Resultado similar foi obtido quando aplicada a métrica RMSE (Figura 5C), indicando um ganho de acurácia (todos os algoritmos) dos dados calibrados, frente ao resultado do produto MOD16 sem calibração.

Souza et al. (2016) com o intuito de validar o produto MOD16 para a cultura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, Brasil, encontraram um RMSE de 15,87 ($\text{mm } 8\text{d}^{-1}$) o que está de acordo com os 66,584 (mm por mês) encontrados no presente trabalho para os dados do MOD16 sem calibração. Posterior às calibrações, os valores de RMSE diminuíram sensivelmente, o que tornou os produtos mais precisos e confiáveis para serem utilizados em todo o território brasileiro.

Ramoelo et al. (2014), visando a validar o produto MOD16 a partir de torres de fluxo, na Savanna da África do Sul, concluíram que o produto é insuficiente e sua precisão não é consistente para o período e lugares analisados, o que enfatiza a necessidade de uma calibração para sua utilização.

Observa-se que o produto MOD16 sem calibração apresentou coeficiente de determinação (r^2) baixo em relação aos produtos calibrados (Figura 5D). Nota-se que o PCR e PLS foram os modelos de predição que apresentaram os menores valores de r^2 dentre as oito opções analisadas. Estes modelos são recomendados para conjunto de dados que apresentam alta correlação entre as variáveis independentes, provavelmente por isso, tiveram respostas semelhantes.

Na Figura 5E está apresentado o NSE, que, para o produto MOD16 (sem calibração), seguiu direção antagônica aos produtos calibrados. Valores negativos de NSE demonstram que o valor médio observado pelas estações prediz melhor do que o modelo, indicando um desempenho inaceitável (MORIASI et al., 2007).

Analisando de forma geral as métricas utilizadas para avaliar os modelos para a calibração do produto MOD16, nota-se que os modelos RF e o cubist apresentaram resultados melhores nos quatro índices mais significativos para avaliar a precisão e acurácia de um modelo. Três dos oito algoritmos apresentaram alto potencial de aplicação, estes foram o cubist, Random Forest e Regressão

linear, os dois primeiros por apresentarem os melhores resultados dos índices estatísticos e o terceiro pela facilidade de utilização da equação.

A regressão linear tem seu destaque no trabalho devido a sua facilidade, já que gera coeficientes β_0 e β_1 para realizar a correção. Westerhoff (2015) trabalhou com a precisão do produto MOD16, executando a correção da ETP com regressão linear, e seus resultados foram muito semelhantes ao feito neste trabalho. Ke et al. (2016) trabalharam com downscaling de produtos de evapotranspiração utilizando algoritmos de Machine learning incluindo Support Vector Regression (SVR), cubist e Random Forest (RF). RF e cubist resultaram em maiores precisões do modelo, constatando o potencial dos algoritmos conhecidos como árvores em trabalhos acadêmicos na área de recursos hídricos.

Noi et al. (2017) aplicaram os modelos RF e cubist para estimar a temperatura diária da superfície do ar. Para isso, normalmente são aplicados os algoritmos de regressão linear / múltipla linear (LM). Eles constataram que os resultados de cubist e RF são semelhantes ou muito superiores a LM, e apresentaram melhores resultados em todas as 15 combinações feitas. Outros autores já propõem algoritmos híbridos entre o RF e o cubist, a fim de melhorar os resultados que são obtidos pelos modelos (HOUBORG; MCCABE, 2018).

O LM é um modelo simples de ser aplicado, e gera coeficientes para usar a calibração em uma equação (Eq.7).

$$ET_o = -27,09344 + MOD16*0,02381 + Rad*0,00594 + Prec*0,02258 + Wind*0,50952 + Bio02*0,85620 + Bio12*0,00957 + Bio19*0,01134 - Bio13*0,11342 - Altitude*0,01267 - Bio07*0,89244 + Bio15*0,41986 \quad (7)$$

Nesta equação a ordem de importância não pode ser atribuída pelos coeficientes, já que a escala das variáveis são diferentes.

Feng et al. (2017) utilizaram RF e regressão por redes neurais generalizadas para modelarem a ET_o no sudoeste da China e alcançaram resultados melhores para RF, quando comparados a estimativas a partir de dados provenientes de estações meteorológicas. Os resultados utilizando RF encontrados por esses autores variam de 0,69 a 0,071 (0,1 mm d⁻¹), e 0,978 a 0,982 para *Relative RMSE*, MAE e NSE, respectivamente.

Javanovic et al. (2015) em um estudo na África do Sul com dinâmica da evapotranspiração utilizando o produto MOD16, concluíram que o algoritmo de ET pode ser refinado e testado para áreas heterogêneas e que envolvam mudanças

abruptas do uso da terra, como no presente estudo, que, apesar da grande extensão territorial, apresenta os mais diversos usos da terra.

Polhamus et al. (2013) avaliaram os modelos de Mu et al. (2007c; 2011) e Fisher et al. (2009) utilizando os erros de predição em relação ao coeficiente de dissociação de Jarvis e Mcnaughton (1986). Verificou-se, então, que os modelos apresentaram desempenho moderado na previsão dos dados observados, mas com possibilidade de melhorias substanciais. A parametrização da resistência da copa e da aerodinâmica realizada por Mu et al. (2011) é considerada por Polhamus et al. (2013) muito ampla e simplista quando comparada ao poder conceitual da equação de PM, que tem estimativa confiável da resistência da copa e da aerodinâmica para cálculo da evapotranspiração.

Devido à rapidez de processamento, demandando um tempo de processamento inferior, e facilidade de utilização, o modelo cubist se destacou neste estudo frente ao RF. Assim, os próximos resultados são referentes ao modelo cubist, devido ao melhor resultado na calibração do produto MOD16.

Na Figura 6 é possível observar a relação do resíduo do produto ETP para todos os anos analisados, proveniente do produto MOD16 (sem calibração) em relação ao resíduo do produto MOD16 calibrado pelo algoritmo cubist. O resíduo representa a diferença do produto calibrado pelo algoritmo cubist e do produto sem calibração, em relação aos dados estimados de ETo (PM-FAO56) por meio dos dados das estações meteorológicas de superfície.

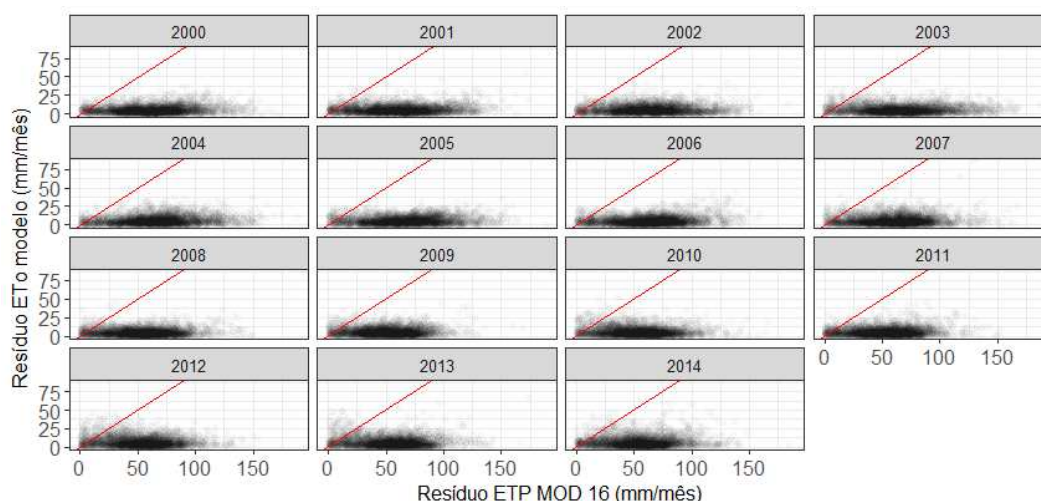


Figura 6 - Resíduo da ETP MOD16 x resíduo ETo modelo cubist, por ano.

É evidente que os resíduos provenientes do produto sem calibração (eixo X) possuem dispersões elevadas quando comparados com a dispersão do resíduo do produto calibrado pelo cubist (eixo Y). O traçado vermelho é a reta 1/1 e

evidencia que a exatidão do produto MOD16 foi melhorada ao longo de todos os anos e imagens analisados.

Não foi constatada nenhuma discrepância na dispersão dos resíduos ao longo dos anos, tanto para o produto MOD16 (sem calibração) quanto para o MOD16 calibrado pelo cubist, o que mostra que o comportamento dos resíduos permaneceu o mesmo, ao longo de toda a série temporal analisada.

Na Tabela 2 observa-se a diferença dos resíduos do produto calibrado e o produto MOD16 original.

Tabela 2 - Resíduos dos dados preditos e observados

	MOD16 (mm por mês)	Calibração cubist (mm por mês)
Resíduo mínimo	0,00	0,00
1º quartil	39,30	2,16
Mediana	58,50	4,77
Resíduo Médio	58,62	6,36
3º quartil	76,30	8,80

Desse modo, constatou-se na Tabela 2 a disparidade entre os dados calibrados pelo cubist frente aos não calibrados. Os valores podem ser observados nos boxplot da Figura 7, que apresenta a distribuição de todos os erros no produto original e produto calibrado.

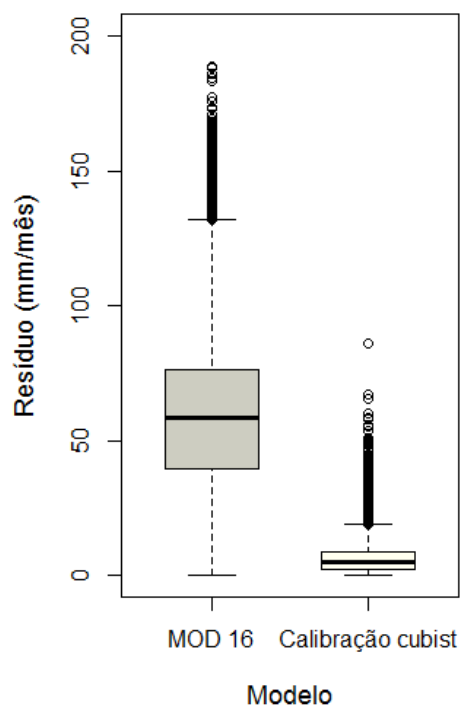


Figura 7- Boxplot dos resíduos observados no produto MOD16 e do modelo de calibração.

O erro da predição é menor, quando comparado ao erro do produto MOD16 (Figura 7), demonstrando a necessidade de realização da correção do produto MOD16.

Na Figura 8 é possível visualizar a dispersão dos resíduos dos produtos calibrados pelo cubist e não calibrado, em relação aos meses do ano. Essa análise é importante para avaliar o comportamento dos resíduos ao longo dos meses e observar se há divergências relacionadas ao comportamento dos resíduos em relação às épocas do ano, ou até mesmo em relação às sazonalidades climáticas do país.

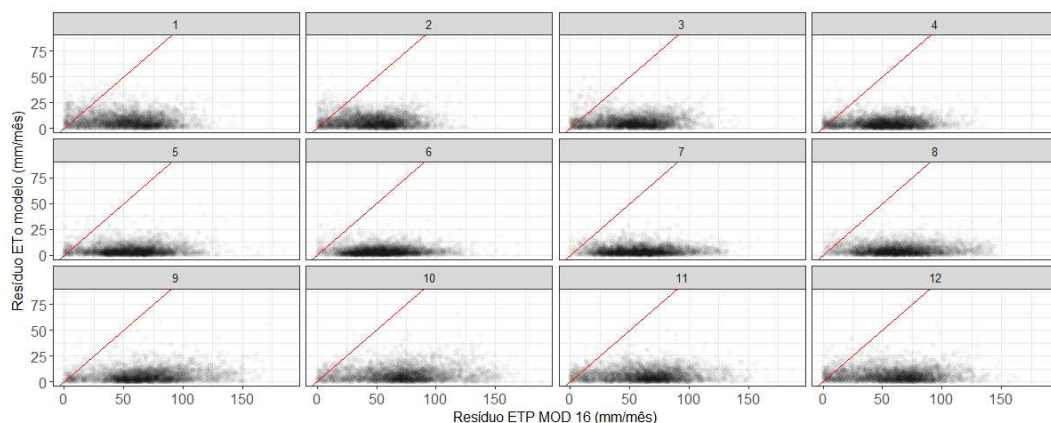


Figura 8 - Resíduo da ETP MOD16 x resíduo ETo modelo cubist, para os meses do ano.

Na Figura 9 desmembraram-se os desvios de acordo com a classificação de Köppen para o Brasil (Figura 1), com 10 classificações para as 265 estações do estudo. Essa análise é fundamental para avaliar as tendências de distribuição dos resíduos e verificar se eles estão sendo influenciados por algum aspecto da paisagem que é predominante em cada clima.

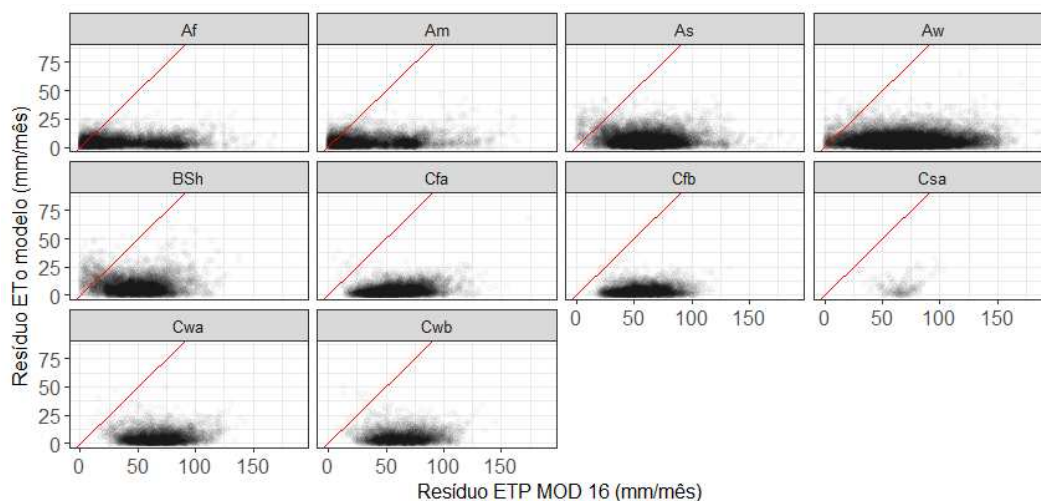


Figura 9 - Resíduo da ETP MOD16 x resíduo ETo modelo cubista, em função da classificação de Köppen.

As classificações que iniciam com A, tratam do tipo de clima tropical, apresentando algumas características como climas megatérmicos, temperatura média do mês mais frio do ano maior que 18°C, estação invernal ausente e forte precipitação anual (superior à evapotranspiração potencial máxima dos doze meses). A subdivisão do clima tropical A é feita a partir da precipitação, sendo: Af - Equatorial, Am - Monções, As - Savana, chuva de Inverno e Aw - Savana, chuva de Verão (ALVARES et al., 2013).

As classificações que iniciam com B tratam do tipo de clima árido, apresentam características como: climas secos (precipitação anual inferior a 500 mm), evapotranspiração potencial máxima dos doze meses superior à precipitação anual e não existem cursos d'água permanentes. A subdivisão do clima árido (B) também é feita a partir da precipitação: BS - Estepário, entretanto no Brasil existe apenas uma classificação de B, sendo a BSh - Clima árido, estepário com precipitação anual entre 380 e 760 mm, seco e quente, com as seguintes características: temperatura média anual do ar maior que 18°C e deserto ou semideserto quente (temperatura anual média do ar igual ou superior a 18°C).

As classificações que iniciam com C tratam do tipo de clima temperado ou temperado quente, apresentando características como: climas mesotérmicos,

temperatura média do ar dos 3 meses mais frios compreendidas entre -3°C e 18°C , temperatura média do mês mais quente maior que 10°C e estações de verão e inverno bem definidas. A subdivisão (segunda letra) do clima temperado quente (C) é feita também a partir da precipitação sendo: Cf - Subtropical ou Oceânico (clima húmido, ocorrência de precipitação em todos os meses do ano e inexistência de estação seca definida), Cs - Mediterrânico (Chuvas de Inverno) e Cw - Pampeano (Chuvas de Verão). A terceira letra é utilizada para distinguir climas com diferentes variações de temperatura do ar e dentro do clima temperado quente tem-se a - Verão quente (Temperatura média do ar no mês mais quente $> 22^{\circ}\text{C}$) e b - Verão temperado (temperatura média do ar no mês mais quente $< 22^{\circ}\text{C}$ e temperaturas médias do ar nos 4 meses mais quentes $> 10^{\circ}\text{C}$).

Na Figura 10 destaca-se os números de estações para as classificações de Köppen, os valores médios dos resíduos antes e depois da calibração em cada classificação.

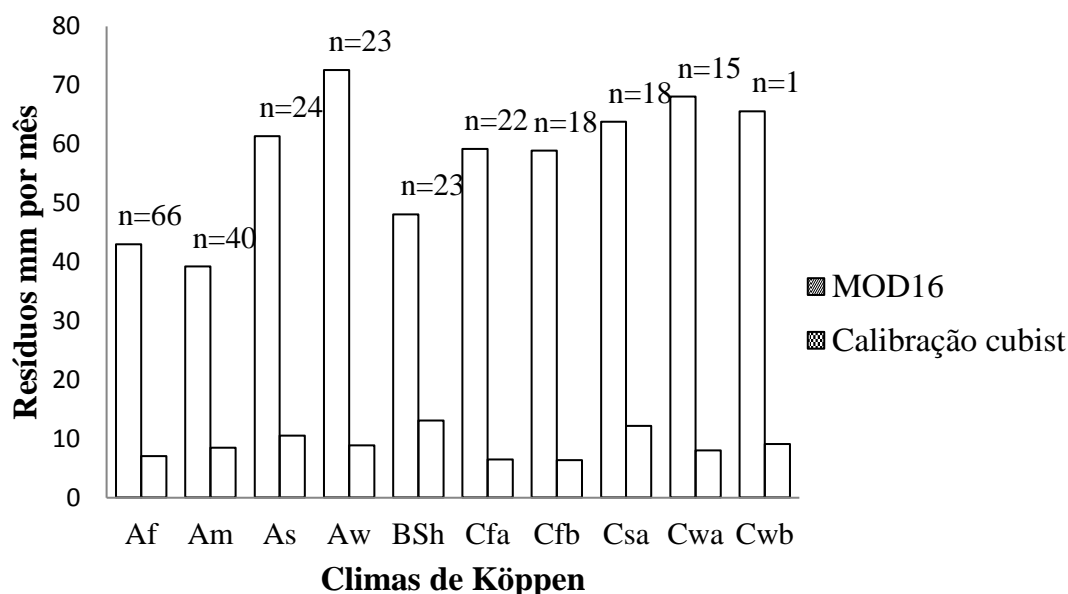


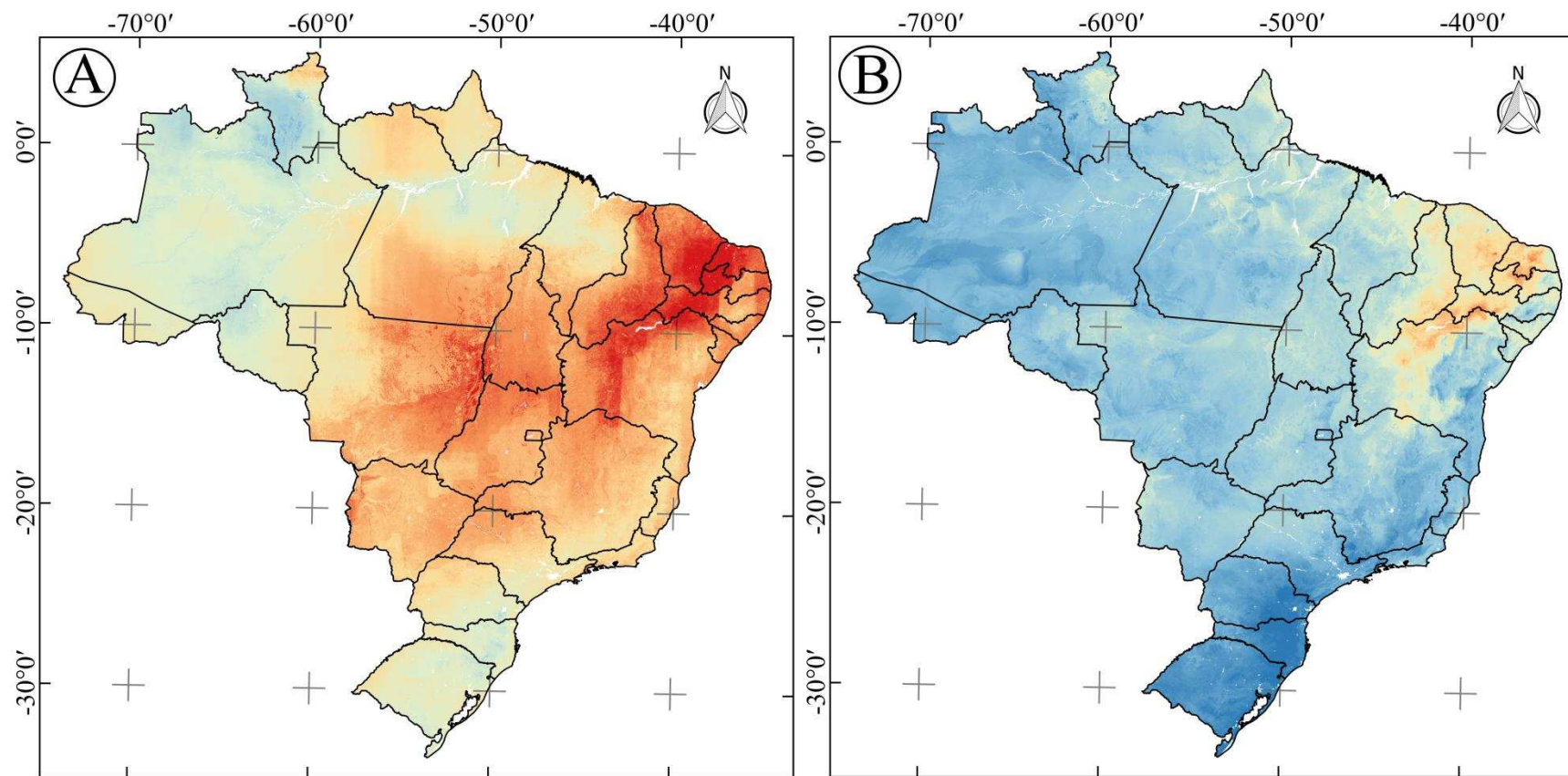
Figura 10 - Resíduos médios dos climas de Köppen do produto MOD16 e da calibração realizada

Independente do número de estações nos climas, o erro no produto e na predição foram semelhantes, os climas com os menores erros após a predição foram Cfb, Cfa e Af com os erros de 6,321, 6,427 e 6,994 mm por mês respectivamente, já os maiores foram BSh, Csa e As com erro de 13,075, 12,173 e 10,475 mm por mês.

Na Figura 9, observa-se uma tendência de forte redução dos resíduos para o modelo cubist nas classificações C (clima temperado ou temperado quente), locais onde começam a região temperada.

A realização da calibração para o produto MOD16 é fundamental, sendo as diferenças explícitas quando analisada a Figura 11, em que é apresentada a média mensal do ano de 2014 sem (Figura 11A) e com a realização da calibração (Figura 11B). Após a calibração, as diferenças regionais de evapotranspiração que eram esperadas foram evidenciadas.

O cubist é um modelo de árvore, e é considerado “caixa preta”, em que as regressões são feitas nos nós finais e não se tem um determinado coeficiente para ser facilmente utilizado, o que é uma desvantagem quando comparado à regressão linear. A justificativa da utilização desse modelo está na busca por valores mais precisos e que tenham um melhor ajuste na utilização. A calibração usando o cubist melhorou a exatidão do produto, diminuindo o erro em 4,15 mm por mês, quando comparado à regressão linear, demonstrando um aumento de precisão significativamente superior aos modelos já utilizados em outras calibrações (WESTERHOFF, 2015).



Legenda

□ Limites políticos dos estados

Evapotranspiração média mensal 2014 (mm mês⁻¹)

■ 84 ■ 112 ■ 140 ■ 168 ■ 196 ■ 224

500 0 500 1000 1500 km



Datum WGS 84
Coordenadas geográficas

Figura 11 - ETo média mensal para 2014 A - Produto MOD16 original e B - Produto MOD16 calibrado pelo cubist.

4. CONCLUSÃO

Dentre os oito modelos testados e validados, o cubist foi o modelo que obteve os melhores resultados no geral, e, portanto, é o modelo mais indicado para correção do produto MOD16. Entretanto, a regressão linear pode ser utilizada, visto que se obtiveram resultados similares aos melhores modelos, além dessa disponibilizar uma equação simples para ser utilizada.

Os dados do produto MOD16 foram calibrados para melhorar a estimativa da ETo em uma resolução temporal mensal e espacial de 1 km × 1 km no Brasil. A calibração do MOD16 torna possível a sua utilização em todo território nacional para realização de posteriores estudos.

O método proposto melhora a capacidade de usar produtos derivados de dados de satelitários com cobertura global, respeitando o padrão PM-FAO usado no local.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, S. S. et al. Extreme Learning Machines: A new approach for prediction of reference evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 527, p. 184-195, ago. 2015.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ANA. **Agência Nacional de Águas (Brasil)**. Conjuntura dos recursos hídricos: Informe 2016/ANA-Brasília. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 4 maio. 2017.

ARAÚJO, A. L. **OPERACIONALIZAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM ESCALA REGIONAL COM DADOS DE SENSORES ORBITAIS**. Tese de Doutorado—Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

BARBIERI, J. D. et al. Agroclimatic aptitude for peanut in the West region of the state of Mato Grosso. **Científica**, v. 44, n. 4, p. 457, 11 nov. 2016.

BDMEP. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 2 fev. 2017.

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, nov. 2005.

DALLACORT, R. et al. Distribuição das chuvas no município de Tangará da Serra, médio norte do Estado de Mato Grosso, Brasil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, 11 abr. 2011.

DRUSCH, M. et al. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. **Remote Sensing of Environment**, v. 120, p. 25-36, maio 2012.

FANTE, K. P.; SANT'ANNA NETO, J. L. TÉCNICAS ESTATÍSTICAS PARA A HOMOGENEIZAÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA EM SÉRIES TEMPORAIS CLIMATOLÓGICAS (STATISTICAL TECHNIQUES FOR TEMPERATURE DATA HOMOGENIZATION IN CLIMATOLOGICAL TIME SERIES). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 15 jul. 2016.

FAO. **Aquastat—Water uses**. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm>. Acesso em: 19 jan. 2018.

FARES, A. et al. Potential climate change impacts on citrus water requirement across major producing areas in the world. **Journal of Water and Climate Change**, p. 1-17, 7 ago. 2017.

FARIA, R. T. DE et al. CLIMA-programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Boletim Técnico IAPAR**, Londrina. n. 66, p. 29, 2002.

FENG, Y. et al. Evaluation of random forests and generalized regression neural networks for daily reference evapotranspiration modelling. **Agricultural Water Management**, v. 193, p. 163-173, nov. 2017.

FENNER, W. et al. ÍNDICES DE SATISFAÇÃO DE NECESSIDADE DE ÁGUA PARA O MILHO SEGUNDA SAFRA EM MATO GROSSO. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 15 abr. 2015.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas: NEW CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. **International Journal of Climatology**, 15 maio 2017.

FISHER, J. B. et al. The land-atmosphere water flux in the tropics. **Global Change Biology**, v. 15, n. 11, p. 2694-2714, nov. 2009.

GARCIA GARCIA, R. et al. Calendário agrícola para a cultura do milho em Sinop (MT). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 218-222, jun. 2013.

HARMANCIOGLU, N. B. Overview of Water Policy Developments: Pre- and Post-2015 Development Agenda. **Water Resources Management**, v. 31, n. 10, p. 3001-3021, ago. 2017.

HOUBORG, R.; MCCABE, M. F. A hybrid training approach for leaf area index estimation via cubist and random forests machine-learning. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 135, p. 173-188, jan. 2018.

- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados meteorológicos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 2 fev. 2017.
- JARVIS, P. G.; MCNAUGHTON, K. G. Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region. **Advances in ecological research**, v. 15, p. 1-49, 1986.
- JOVANOVIC, N. et al. Dynamics of MODIS evapotranspiration in South Africa. **Water SA**, v. 41, n. 1, p. 79-90, 2015.
- KE, Y. et al. Downscaling of MODIS One Kilometer Evapotranspiration Using Landsat-8 Data and Machine Learning Approaches. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 215, 8 mar. 2016.
- KIM, H. W. et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 229-238, fev. 2012.
- KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York, NY: Springer New York, 2013.
- KUSTAS, W. P. et al. Single and dual source modeling of surface energy fluxes with radiometric surface temperature. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 1, p. 110-121, 1996.
- LI, F.; LYONS, T. J. Estimation of Regional Evapotranspiration through Remote Sensing. **Journal of Applied Meteorology**, v. 38, n. 11, p. 1644-1654, 1999.
- LI, J.; ROY, D. A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. **Remote Sensing**, v. 9, n. 9, p. 902, 31 ago. 2017.
- LIU, Y. et al. Spatial distribution of snow depth based on geographically weighted regression kriging in the Bayanbulak Basin of the Tianshan Mountains, China. **Journal of Mountain Science**, v. 15, n. 1, p. 33-45, jan. 2018.
- LP DAAC. **MODIS Reprojection Tool**. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool>. Acesso em: 24 jan. 2018a.
- LP DAAC. **Land Processes Distributed Active Archive Center**. Aster and MODIS Land Data Products and Services. Disponível em: <<https://lpdaac.usgs.gov>>. Acesso em: 23 jan. 2018b.
- LUCKMANN, J. et al. An integrated economic model of multiple types and uses of water. **Water Resources Research**, v. 50, n. 5, p. 3875-3892, maio 2014.
- MADUGUNDU, R. et al. Performance of METRIC in estimating hourly and daily evapotranspiration fluxes over an irrigated field in Saudi Arabia. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, p. 1-23, 29 maio 2017.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MU, Q. et al. Evaluating water stress controls on primary production in biogeochemical and remote sensing based models. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, n. G1, p. 1-13, 8 fev. 2007a.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007b.

MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007c.

MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, ago. 2011.

MUNIANDY, J. M.; YUSOP, Z.; ASKARI, M. Evaluation of reference evapotranspiration models and determination of crop coefficient for *Momordica charantia* and *Capsicum annum*. **Agricultural Water Management**, v. 169, p. 77-89, maio 2016.

NOI, P.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. Comparison of Multiple Linear Regression, cubist Regression, and Random Forest Algorithms to Estimate Daily Air Surface Temperature from Dynamic Combinations of MODIS LST Data. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 398, 25 abr. 2017.

NTSG. **Numerical Terradynamic Simulation Group**. Disponível em: <<http://www.ntsg.umd.edu/project/modis/mod16.php>>. Acesso em: 5 abr. 2017.

PINTO, C. E. T. et al. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 5, p. 507-516, maio 2014.

PIZZATO, J. A. et al. Distribuição e probabilidade de ocorrência de precipitação em Cáceres (MT). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 137-142, jun. 2012.

POLHAMUS, A.; FISHER, J. B.; TU, K. P. What controls the error structure in evapotranspiration models? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, p. 12-24, fev. 2013.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**. World: Open Source Geospatial Foundation, 2017.

RAMOELO, A. et al. Validation of Global Evapotranspiration Product (MOD16) using Flux Tower Data in the African Savanna, South Africa. **Remote Sensing**, v. 6, n. 8, p. 7406-7423, 11 ago. 2014.

RAMOS, H. D. C. et al. PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA DO AR PARA O ESTADO DE MATO GROSSO UTILIZANDO KRIGAGEM ORDINÁRIA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 1 ago. 2017.

RAMOS, H. DA C. et al. PRECIPITAÇÃO PLUVIAL DE DIAMANTINO-MT EM ANOS DE OCORRÊNCIA DE EL NIÑO, LA NIÑA E NEUTROS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 71-80, mar. 2015.

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

SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; MUNOZ-ARRIOLA, F. Long-Term Regional Estimates of Evapotranspiration for Mexico Based on Downscaled ISCCP Data. **Journal of Hydrometeorology**, v. 11, n. 2, p. 253-275, abr. 2010.

SHI, Z. et al. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 31, n. 1, p. 257-273, jan. 2017.

SOUCHA, C.; WOLFE, C. P.; GRIMMIND, C. S. B. Wetland evaporation and energy partitioning: Indiana Dunes National Lakeshore. **Journal of Hydrology**, v. 184, n. 3-4, p. 189-208, out. 1996.

SOUZA, V. D. A. et al. VALIDAÇÃO DO PRODUTO DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO MOD16 PARA UMA CULTURA DE ARROZ IRRIGADO EM CACHOEIRA DO SUL - RS. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 270, 20 jul. 2016.

TANG, R. et al. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 174-175, p. 28-42, jun. 2013.

TANG, R.; LI, Z.-L. Evaluation of two end-member-based models for regional land surface evapotranspiration estimation from MODIS data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 69-82, mar. 2015.

WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman-Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 102-112, nov. 2015.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Oxford; Waltham, MA: Academic Press, 2011.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 30, p. 1309-1310, 1982.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82, 2005.

WING, M. K. C. FROM J. et al. **caret: Classification and Regression Training**. 5. ed. Stuttgart, Germany: Journal of statistical software, 2017. v. 28

YAO, Y. et al. Improving global terrestrial evapotranspiration estimation using support vector machine by integrating three process-based algorithms. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 242, p. 55-74, ago. 2017.

ZHANG, Y. et al. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, maio 2016.

CAPÍTULO 2 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA PROJETO DE IRRIGAÇÃO NO BRASIL UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO E MACHINE LEARNING.

RESUMO

Objetivou-se nesta pesquisa estimar e disponibilizar valores de evapotranspiração de referência mensal e a máxima dos doze meses, para dimensionamento de sistemas de irrigação em todo o território brasileiro, a partir do produto MOD16 calibrado. Com os dados meteorológicos de duzentas e cinquenta e nove estações convencionais do INMET foi possível estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) diária para 15 anos. Para cada estação meteorológica, agrupou-se os dados por mês e determinou-se a ET_o para projeto de irrigação para atendimento de oitenta por cento de probabilidade de ocorrência. Paralelamente, foram adquiridas imagens mensais de 15 anos do produto MOD16 para o mesmo local onde as estações meteorológicas estão instaladas. Estas imagens MOD16 foram calibradas utilizando *machine learning* e informações do WorldClim. Utilizando a média diária da máxima mensal dos quinze anos do produto MOD16, radiação e precipitação anual WordClim foi possível modelar a evapotranspiração de referência para projeto de irrigação para todo o Brasil. Posterior ao compute dessa variável chegou-se a um erro médio quadrático de 0,306 mm d⁻¹, erro do viés médio de -0,004 mm d⁻¹, erro absoluto médio de 0,227 mm d⁻¹, coeficiente de determinação de 0,938 e eficiência de Nash-Sutcliffe 0,937. Os valores de ET_o para projetos de irrigação foram semelhantes a diversos outros reportados na literatura quando comparados em determinado ponto. Com a presente pesquisa foi possível determinar a ET_o mensal e anual para projetos de irrigação em todo o território brasileiro.

CHAPTER 2 – REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR IRRIGATION PROJECT IN BRAZIL USING REMOTE SENSING AND MACHINE LEARNING.

ABSTRACT

The objective of this research was to estimate and make available monthly evapotranspiration values and the maximum of twelve months, for the design of irrigation systems throughout the Brazilian territory, from the calibrated product MOD16. Using data of two hundred and fifty-nine conventional stations of INMET's, it was possible to estimate the reference evapotranspiration (ET_o) daily for 15 years. For each meteorological station, these data were grouped in each month and the ET_o was determined for an irrigation project to attend an eighty percent probability of occurrence. At the same time, 15-year monthly images of the MOD16 product were purchased for the same location where the weather stations are installed. These MOD16 images were calibrated using machine learning and WorldClim information. Using the daily average of the monthly maximum of the fifteen years of product MOD16, radiation and annual precipitation of WordClim, it was possible to model the reference evapotranspiration for irrigation project for the whole Brazil. For the reference evapotranspiration, a mean square error of 0.306 mm d⁻¹, mean bias error of -0.004 mm d⁻¹, mean absolute error of 0.227 mm d⁻¹, coefficient of determination of 0.938 and Nash-Sutcliffe efficiency 0.937. The ET_o values for irrigation projects were similar to several others reported in the literature when compared at a given point. With the present research it was possible to determine the monthly and annual ET_o for irrigation projects throughout the Brazilian territory.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação é a tecnologia que tem o maior potencial de aumentar a produtividade das culturas agrícolas (EBISSA, 2017). Entretanto, atualmente, a irrigação é a maior consumidora de água do mundo, responsável por 70 a 80% do consumo de recursos hídricos (BESHIR, 2017; FAO, 2016; FERERES; SORIANO, 2006). Este fato, somado ao crescente aumento populacional, promove a busca por maiores produções de alimentos com menor quantidade de água (KARAN et al., 2018).

Para isto, torna-se importante a estimativa correta da evapotranspiração, requisito fundamental no manejo, planejamento e gerenciamento da irrigação (ABDULLAH; MALEK, 2016; SADICK et al., 2015; SHI et al., 2017; GAVILÁN; CASTILLO-LLANQUE, 2009). Na área de ciências agrárias, a evapotranspiração é utilizada para balanço hídrico, classificação climática, zoneamento agroclimático e para manejo e dimensionamento de projetos hidro-agrícolas, como os sistemas de irrigação (CARVALHO et al., 2011; DENSKI; BACK, 2015; SADICK et al., 2015).

A estimativa incorreta da evapotranspiração de referência para projetos (ETproj) pode acarretar problemas de superestimativas ou subestimativa dos sistemas de irrigação (SHI et al., 2017). Superestimando a ETproj, o sistema de irrigação será superdimensionado, o que aumenta o custo da implantação por unidade de área. Este fato, associado à falta de manejo, resultará na aplicação de água em excesso, causando danos ambientais, como escoamento superficial, lixiviação de nutrientes e consequente poluição de fontes de água ou percolação e infiltração profunda que levaria a água a retornar aos reservatórios subterrâneos (BESHIR, 2017). Subestimando a ETproj o sistema de irrigação será subdimensionado e, por consequência, poderá não atender à demanda evapotranspirométrica da cultura, principalmente no estágio fenológico de alta demanda hídrica, ocasionando perdas de produtividade e qualidade dos produtos agrícolas.

A quantificação da evapotranspiração de referência (ETo) é obtida preferencialmente pelo método de Penman-Monteith (FAO 56) (ALLEN et al., 1998), que é recomendado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) como padrão. Esta metodologia deve ser preferida na estimativa da ETo a fim de dimensionar sistemas agrícolas. De posse dos valores de ETo,

Doorenbos e Pruitt (1977) propõem alguns níveis de probabilidade de ocorrência em diferentes situações para serem utilizados no dimensionamento de projetos de irrigação. Entretanto, para execução desta técnica são necessários dados históricos do local onde será instalado o sistema de irrigação.

O Brasil, devido a sua grande extensão e falta de investimentos, possui poucas estações meteorológicas, apresentando escassez dos dados necessários. Desta forma, por falta destas informações, muitos projetistas extrapolam dados de estações muito distantes do local de implantação do sistema de irrigação, levando a erros de desconhecida magnitude. Esta falta de informações também faz com que pesquisadores utilizem metodologias para estimativa da ETo pouco precisas para servir como referências para projeto de irrigação, dentre essas metodologias, a do tanque Classe A (DA SILVA et al., 2015; SILVA et al., 1998).

Dessa forma, torna-se relevante criar uma fonte alternativa e fidedigna de valores de ETproj para servir como referência. A criação e disponibilização destes produtos que atendam a todo o território do país é indispensável para a realização de trabalhos técnicos e acadêmicos.

O sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) pode ser uma solução para o problema da escassez de dados climáticos, visto que Mu et al. (2007) desenvolveram o produto MOD16 (evapotranspiração) a partir dos dados derivados da captação das bandas espectrais provenientes do sensor MODIS. O modelo de Mu et al. (2007) baseou-se na versão de Cleugh et al. (2007), sendo posteriormente melhorado por Mu et al. (2011).

O algoritmo MOD16 (MU; ZHAO; RUNNING, 2011) baseia-se na equação de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), entretanto, Westerhoff (2015) e Polhamus et al. (2013) constataram que os dados do produto original MOD16 apresentam erros de predição e necessitam de correção em relação ao método padrão de Penman-Monteith (FAO 56). Esse problema pode ser sanado realizando calibração com técnicas de *machine learning*, as quais possuem elevada capacidade de encontrar padrões nos dados (ADA; SAN, 2018; DEAN; PATTERSON; YOUNG, 2018; HUGHES et al., 2018; MILGROM; TADELIS, 2018; SEKO; TOGO; TANAKA, 2018; SYAM; SHARMA, 2018; VU et al., 2018).

Diante do exposto, objetivou-se estimar a evapotranspiração de referência mensal e a máxima dos doze meses para planejamento, gerenciamento e

dimensionamento de sistemas de irrigação e pedidos de outorga para todo o território brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. O produto MOD16

O produto MOD16 apresenta diferentes resoluções temporais e espaciais. Para realização deste trabalho, utilizou-se o produto mensal com resolução espacial de 1 km. Entretanto, este produto apresenta alguns erros consideráveis como observado em Westerhoff (2015) e Polhamus et al. (2013). Portanto, na realização deste trabalho foram utilizados valores máximos mensais do produto MOD16 calibrado.

Como recomendado por Westerhoff (2015), foi feita a calibração do produto MOD16 a partir de estações *in situ* utilizando *machine learning*, e foram geradas as imagens calibradas para o Brasil. Posteriormente gerou-se uma imagem para cada mês do ano com o valor máximo das imagens calibradas (pixel a pixel). Todavia é importante salientar que a área de estudo abrange dezessete cenas e cento e oitenta imagens mensais (janeiro de 2000 a dezembro de 2014), totalizando 3060 imagens do produto MOD16.

2.2. ETo para projeto de irrigação

A evapotranspiração de referência para projeto (ETproj) foi obtida com a probabilidade de ocorrência de 80% (DOORENBOS e PRUITT, 1977), ou seja, não se espera valor de ETo superior em quatro de cinco anos. Foi utilizada a distribuição normal no estudo da frequência da evapotranspiração de referência, a qual é recomendada por vários trabalhos por possibilitar um melhor ajuste dos dados (ARRUDA; BARROSO, 1984; BACK, 2007; DOORENBOS e PRUITT, 1977; SAAD et al., 2002; SAAD; SCALOPPI, 1988; SILVA et al., 1998, 2014; ULIANA et al., 2017). Entretanto, alguns destes autores destacam que o valor de probabilidade é relativo, já que a água disponível do solo tem um efeito de equilíbrio em curto prazo. Este efeito é menor para solos pouco profundos que para solos profundos e de textura fina. A água disponível do solo deve, portanto, ser considerada. A ETproj a ser considerada deve ser aquela obtida nos meses de pico de uso da água.

2.3. Dados meteorológicos para cálculo da ETo

A série histórica de dados meteorológicos foi obtida no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP), disponibilizado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram utilizadas informações de 265 estações distribuídas por todo o Brasil, das quais foram selecionadas 259 que não apresentavam grandes falhas nos dados, indicadas na Figura 12 (INMET, 2018). Este banco de dados possui informações referentes às medições diárias dos elementos meteorológicos, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial (OMM).

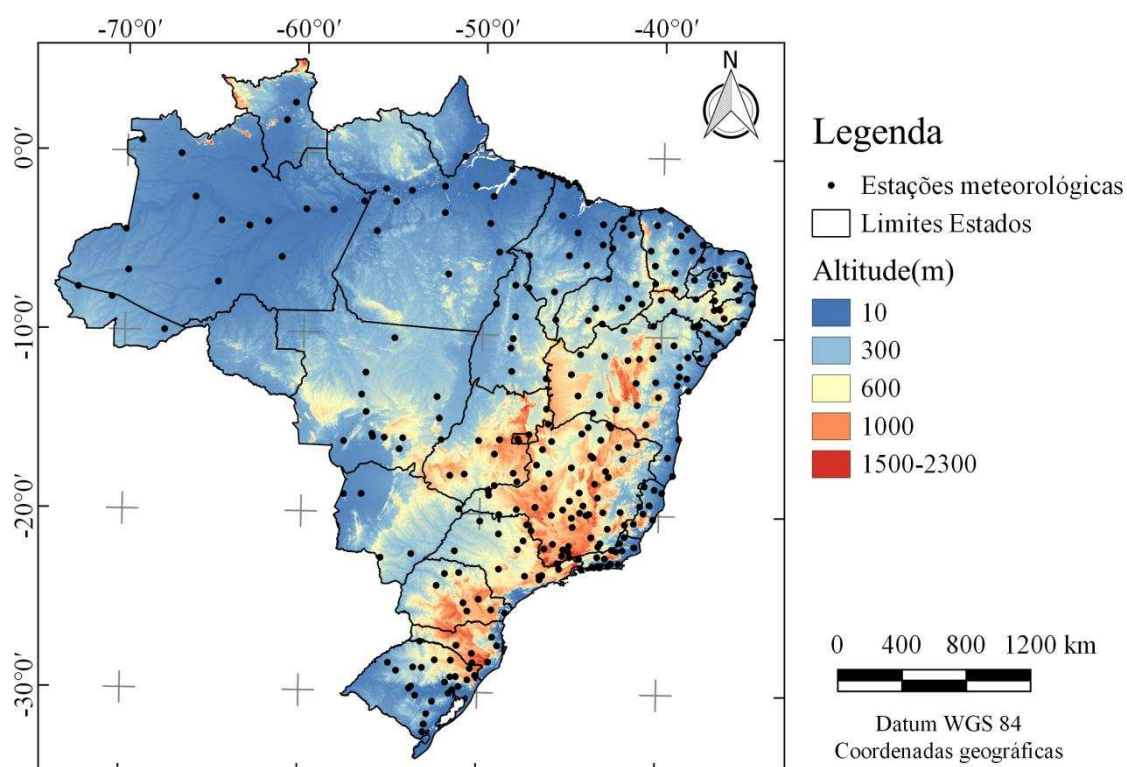


Figura 12 - Localização da área de estudo e estações meteorológicas do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (INMET, 2018).

O download dos dados das estações representadas na Figura 12, as quais pertencem ao INMET foi realizado para o período de 01/01/2000 até 31/12/2014, para realização do estudo de probabilidade para projeto de irrigação, conforme proposto por Doorenbos e Pruitt (1977).

2.4. Cálculo da ETo e ETproj.

Para o cálculo da ETo foi utilizada a equação padrão recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998) que assume como premissas, uma superfície cultivada com grama hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23 (Eq. 1).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (1)$$

em que: ET_o - evapotranspiração de referência, mm d^{-1} ; R_n - saldo de radiação na superfície, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; G - fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$; t - temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$; u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ; e_s - pressão de saturação de vapor, kPa ; e_a - pressão de vapor atual do ar, kPa ; Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$; γ - coeficiente psicrométrico, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Em função do grande volume de dados para a análise foi utilizado o software CLIMA[®] para cálculo da ET_o , o qual também possibilita o preenchimento das falhas nos dados meteorológicos. O software foi desenvolvido no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Braisl, por Faria et al. (2002), e calcula ET_o pelo método de Penman-Monteith (FAO 56), exemplificado na Equação 1. Em seguida realizou-se o preenchimento de falhas por métodos já validados e utilizados por diversos autores (BARBIERI et al., 2016; DALLACORT et al., 2011; FANTE; SANT'ANNA NETO, 2016; FENNER et al., 2015; GARCIA GARCIA et al., 2013; PIZZATO et al., 2012; RAMOS et al., 2017, 2015).

Para cada uma das 259 estações meteorológicas, os valores de ET_o foram agrupados por meses do ano e ordenados de forma crescente. Como indicado por Doorenbos e Pruitt (1977), selecionou-se o valor de ET_o correspondente à probabilidade de 80% de ocorrência da evapotranspiração para utilizá-la como ET_{proj} .

2.5. Calibração com reconhecimento de padrões e dados WordClim

Para realizar a calibração dos dados provenientes do produto MOD16 testaram-se oito algoritmos de reconhecimento de padrões, que foram: LM (Linear Regression), RF (Random Forest), cubist, PLS (Partial Least Squares), PCR (Principal Components Regression), FoBa (Adaptive Forward-Backward Greedy), GBM (Generalized Boosted Regression), GLMboost (Generalized linear model by likelihood based boosting). Todos os modelos foram implementados no *software* estatístico R (R CORE TEAM, 2017).

Cada algoritmo testado tem suas características, vantagens e desvantagens de utilização, porém, por se tratar de um grande número de modelos, serão

descritos apenas os modelos que apresentaram alto potencial para uso neste trabalho.

A regressão linear visa a encontrar o plano que minimiza a soma dos quadrados dos erros entre os dados observados e os preditos. Uma vantagem desse método é a fácil interpretação dos coeficientes que são gerados no modelo, além de ter um custo computacional baixo em relação aos demais (KUHN; JOHNSON, 2013).

O modelo cubist implementa um algoritmo de árvores de regressão, que acopla técnicas baseadas em instâncias e modelos para dar origem a modelos de regressão multivariada a partir de dados de treinamento. Esse modelo utiliza vários outros modelos de regressão para que o produto final seja a média de todos. O modelo cubist tem sido amplamente utilizado nas mais diferentes aplicações voltadas ao sensoriamento remoto (KE et al., 2016).

Para auxiliar a capacidade de prever dos algoritmos, utilizaram-se, como fonte de dados adicionais, as variáveis bioclimáticas do Worldclim versão 2, das quais fez-se a seleção das covariáveis com maior influência nos modelos. Para isso utilizou-se o *Recursive Feature Elimination*, presente no pacote Caret (WING et al., 2017), do *software* R. Verificado a maior importância das covariáveis, fez-se a seleção das mais importantes, que foram elencadas nessa ordem pelo *Recursive Feature Elimination*: MOD16 calibrado, radiação e precipitação anual do WordClim. Os produtos provenientes do WordClim foram desenvolvidos por Fick e Hijmans (2017), a partir de dados de 1970 a 2000, usando entre 9.000 a 60.000 estações meteorológicas.

2.6. Metodologia da modelagem

Para realizar a modelagem (Figura 4) foi necessário proceder com o cálculo da ETproj mensal das estações, uma vez que o produto MOD16 utilizado está nessa escala temporal. Utilizaram-se aleatoriamente 80% das estações para realizar a calibração e 20% para a validação. Todos os métodos de *machine learning* utilizados estão disponíveis no pacote Caret (WING et al., 2017) pertencente ao *software* R.

A partir dos dados diários de evapotranspiração das estações, utilizando a probabilidade de ocorrência, obteve-se um valor para cada mês do ano. Foi realizada a modelagem da evapotranspiração provável utilizando-se algoritmos de

reconhecimento de padrões, com as covariáveis radiação e precipitação anual do WordClim e o máximo valor pixel a pixel da ETo do produto MOD16 calibrado.

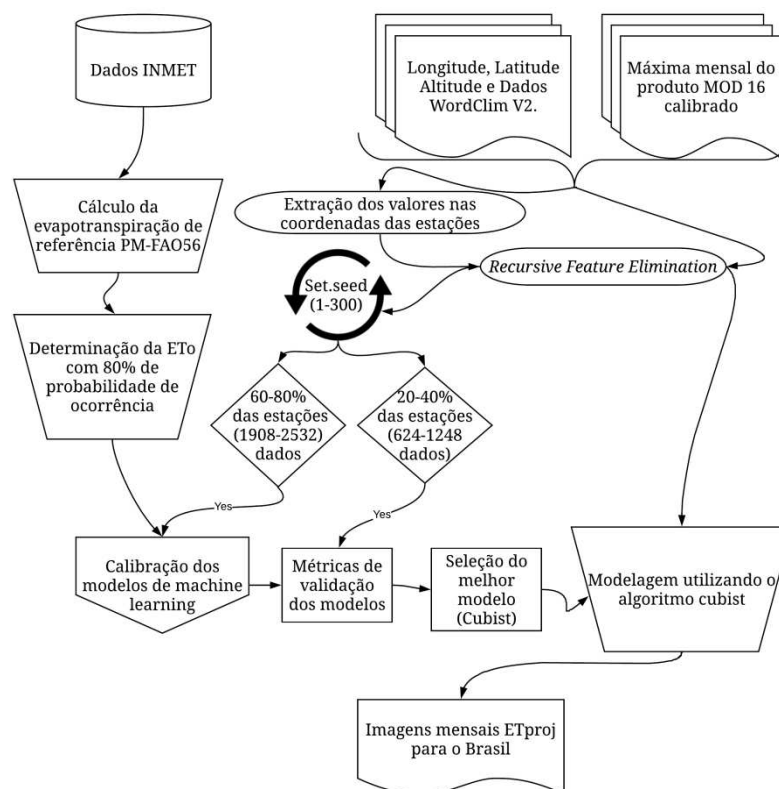


Figura 13 - Passos realizados para desenvolvimento do trabalho.

Como observado na Figura 13, realizou-se uma repetição no treinamento e geração do produto, para aumentar a confiabilidade do produto gerado, já que a seleção dos dados de calibração foram espaciais.

Foram feitas trezentas seleções aleatórias diferentes entre as estações, variando também a porcentagem de calibração e validação. Com esse procedimento foi realizado novecentos treinamentos e gerando imagens para cada mês, com dez mil e oitocentas imagens ao total. A partir das novecentas imagens de cada mês, gerou-se a média da predição para cada mês. Das dez mil e oitocentas imagens gerou-se uma imagem de desvio padrão para verificar o erro da predição do modelo.

2.7. Análises estatísticas

As avaliações estatísticas foram realizadas com base em índices estatísticos que apresentam diferentes funções. O coeficiente de determinação (r^2) indica uma medida descritiva da qualidade do ajuste obtido, ou seja, quanto o modelo é capaz de explicar os dados observados. Entretanto, o índice não leva em

consideração a falta de ajuste, que poderá ser grande, mesmo que os valores observados e preditos estejam não linearmente relacionados. Dessa forma, o r^2 não deve ser considerado sozinho, mas sempre aliado a outras métricas.

O erro médio quadrático (RMSE) fornece uma medida da magnitude média do erro através da diferença quadrática entre os dados estimados e observados. O erro médio absoluto (MAE) fornece um valor médio dos erros absolutos. Ambos variam de 0 a $+\infty$ e quantificam o erro com as mesmas unidades da variável original. O RMSE atribui um peso relativamente alto aos grandes erros e, dessa forma, evidencia a presença de outliers, útil quando erros altos são particularmente indesejáveis (WILKS, 2011; WILLMOTT; MATSUURA, 2005).

O erro do viés médio (MBE) é indicado para visualizar as tendências de subestimativas ou superestimativas. A eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é usada para avaliar o poder preditivo do modelo e varia de $-\infty$ a 1, sendo que 1 corresponde ao ajuste perfeito entre os dados estimados pelo modelo com os dados medidos (MORIASI et al., 2007; WILLMOTT, 1982).

As equações de 2 a 6 representam os índices estatísticos:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (4)$$

$$\text{MBE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i) \quad (5)$$

$$r^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}))^2}{(\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)} \quad (6)$$

em que: P_i - valor predito pelo modelo, mm por mês; O_i - valor observado, mm por mês; \bar{P} - valor médio predito pelo modelo, mm por mês; \bar{O} - valor médio observado, mm por mês; n - número de dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Seleção do modelo de calibração

Na Figura 14 é possível observar o desempenho dos modelos pré-selecionados depois de realizada a calibração. As métricas foram obtidas variando

o número de estações entre 20% e 40%, de maneira que o treino do modelo não teve contato com as estações usadas na validação. A barra listrada refere-se ao ajuste dos valores da evapotranspiração provável com 80% de probabilidade e a média mensal dos valores máximos dos 15 anos de produto mensal MOD16 calibrado.

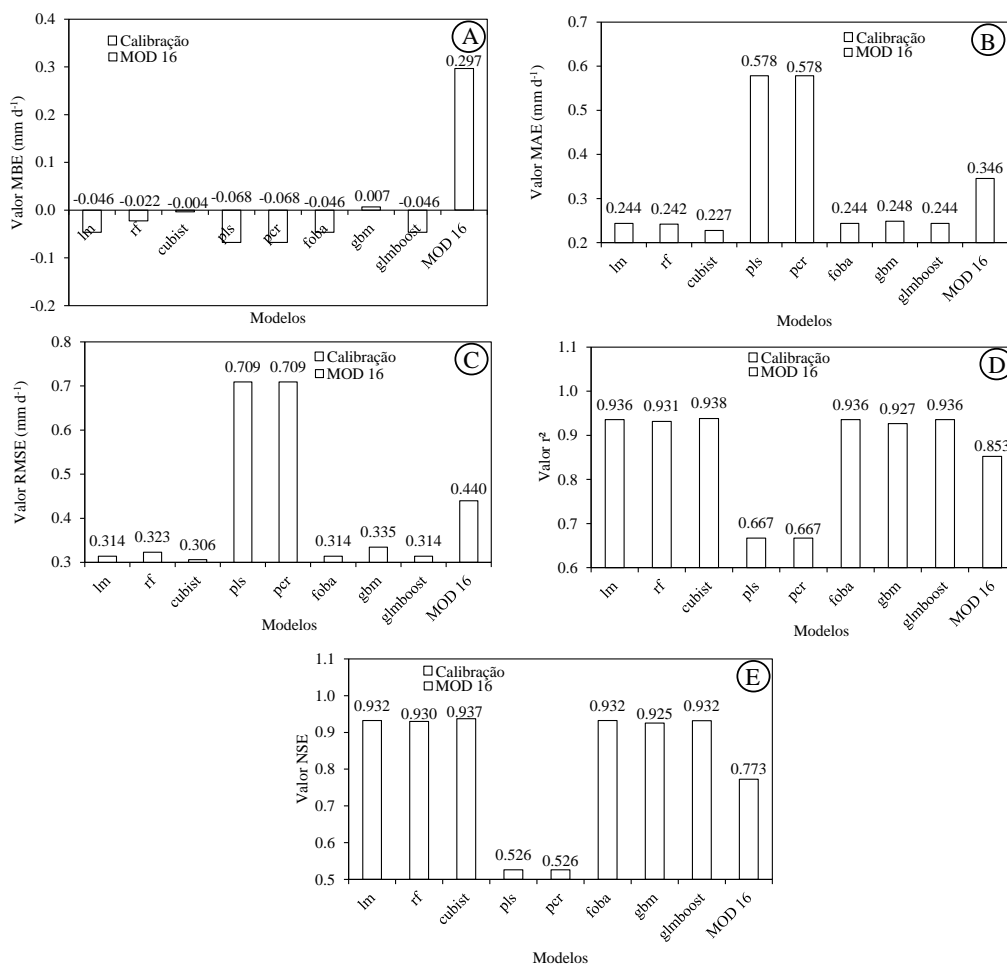


Figura 14 - Resultado dos índices estatísticos usados para avaliar os modelos pré-selecionados em relação aos valores de ETo (FAO 56) com 80% de probabilidade de ocorrência. A) MBE; B) MAE; C) RMSE; D) r²; E) NSE.

Observa-se na Figura 14, que em todas as métricas de avaliação dos modelos, o cubist obteve melhor desempenho em comparação a todos os outros modelos avaliados. A regressão linear também apresentou métricas muito similares ao cubist e mesmo sendo um modelo mais simples, optou-se pelo Cubist pelo pequeno ganho de desempenho. Além disso, mesmo o modelo de regressão linear podendo ser facilmente utilizado e replicado, o produto em questão não será de cálculo rotineiro reforçando a justificativa pela escolha do modelo cubist.

Dessa forma, todos os resultados propostos posteriormente no trabalho foram realizados utilizando o modelo cubist.

3.2. ETproj

A partir da estimativa do desvio-padrão em todo o Brasil (Figura 15), verifica-se que o erro associado à predição dos valores de ETproj é baixo em toda área de estudo.

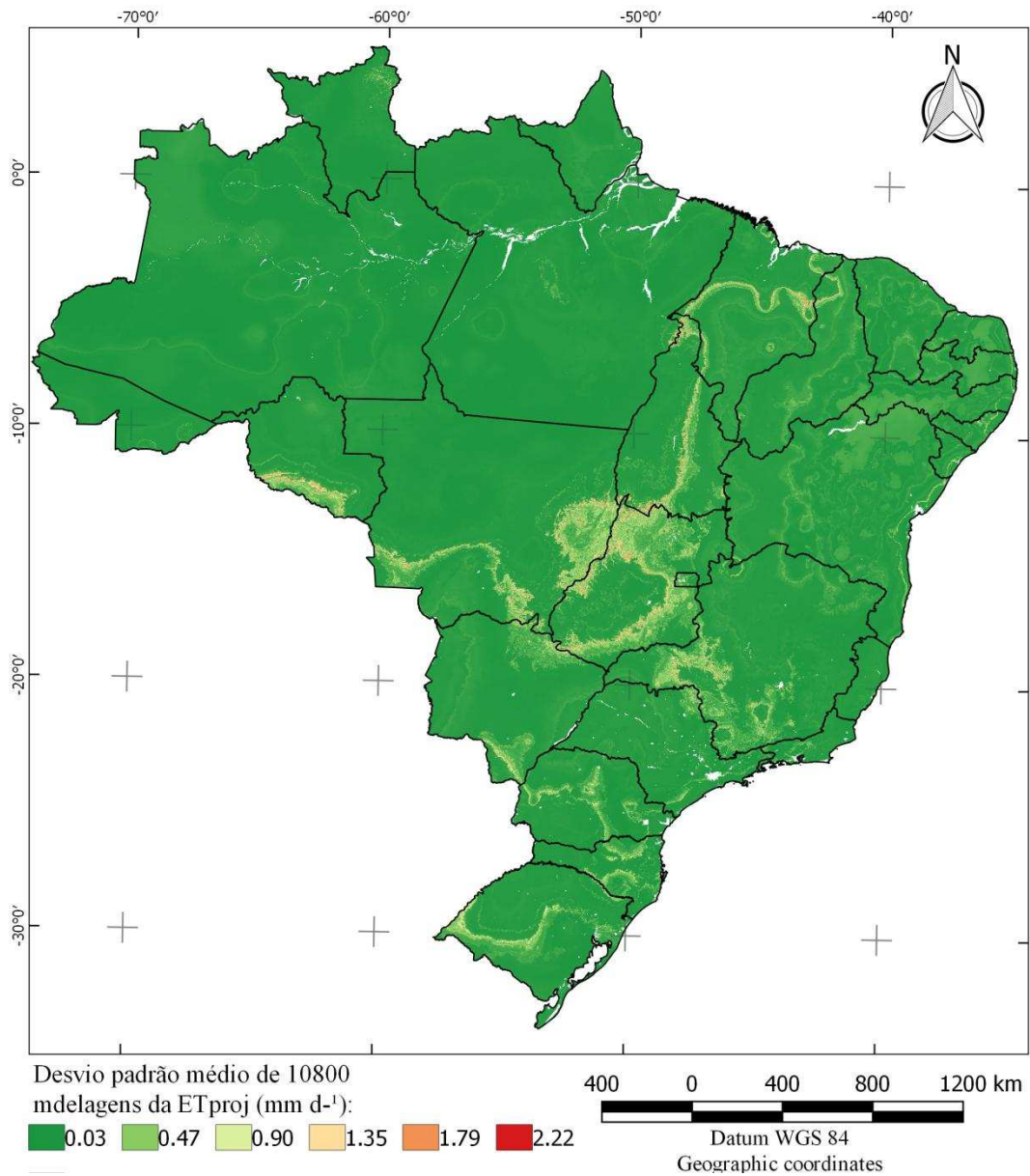


Figura 15 - Desvio padrão para todo Brasil das dez mil e oitocentas estimativas

Na Figura 16 e na Tabela 3, destacam-se os valores da Figura 15, onde se verificam os baixos erros das estimativas realizadas.

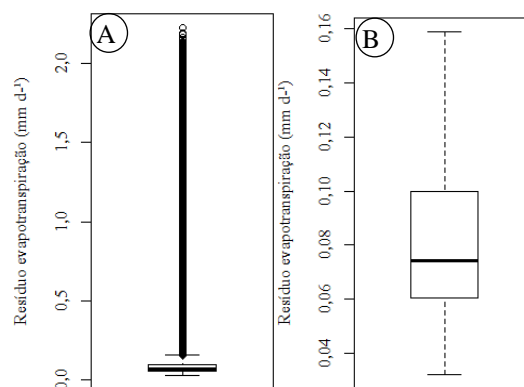


Figura 16 - Boxplot dos dados de desvio padrão gerado das 10.800 imagens. A) Com outliers; B) Sem outliers.

Tabela 3 - Estatística descritiva do desvio padrão das estimativas do modelo

Desvio padrão (mm d ⁻¹)	
Resíduo mínimo	0,033
1º quartil	0,060
Mediana	0,074
3º quartil	0,100
Resíduo Médio	0,113
Resíduo máximo	2,067

Analisando os valores de desvio e cortando-se os maiores valores em um por cento, o máximo de 2,07 torna-se 0,819 mm d⁻¹, um corte de dois por cento chega-se a um desvio máximo de 0,569 mm d⁻¹. Avaliando o menor valor, que é de 0,032 mm d⁻¹, para chegar a 0,1 mm d⁻¹ é necessário retirar entre 74-75% dos menores valores.

Nas Figuras Figura 17 a Figura 28, são apresentados os mapas de ETproj dos meses de janeiro a dezembro e, na Figura 29, o valor máximo de cada pixel ao longo da série MODIS (15 anos), representando, dessa forma, os valores de ETproj para serem utilizados no dimensionamento de projetos de irrigação em todo o Brasil.

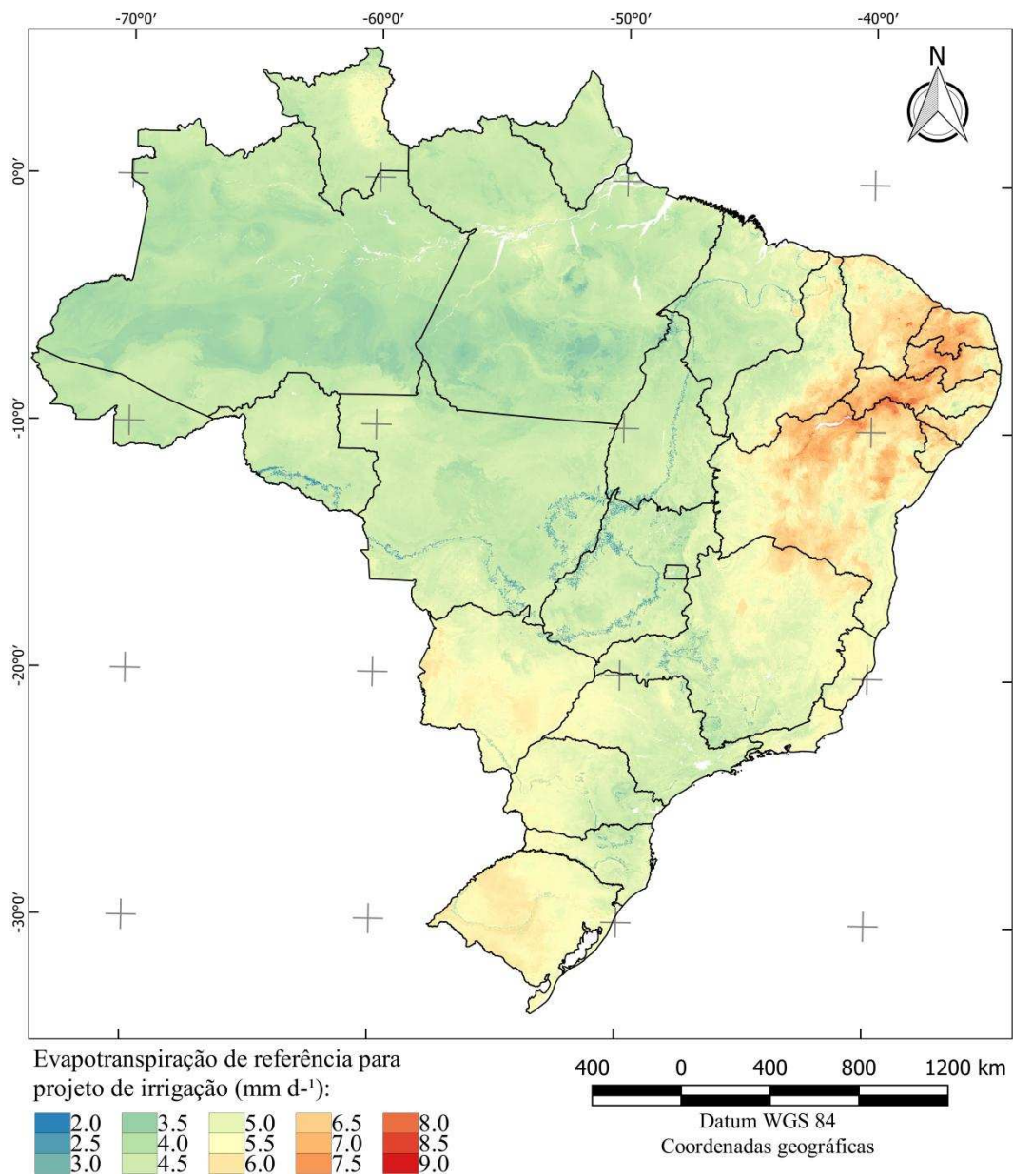


Figura 17 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de janeiro utilizando o modelo cubist.

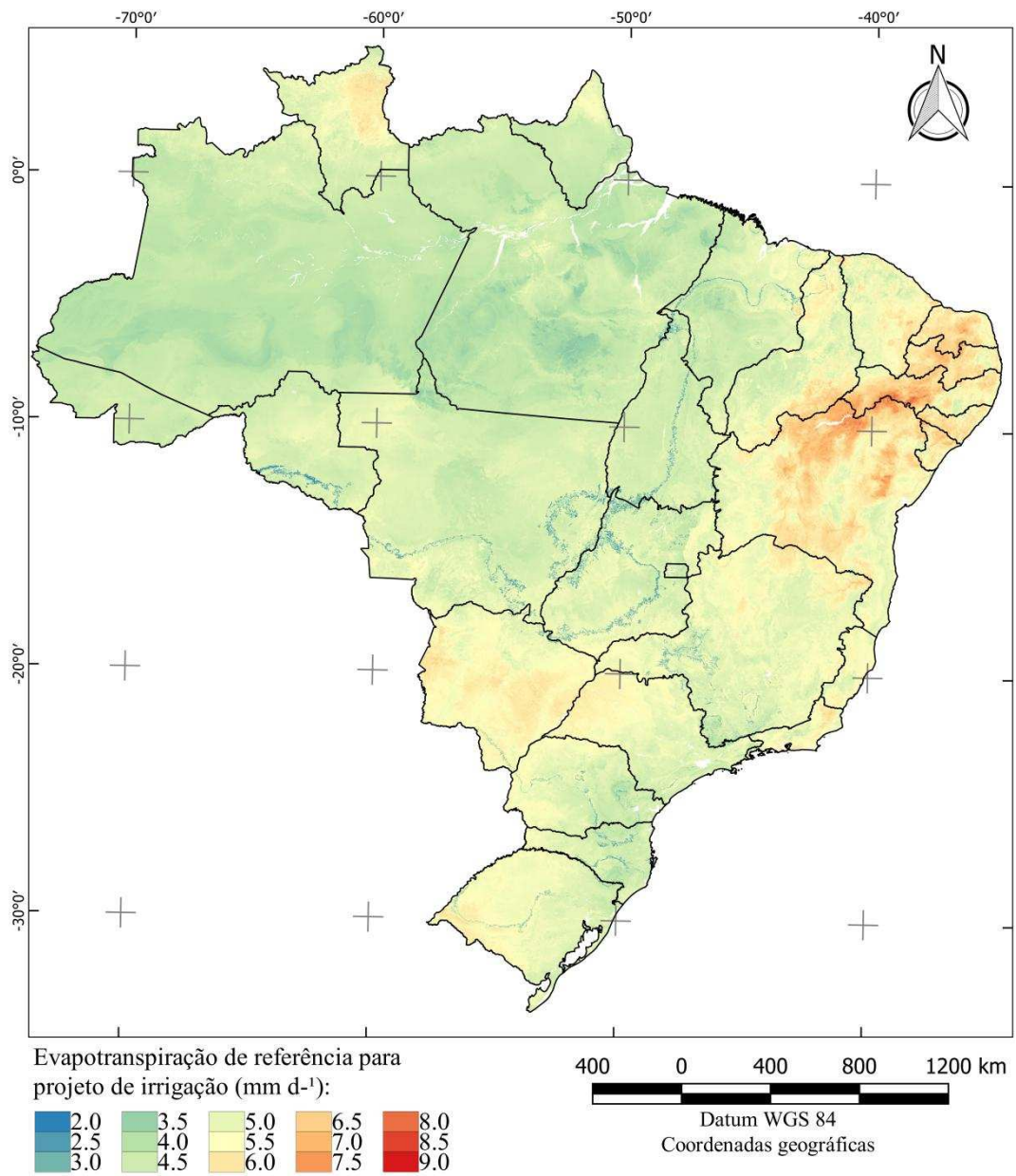


Figura 18 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de fevereiro utilizando o modelo cubist.

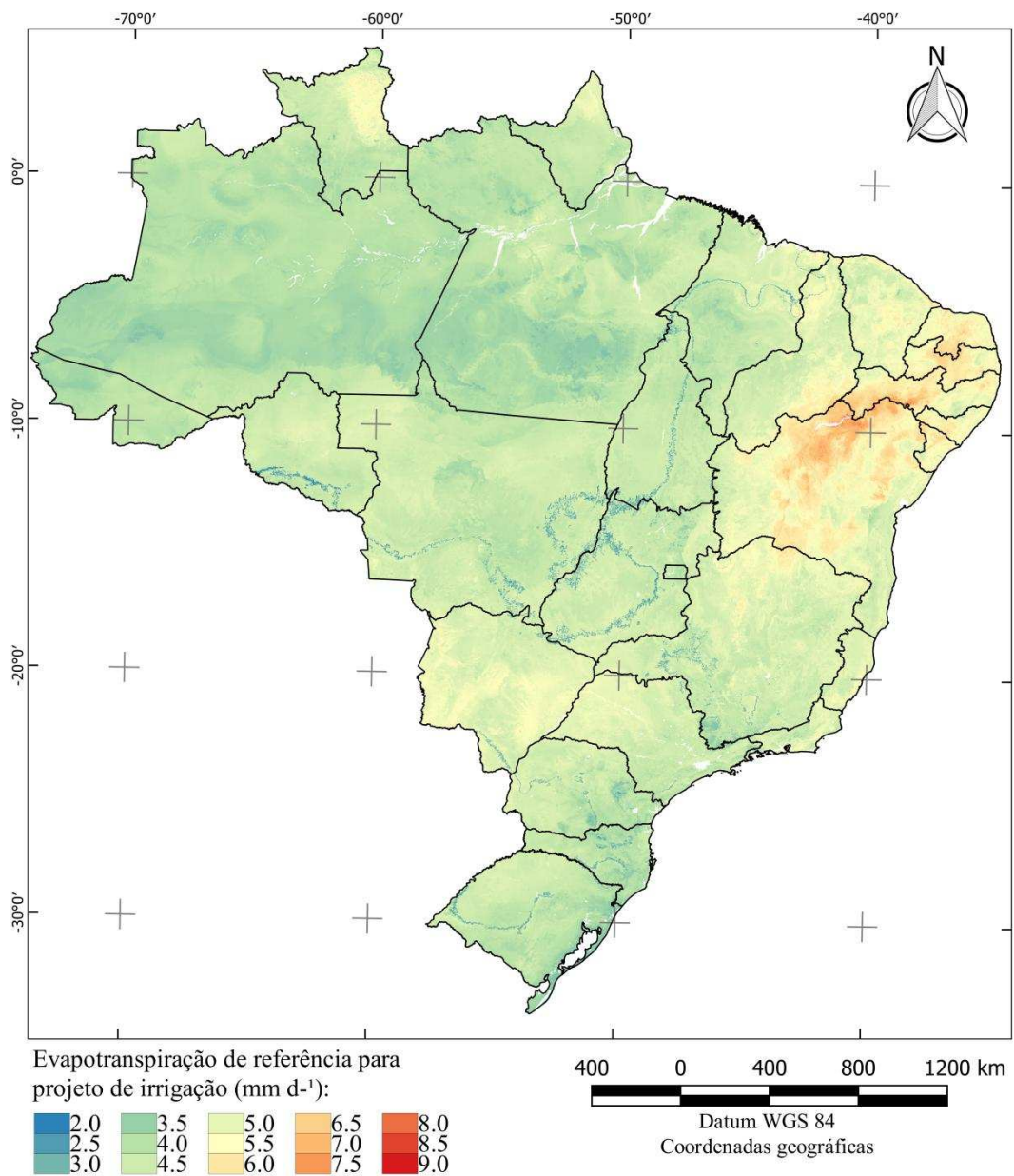


Figura 19 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de março utilizando o modelo cubist.

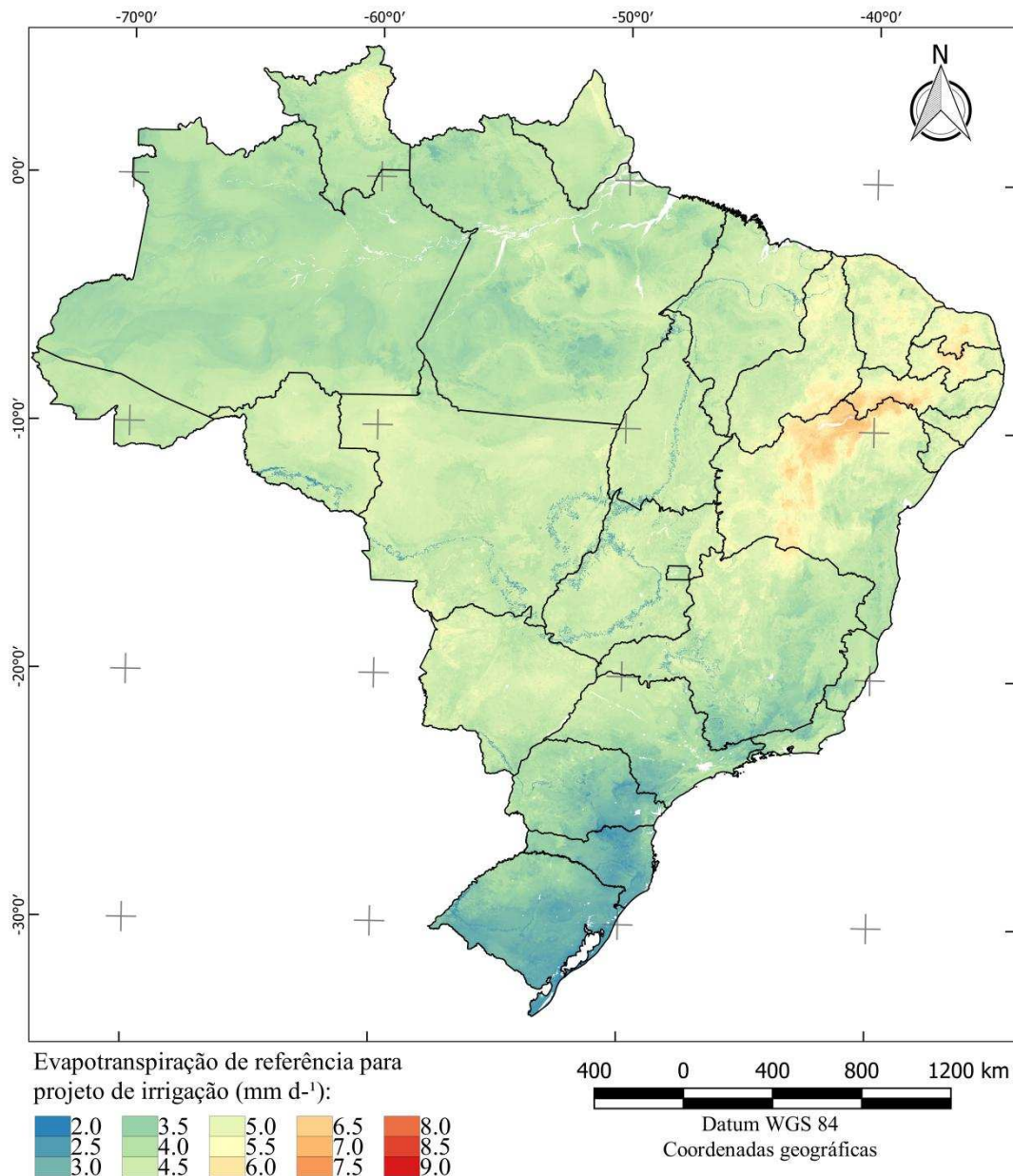


Figura 20 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de abril utilizando o modelo cubist.

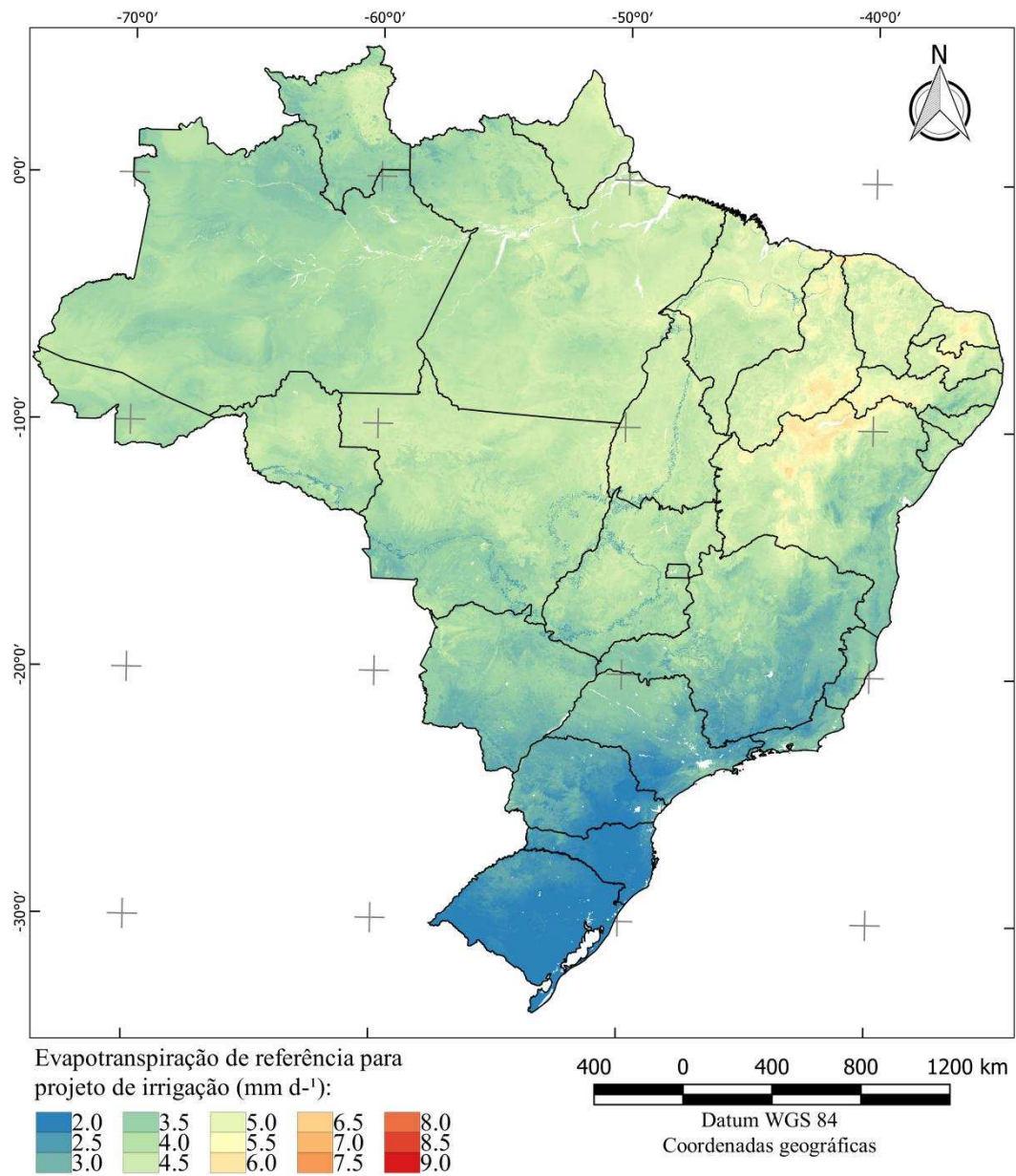


Figura 21 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de maio utilizando o modelo cubist.

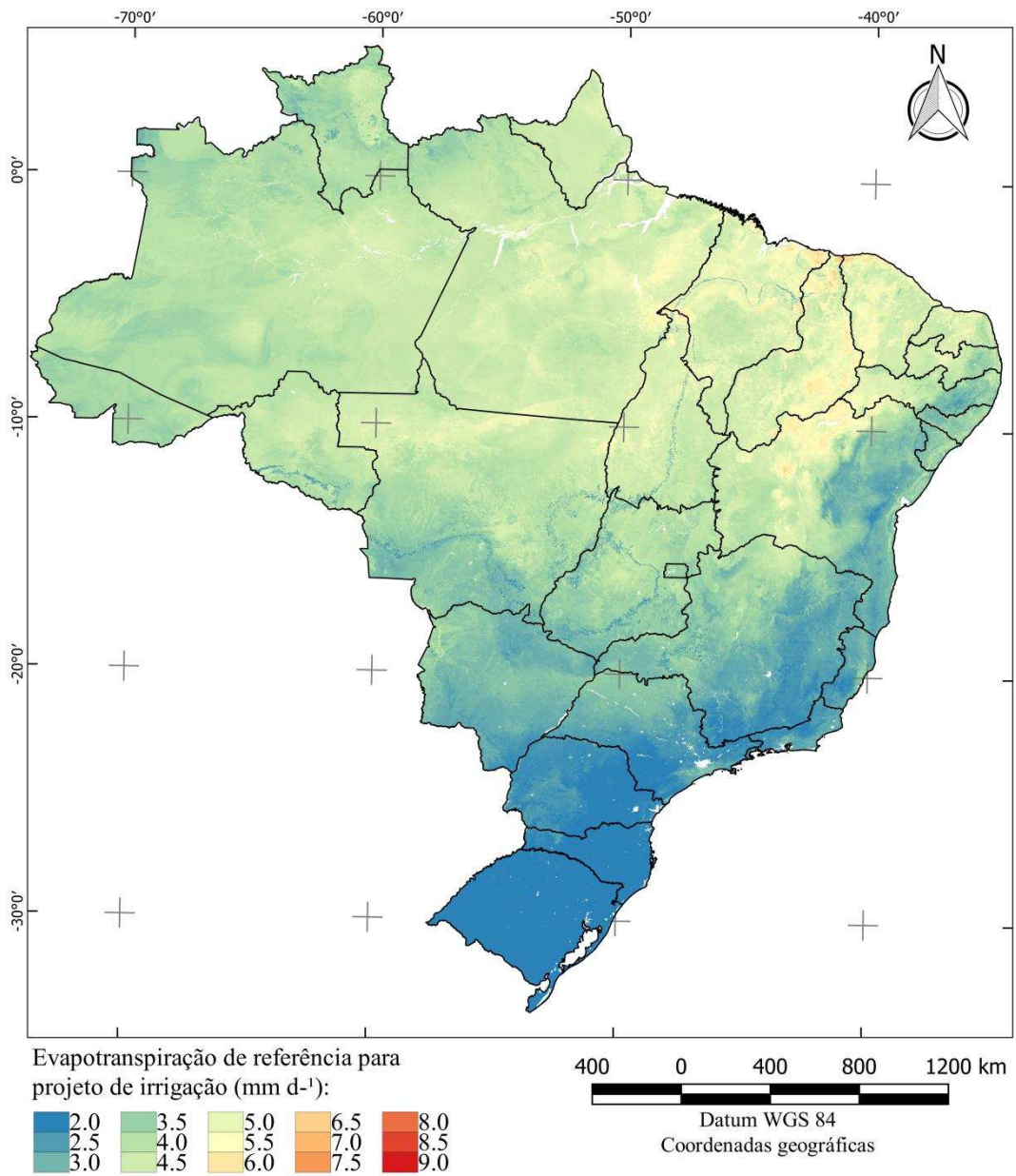


Figura 22 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de junho utilizando o modelo cubist.

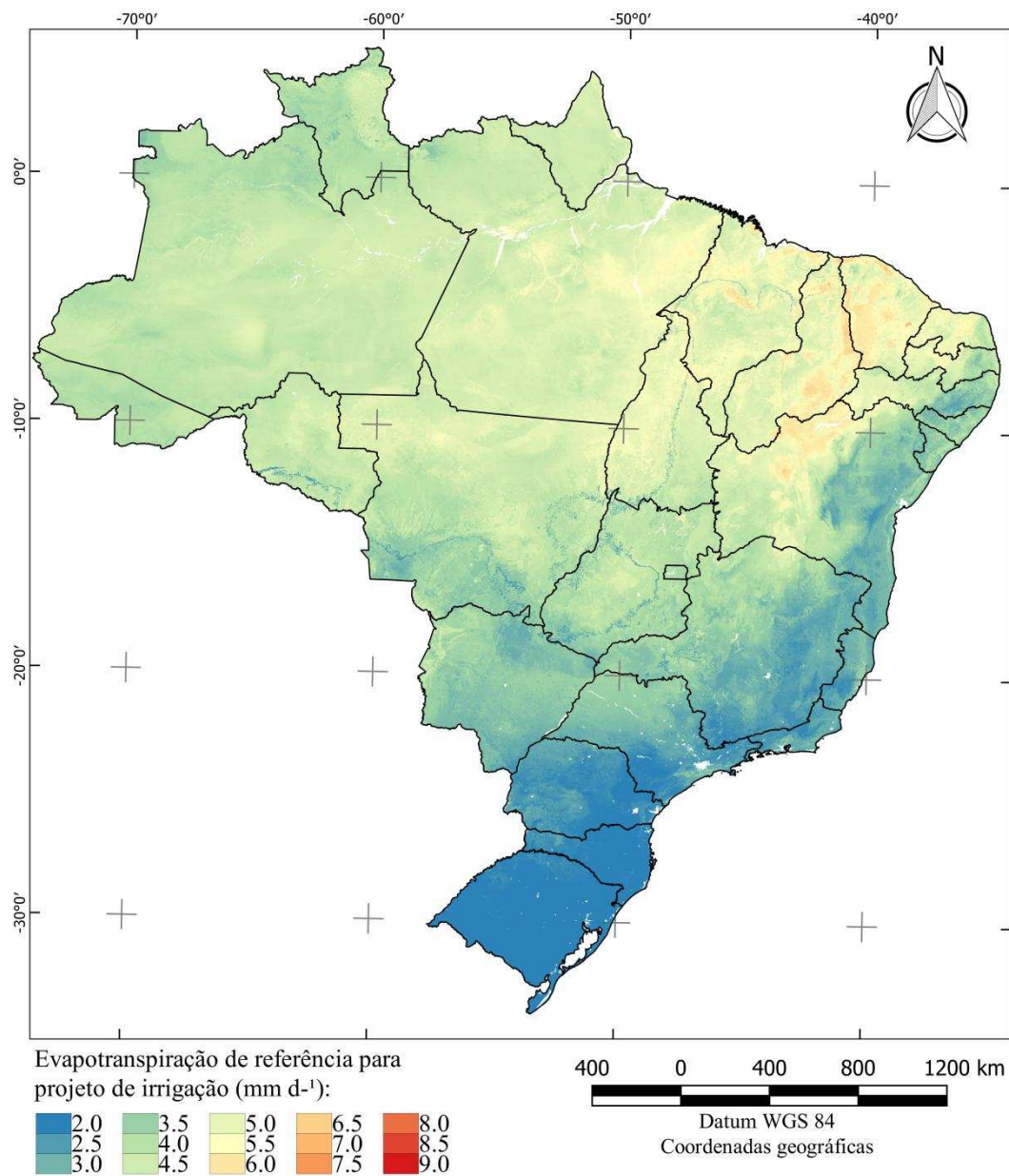


Figura 23 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de julho utilizando o modelo cubist.

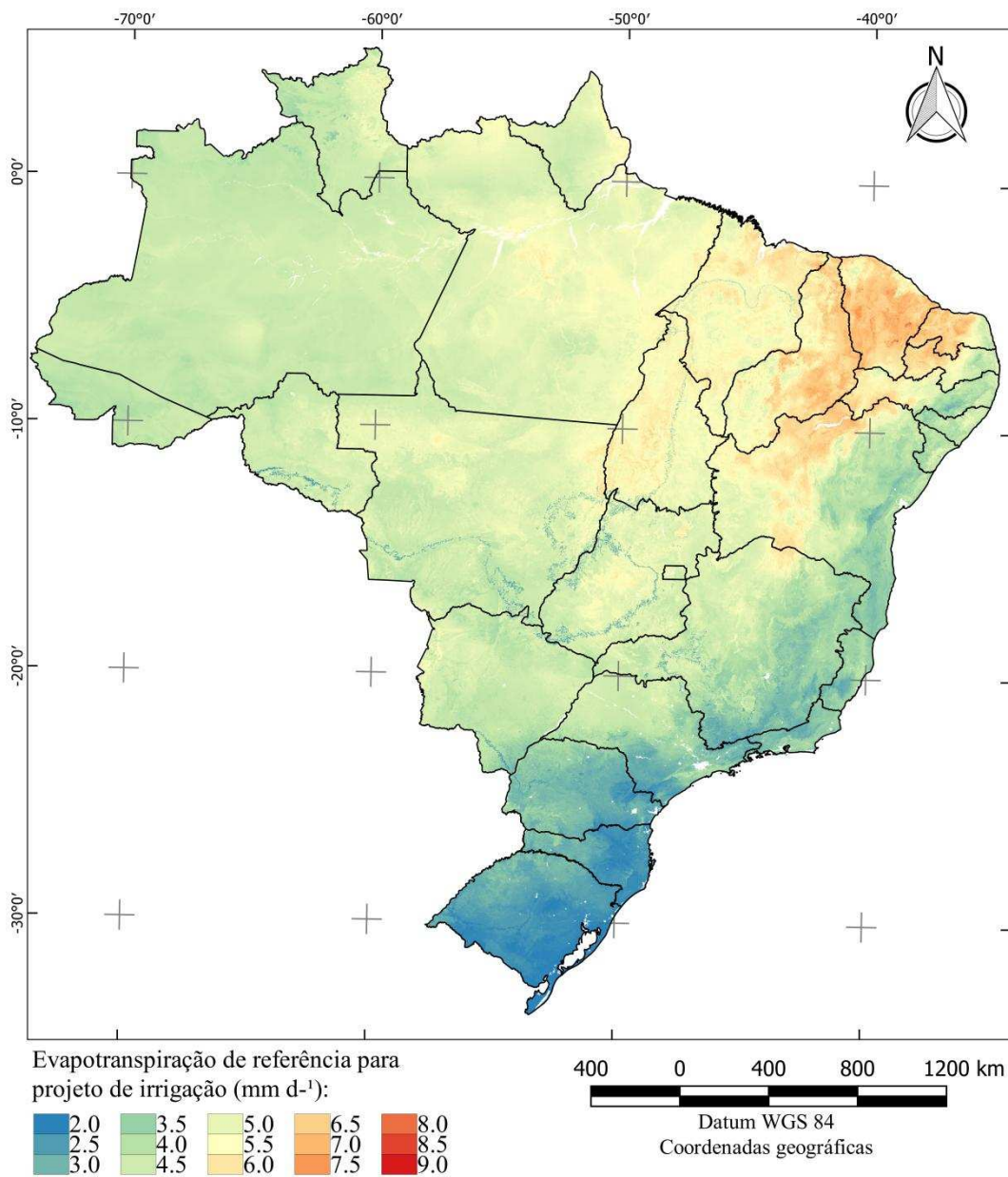


Figura 24 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de agosto utilizando o modelo cubist.

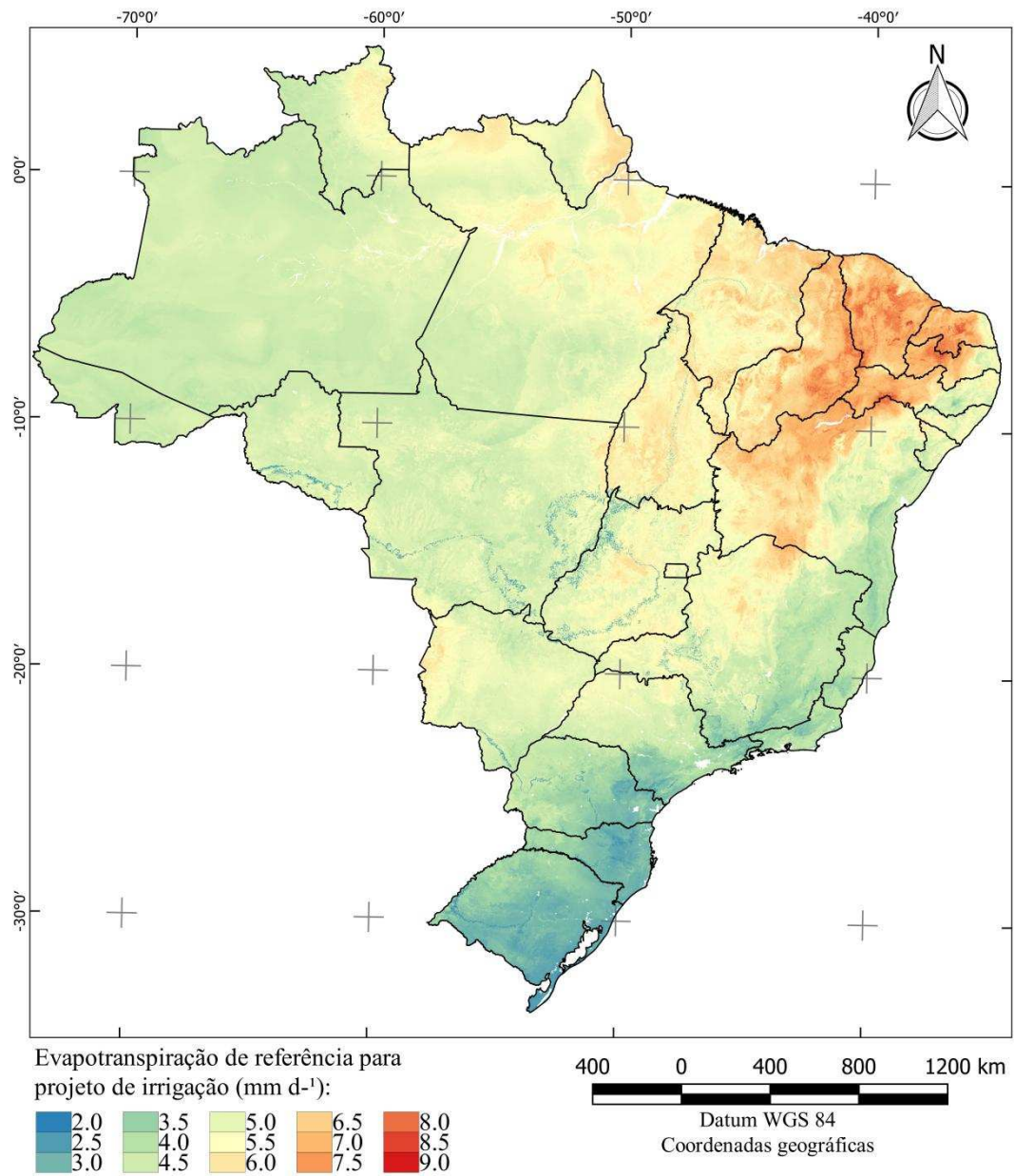


Figura 25 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de setembro utilizando o modelo cubist.

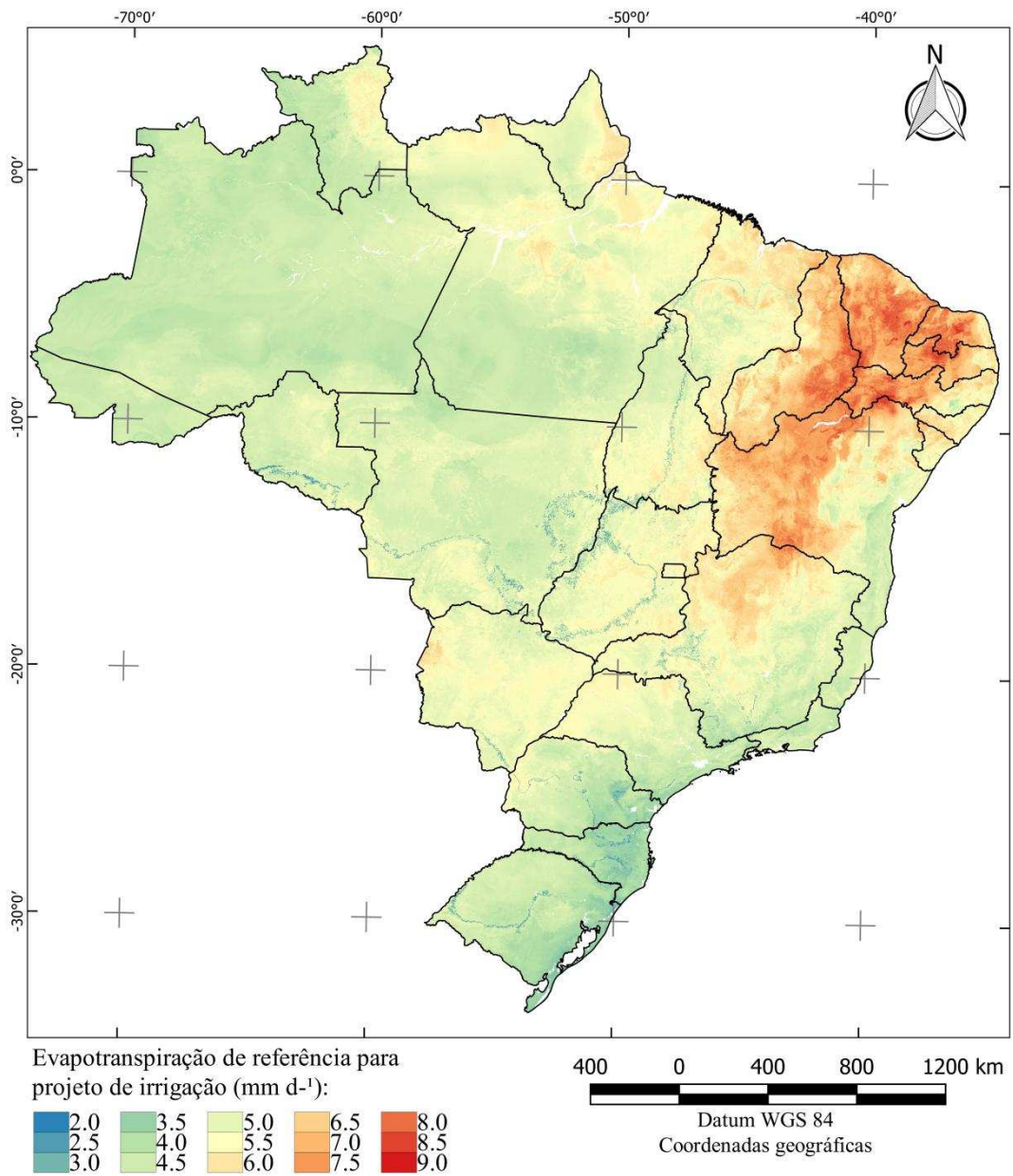


Figura 26 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de outubro utilizando o modelo cubist.

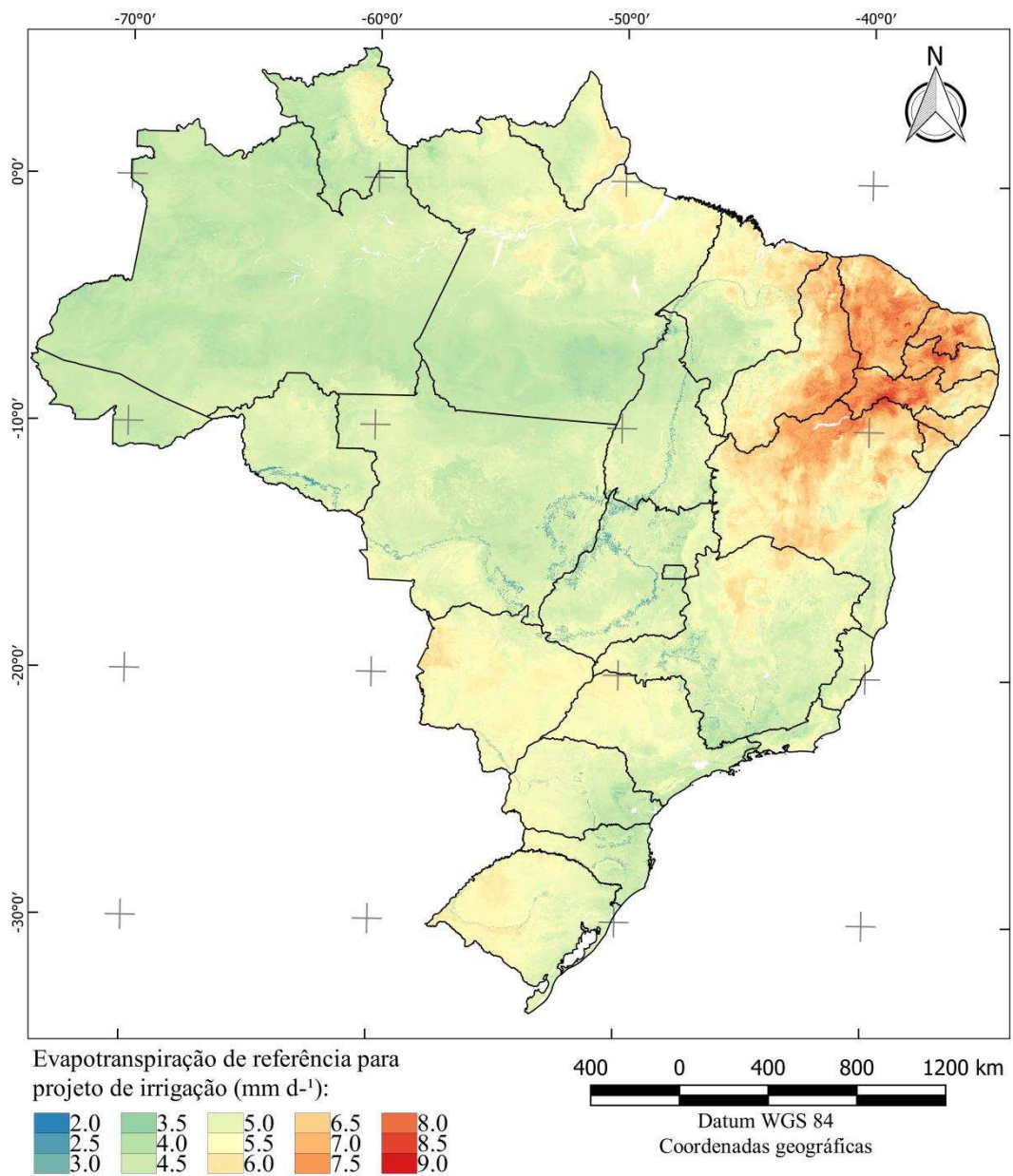


Figura 27 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de novembro utilizando o modelo cubist.

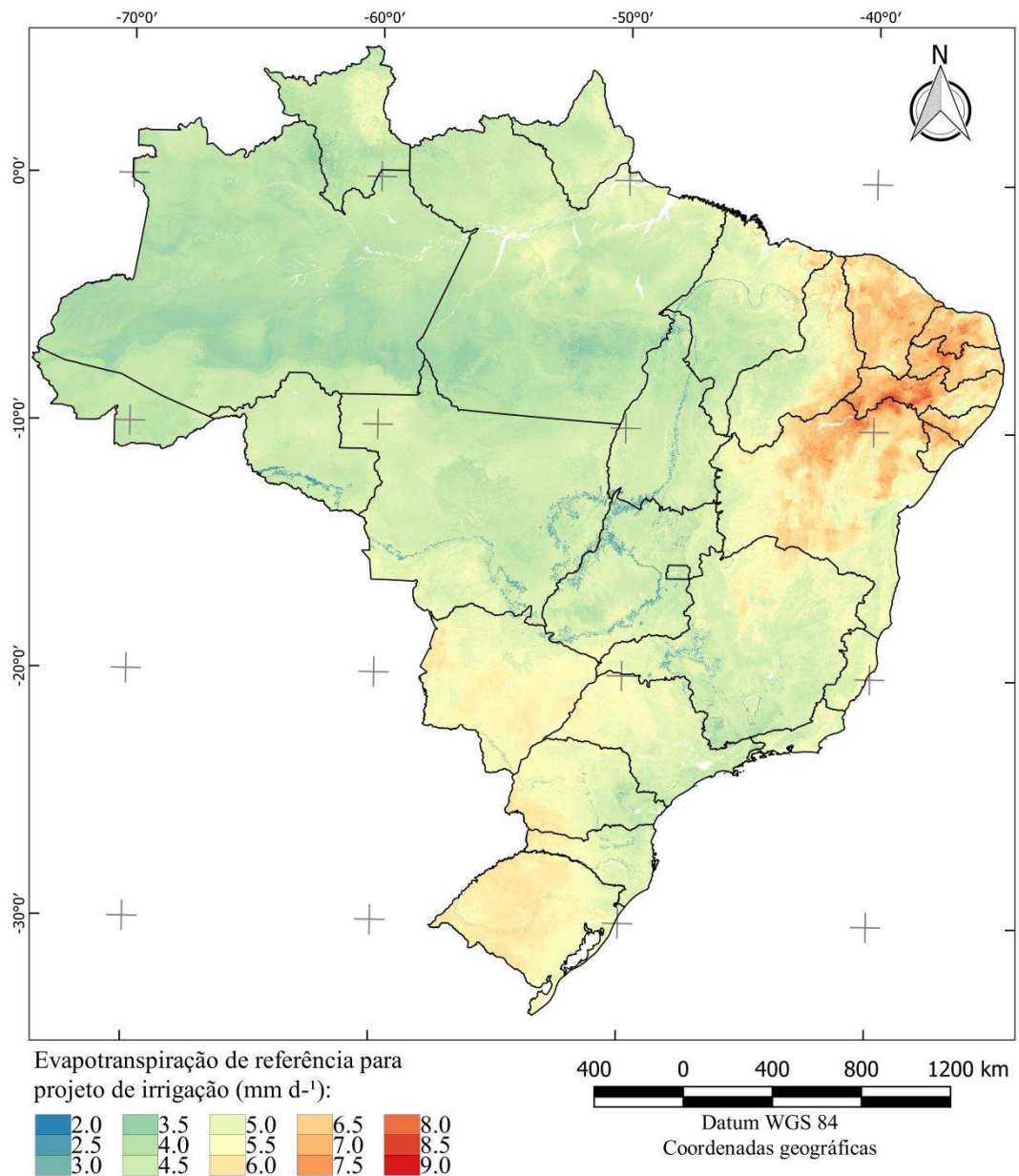


Figura 28 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) para o mês de dezembro utilizando o modelo cubist.

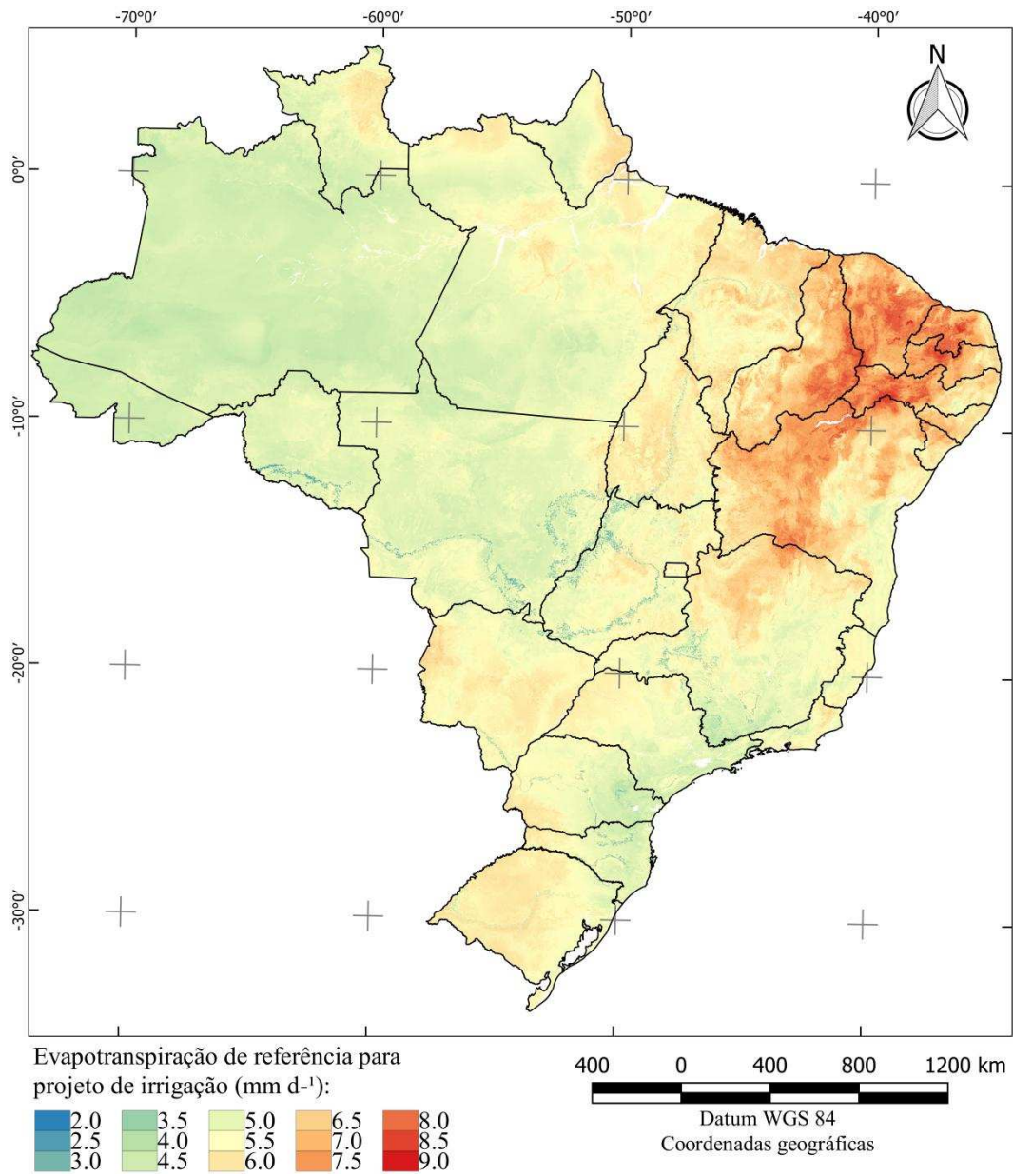


Figura 29 - Evapotranspiração de referência para projeto de irrigação (ETproj) máxima dos doze meses utilizando o modelo cubist.

Como observado nas Figuras de Figura 17 a Figura 29, a obtenção dos valores de ETproj será muito facilitada .

Surendran et al. (2017) realizaram estudos similares aos realizados neste trabalho, entretanto para apenas um ponto na Índia. Os autores usaram a ETo e a precipitação efetiva em cada unidade agro-climática para encontrar a demanda máxima requerida pelas culturas avaliadas. Com os resultados foi possível encontrar uma lâmina ótima esperada para se aplicar.

No trabalho realizado por Saad et al. (2002), esses autores encontraram o valor de ETproj para Piracicaba-SP de 4,9 mm d⁻¹ para o mês de setembro, similar ao presente trabalho, que foi de 5,27 mm d⁻¹ para a mesma localidade nas coordenadas -22,7083° e -47,6333° de latitude e longitude respectivamente (ESALQ-USP, 2018).

Da Silva et al. (2015) encontraram na região de Petrolina - PE, valores de 11,07 mm d⁻¹, valor muito superior ao encontrado neste trabalho (7,65 mm d⁻¹). Esta diferença pode ser atribuída ao período acumulado e método diferentes (tanque classe A), que pode superestimar a ETo.

O mesmo problema de superestimativa pode ser constatado na comparação com o trabalho de Silva et al. (1998) realizado em Cruz das Almas-BA, onde os autores avaliaram diferentes distribuições de probabilidade e períodos de acumulação da ETo obtida pelo tanque classe A. Para 80% de probabilidade e 5 dias de ETo acumulados, situação que mais se assemelha a presente pesquisa, os autores encontraram ETo de 6,94 mm d⁻¹, superior ao encontrado neste trabalho, de 5,59 mm d⁻¹.

Back (2007) trabalhando com a variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo em Urussanga - SC, estimou o maior valor de ETo referente ao mês de janeiro, entre 4,1 a 4,9 mm d⁻¹, valores que compreendem ao indicado pelo presente trabalho (4,83 mm d⁻¹).

Uliana et al. (2017) determinaram a ETproj em oito localidades do Espírito Santo, porém, os valores obtidos pelos autores foram altos, comparados aos deste trabalho, sendo que o valor mais extremo ocorreu em Presidente Kennedy, onde a estimativa da ETproj máxima foi de 7,9 mm d⁻¹, enquanto no presente trabalho foi de 5,2 mm d⁻¹. Esse alto valor encontrado por Uliana et al. (2017) é considerado elevado, uma vez que ao considerar uma cultura qualquer com coeficiente de cultura (Kc) de 1,1, o sistema de irrigação teria que ser dimensionado para atender

a demanda de 8,69 mm d⁻¹ de irrigação, o que poderia gerar um superdimensionamento, aumentando os custos do sistema.

Na Tabela 4 e Figura 30, podem-se observar a similaridade dos valores dos resultados da ETo dos 12 meses do ano, comparados ao trabalho de Arruda; Barroso (1984) para Ribeirão Preto SP.

Tabela 4 - Comparação dos resultados mensais obtidos por Arruda; Barroso (1984)

Meses do ano	ETproj MOD16 (mm d ⁻¹)	Evaporação Tanque IA-58 (mm d ⁻¹)
Janeiro	4,89	4,8
Fevereiro	5,33	4,6
Março	4,58	4,5
Abril	4,25	3,9
Mai	3,22	3,3
Junho	3,23	2,8
Julho	3,26	2,8
Agosto	5,07	4,0
Setembro	5,24	4,9
Outubro	5,36	5,0
Novembro	5,16	5,3
Dezembro	5,22	5,1

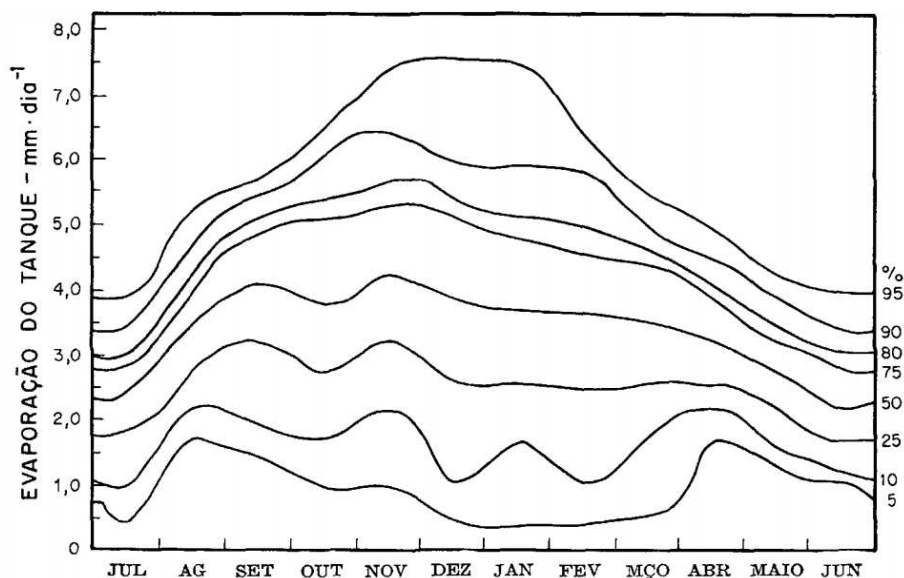


Figura 30 - Curvas de evapotranspiração do tanque IA-58 para várias frequências de ocorrência mensal. Período de 1962 a 1975, na Estação Experimental de Ribeirão Preto.

Fonte: Arruda; Barroso (1984)

Arruda; Barroso (1984) trabalhando com um método diferente, encontraram valores e comportamento da ETproj muito similar ao do presente trabalho, comprovando a potencialidade do produto gerado.

Na Tabela 5, é possível observar a comparação entre a ETo obtida em diversos trabalhos encontrados na literatura e a desse trabalho, para as mesmas localidades.

Tabela 5 - Valores de ETproj da literatura e do presente trabalho (MOD16).

ETproj MOD16 (mm d⁻¹)	ETproj Literatura (mm d⁻¹)	Autores	Locais	Latitudes (graus)	Longitudes (graus)	Método de estimativa da ETo	Período acumulado (dias)	Probabilidade utilizada (%)
5,27	4,90	Saad et al, (2002)	Piracicaba-SP	-22,7083	-47,6333	FAO 56	14-21	75
7,65	11,07	Da Silva et al, (2015)	Petrolina-PE	-9,15	-40,3667	Tanque classe A	15	75
4,83	4,90 - 4,10	Back (2007)	Urussanga-SC	-28,5167	-49,3167	FAO 56	1-30	75
5,36	5,30	Arruda; Barroso (1984)	Ribeirão Preto-SP	-21,2087	-47,8743	Tanque IA-58	30	75
5,59	6,94	Silva et al, (1998)	Cruz das Almas-BA	-12,6775	-39,1064	Tanque classe A	5	80
5,66	7,00	Uliana et al,(2017)	Alegre-ES	-20,7504	-41,4889	FAO 56	1	75
5,69	6,90	Uliana et al,(2017)	Alfredo Chaves-ES	-20,6365	-40,7418	FAO 56	1	75
5,64	6,40	Uliana et al,(2017)	Linhares-ES	-19,3569	-40,0687	FAO 56	1	75
5,53	6,60	Uliana et al,(2017)	Nova Venécia-ES	-18,6953	-40,3906	FAO 56	1	75
5,20	7,90	Uliana et al,(2017)	Presidente Kennedy-ES	-21,1008	-41,0394	FAO 56	1	75
5,50	5,20	Uliana et al,(2017)	Santa Teresa-ES	-19,9884	-40,5796	FAO 56	1	75
5,50	6,40	Uliana et al,(2017)	São Mateus-ES	-18,6762	-39,8641	FAO 56	1	75
5,51	6,70	Uliana et al,(2017)	Vitória-ES	-20,2711	-40,3060	FAO 56	1	75
7,09	6,59	Linhares et al, (2014)	Mossoró-RN	-5,1833	-37,3333	FAO 56	10	80
7,73	6,73	Silva et al, (2014)	Crateús-CE	-5,1783	-40,6775	FAO 56	1	75
7,93	7,71	Silva et al, (2014)	Quixeramobim-CE	-5,1992	-39,2928	FAO 56	1	75
7,36	6,27	Silva et al, (2014)	Tauá-CE	-6,0031	-40,2928	FAO 56	1	75
4,94	5,20	Denski; Back (2015)	Urussanga-SC	-28,5167	-49,3167	FAO 56	1	75
5,96	6,97	Fietz et al, (1997)	Dourados-MS	-22,2467	-54,8211	Penman (1948)	5	75
5,59	5,29	Santos et al, (2014)	Cruz das Almas-BA	-12,6775	-39,1064	FAO 56	30	75

Na Tabela 5, é possível observar que o método do tanque classe A tende a superestimar a ETo em comparação com o método padrão FAO 56. Isso também foi constatado por De Oliveira et al. (2016), que avaliaram a performance da estimativa da ETo por diferentes tanques, e concluíram a baixa eficiência destes métodos.

O grande potencial do presente trabalho foi a determinação dos valores de ETproj para locais com ausência de estações meteorológicas. Os autores citados na Tabela 5 realizaram a mesma determinação, entretanto apenas para localidades que já dispunham de dados meteorológicos históricos, sendo possível fazer isso em apenas 259 localidades do Brasil. Já com a presente pesquisa foi possível determinar dez milhões cento e trinta e um mil quinhentos e sessenta (10,131,560) pontos em todo o Brasil. Com estes resultados, os projetistas e pesquisadores terão condições de acertar a lâmina de projeto no dimensionamento dos sistemas de irrigação. Com certeza, isso trará maior segurança à produção agrícola, garantindo maior lucratividade e menos gastos com insumos agrícolas de modo geral.

4. CONCLUSÕES

O modelo e as imagens propostas pelo trabalho demonstraram um grande e valioso potencial de utilização para planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, como o dimensionamento de projetos de irrigação ou informação para pedidos de outorga de uso da água.

Dentre os oito modelos testados e validados, o cubist foi o modelo que obteve os melhores resultados no geral, e, portanto, é o modelo mais indicado para estimativa da ETproj. Entretanto, a regressão linear pode ser aplicada, pois apresenta resultados similares e disponibiliza uma equação simples para ser utilizada.

Para realização do planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, o produto desenvolvido no presente trabalho abriu possibilidade de fácil obtenção da ETproj para todo o Brasil, já que o pixel da imagem tem uma área pequena, de 86,056 hectares (927,662 x 927,662 m).

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, S. S.; MALEK, M. A. Empirical Penman-Monteith equation and artificial intelligence techniques in predicting reference evapotranspiration: a review. **International Journal of Water**, v. 10, n. 1, p. 55, 2016.

ADA, M.; SAN, B. T. Comparison of machine-learning techniques for landslide susceptibility mapping using two-level random sampling (2LRS) in Alakir catchment area, Antalya, Turkey. **Natural Hazards**, v. 90, n. 1, p. 237-263, jan. 2018.

ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

ARRUDA, F. B.; BARROSO, L. F. S. Estimativa do uso de água para fins de projetos de irrigação, em função da evaporação de tanque, em Ribeirão Preto. **Bragantia**, v. 43, n. 2, p. 677-682, 1984.

BACK, A. Variação da evapotranspiração de referência calculada em diferentes intervalos de tempo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 139-145, 2007.

BARBIERI, J. D. et al. Agroclimatic aptitude for peanut in the West region of the state of Mato Grosso. **Científica**, v. 44, n. 4, p. 457, 11 nov. 2016.

BESHIR, S. Review on Estimation of Crop Water Requirement, Irrigation Frequency and Water Use Efficiency of Cabbage Production. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 5, n. 7, p. 59-69, 2017.

CARVALHO, L. G. DE et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, 6 jul. 2011.

CLEUGH, H. A. et al. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, n. 3, p. 285-304, fev. 2007.

DA SILVA, A. O. et al. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, PE / reference evapotranspiration for design of irrigation systems in Petrolina, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 9, n. 1, p. 30, 31 mar. 2015.

DALLACORT, R. et al. Distribuição das chuvas no município de Tangará da Serra, médio norte do Estado de Mato Grosso, Brasil. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 33, n. 2, 11 abr. 2011.

DEAN, J.; PATTERSON, D.; YOUNG, C. A New Golden Age in Computer Architecture: Empowering the Machine Learning Revolution. **IEEE Micro**, p. 1-1, 2018.

DENSKI, A. P. N.; BACK, Á. J. Aderência de distribuições de probabilidades aos dados de evapotranspiração de referência decendial (grib's distribution

probabilities of evapotranspiration data to decennial reference). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, 31 dez. 2015.

DOORENBOS, J. e PRUITT W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements, FAO-24**. Rev ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1977.

EBISSA, G. K. Agronomy Study On Small Scale Irrigation Project. **International Journal of Engineering Development and Research**, v. 5, n. 2, p. 1157-1167, 2017.

ESALQ-USP. **Coordenadas geográficas do posto meteorológico ESALQ**. Disponível em: <<http://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/base.html>>. Acesso em: 3 fev. 2018.

FANTE, K. P.; SANT'ANNA NETO, J. L. Técnicas estatísticas para a homogeneização de dados de temperatura em séries temporais climatológicas (statistical techniques for temperature data homogenization in climatological time series). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, 15 jul. 2016.

FAO. **Aquastat—Water uses**. c. Disponível em: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm>. Acesso em: 19 jan. 2018.

FARIA, R. T. DE et al. CLIMA-programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. **Boletim Técnico IAPAR**, Londrina. n. 66, p. 29, 2002.

FENNER, W. et al. Índices de satisfação de necessidade de água para o milho segunda safra em Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, 15 abr. 2015.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. **Journal of Experimental Botany**, v. 58, n. 2, p. 147-159, 6 nov. 2006.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas: NEW CLIMATE SURFACES FOR GLOBAL LAND AREAS. **International Journal of Climatology**, 15 maio 2017.

FIETZ, C. R. et al. Probabilidade de ocorrência da evapotranspiração de referência na região de Dourados, MS. **Ciência Rural**, v. 27, n. 2, p. 207-210, jun. 1997.

GARCIA GARCIA, R. et al. Calendário agrícola para a cultura do milho em Sinop (MT). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 218-222, jun. 2013.

GAVILÁN, P.; CASTILLO-LLANQUE, F. Estimating reference evapotranspiration with atmometers in a semiarid environment. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 3, p. 465-472, mar. 2009.

HUGHES, M. et al. Machine Learning to Predict the Global Distribution of Aerosol Mixing State Metrics. **Atmosphere**, v. 9, n. 1, p. 15, 9 jan. 2018.

- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Dados meteorológicos. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>. Acesso em: 2 fev. 2017.
- KARAN, E. et al. Towards the optimization of sustainable food-energy-water systems: A stochastic approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 662-674, jan. 2018.
- KE, Y. et al. Downscaling of MODIS One Kilometer Evapotranspiration Using Landsat-8 Data and Machine Learning Approaches. **Remote Sensing**, v. 8, n. 3, p. 215, 8 mar. 2016.
- KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York, NY: Springer New York, 2013.
- LINHARES, P. C. F. et al. Tables of probabilities of reference evapotranspiration for the region of Mossoró, RN, Brazil. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, n. 3, p. 58-67, 2014.
- MILGROM, P.; TADELIS, S. **How Artificial Intelligence and Machine Learning Can Impact Market Design**. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, fev. 2018. Disponível em: <<http://www.nber.org/papers/w24282.pdf>>. Acesso em: 11 fev. 2018.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Symposia of the Society for Experimental Biology**, v. 19, p. 205-234, 1965.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.
- MU, Q. et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v. 111, n. 4, p. 519-536, dez. 2007.
- MU, Q.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1781-1800, ago. 2011.
- PIZZATO, J. A. et al. Distribuição e probabilidade de ocorrência de precipitação em Cáceres (MT). **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 137-142, jun. 2012.
- POLHAMUS, A.; FISHER, J. B.; TU, K. P. What controls the error structure in evapotranspiration models? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 169, p. 12-24, fev. 2013.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. 3.4.3 ed. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2017. v. R i386
- RAMOS, H. D. C. et al. Precipitação e temperatura do ar para o estado de mato grosso utilizando krigagem ordinária. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 20, 1 ago. 2017.

RAMOS, H. DA C. et al. Precipitação pluvial de diamantino-mt em anos de ocorrência de el niño, la niña e neutros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 71-80, mar. 2015.

SAAD, J. C. C. et al. Estudo da distribuição da evapotranspiração de referência visando o dimensionamento de sistemas de irrigação. **IRRIGA**, v. 7, n. 1, p. 10, 9 abr. 2002.

SAAD, J.; SCALOPPI, E. **Frequência de distribuição de evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação**. . In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. ABID Florianópolis, 1988

SADICK, A. et al. Estimation of Potential Evapotranspiration at Botanga Irrigation Scheme in the Northern Region of Ghana. **Environmental Research, Engineering and Management**, v. 70, n. 4, 30 jan. 2015.

SANTOS, N. T. et al. **Distribuições de Probabilidade da Evapotranspiração de Referência em Cruz das Almas, Bahia**. INOVAGRI/INCT-EI/INCTSal, 2014Disponível em: <<http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/simposios/221-ii-inovagri-2014/2149-ii-inovagri-2014-a593.html>>. Acesso em: 4 fev. 2018

SEKO, A.; TOGO, A.; TANAKA, I. Descriptors for Machine Learning of Materials Data. In: TANAKA, I. (Ed.). **Nanoinformatics**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 3-23.

SHI, Z. et al. Trends in reference evapotranspiration and its attribution over the past 50 years in the Loess Plateau, China: implications for ecological projects and agricultural production. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 31, n. 1, p. 257-273, jan. 2017.

SILVA, F. C. DA et al. Distribuição e frequência da evapotranspiração de referência de Cruz das Almas, BA. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 284-286, dez. 1998.

SILVA, M. G. et al. Probabilidade de Ocorrência de Valores Estimados de Evapotranspiração de Referência no Sertão do Ceará. **Revista Engenharia na Agricultura - REVENG**, v. 22, n. 6, p. 562-574, 31 dez. 2014.

SURENDRAN, U. et al. FAO-CROPWAT model-based estimation of crop water need and appraisal of water resources for sustainable water resource management: Pilot study for Kollam district-humid tropical region of Kerala, India. **Current Science (00113891)**, v. 112, n. 1, 2017.

SYAM, N.; SHARMA, A. Waiting for a sales renaissance in the fourth industrial revolution: Machine learning and artificial intelligence in sales research and practice. **Industrial Marketing Management**, jan. 2018.

ULIANA, E. M. et al. Estimate of reference evapotranspiration through continuous probability modelling. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 2, p. 257-267, abr. 2017.

VU, M.-A. T. et al. A Shared Vision for Machine Learning in Neuroscience. **The Journal of Neuroscience**, p. 0508-17, 26 jan. 2018.

WESTERHOFF, R. S. Using uncertainty of Penman and Penman-Monteith methods in combined satellite and ground-based evapotranspiration estimates. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 102-112, nov. 2015.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. Oxford; Waltham, MA: Academic Press, 2011.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 30, p. 1309-1310, 1982.

WILLMOTT, C.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, v. 30, p. 79-82, 2005.

WING, M. K. C. FROM J. et al. **caret: Classification and Regression Training**. 5. ed. Stuttgart, Germany: Journal of statistical software, 2017. v. 28

CONCLUSÕES GERAIS

Dentre os oito modelos testados e validados, o cubist foi o modelo que obteve os melhores resultados no geral, e, portanto, é o modelo indicado para correção do produto MOD16 e modelagem da ETproj.

A calibração tem potencial grande de ganho de acurácia para o produto MOD16, diminuindo sensivelmente a superestimativa da ETo pelo produto MOD16.

Com a calibração do MOD16 torna-se possível a sua utilização em todo território nacional, abrindo possibilidades de utilização do mesmo para diversos outros estudos e trabalhos.

O modelo e as imagens propostas no trabalho demonstraram um grande e valioso potencial de utilização para planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, como o dimensionamento de projetos de irrigação ou informação para pedidos de outorga de uso da água.

Para realização do planejamento e gerenciamento de recursos hídricos o produto desenvolvido no presente trabalho abriu possibilidade de fácil obtenção da ETproj para todo o Brasil e atendendo a situação de cada propriedade, já que o pixel da imagem tem uma área de 86,056 hectares.

O trabalho realizou algo nunca antes feito: gerar a informação da ETproj para dez milhões cento e trinta e um mil quinhentos e sessenta pontos em todo o Brasil.

Todas as imagens podem ser acessadas pelo site:
http://www.gesai.ufv.br/?page_id=323