

REVISTA DO DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

Universidade de São Paulo

www.revistas.usp.br/rdg - ISSN 2236-2878

Volume 37 (2019)

DOI: 10.11606/rdg.v37i0.144716



Dinâmica Espacial e Sazonal da Temperatura, Umidade e Estresse Hídrico em Diferentes Tipos de Cobertura Vegetal

Space and Seasonal Dynamics of the Temperature, Moisture and Water Stress in Different Types of Vegetable Coverage.

José Carlos de Souza¹ , Elfany Reis do Nascimento Lopes² , Jocy Ana Paixão de Sousa³ 
Naia Godoy Padovanni⁴ , Roberto Wagner Lourenço⁵ 

¹Universidade Estadual de Goiás, jose.souza@ueg.br,

<https://orcid.org/0000-0001-9760-6559>

²Universidade Federal do Sul da Bahia, elfanyl@hotmail.com

³Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, jocypet@gmail.com

⁴Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, naiagp@gmail.com

⁵Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, roberto.w@sorocaba.unesp.br

Recebido (Received): 26/03/2018

Aceito (Accepted): 23/05/2018

Resumo: O estudo avaliou o padrão espacial e sazonal da temperatura de superfície, umidade do solo e estresse hídrico em diferentes coberturas do solo, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A proposta foi aplicada na bacia hidrográfica do rio Una, no estado de São Paulo. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8, datadas de janeiro (período úmido) e agosto (período seco) de 2015. Aferiu-se a umidade do solo em trinta e cinco pontos amostrais e os resultados foram interpolados pelo método do Inverso do Quadrado da Distância. O Índice de ressecamento da vegetação por temperatura (TVDI) foi gerado a partir da temperatura de superfície e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Os solos das culturas temporárias registraram as menores perdas em umidade para o período e as áreas de reflorestamento e campo alagado as maiores. O TVDI apresentou influência da sazonalidade climática, com menor estresse hídrico para as áreas de matas. Este índice mostrou-se apropriado para avaliar o déficit hídrico em diferentes coberturas do solo, com potencial para monitorar as perdas de umidade e secas severas da superfície terrestre, tanto sob efeito da sazonalidade climática quanto por ações antrópicas de transformação da paisagem.

Palavras-chave: TVDI, NDVI, Landsat 8, Sazonalidade Climática.

Abstract: The study evaluated the spatial and seasonal pattern of surface temperature, soil moisture and water stress in different soil coverages, using geoprocessing and remote sensing techniques. The proposal was applied in the watershed of the river Una, São Paulo state. Were used images from the Landsat 8 satellite, of the January (wet season) and August (dry season) 2015. Soil moisture was measured in thirty-five sample points and the results were interpolated by Inverse Distance Weighted method. The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), was generated from the surface temperature and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Short-term crop soils recorded the lowest moisture losses for the period and the areas of reforestation and lowland areas the largest. The TVDI showed influence of climatic seasonality with lower water stress in forest areas. This index was appropriate for to evaluate the water deficit in different soil cover, with potential to monitor moisture losses and severe droughts of the Earth's surface, both under the effect of climatic seasonality and by anthropic actions of landscape transformation.

Keywords: TVDI, NDVI, Landsat 8, Climatic seasonality.

1. Introdução

Estudos ambientais de análise da paisagem em bacias hidrográficas têm utilizado amplamente os recursos das geotecnologias, como imagens orbitais para diagnosticar o estado fitossanitário da vegetação e, técnicas de geoprocessamento para espacialização de dados levantados em campo. Procedimentos utilizados com

vistas à compreensão do comportamento espacial das características ambientais da superfície (TUNDISI, 2006; SOUZA, 2017).

Dentre as inúmeras aplicações das imagens orbitais estão os métodos de quantificação e monitoramento da cobertura vegetal através de índices de vegetação, combinando técnicas e ferramentas de sensoriamento remoto. Estes índices fundamentam-se nos valores de refletância e radiância apresentados pela vegetação nas regiões espectrais do visível, do infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e infravermelho termal. Através dessas regiões espectrais é possível mensurar espacialmente a vegetação fotossinteticamente ativa, o conteúdo de água na folhagem, a temperatura e umidade de superfície e a correlação destas variáveis com o estresse hídrico da cobertura vegetal (JENSEN, 2009; BOLFE, 2010; PONZONI; SHIMABUKURO; KUPLICH, 2012; CASTANHEIRA; LANDIM; LOURENÇO, 2014).

Vários índices de vegetação têm sido propostos com intuito de monitorar a presença de água nas estruturas foliares. Gao (1996) propôs o Índice de Água por Diferença Normalizada - NDWI (Normalized Difference Water Index) que mensura o conteúdo de água presente nas folhas, podendo ser utilizado para indicar ocorrências de estresse hídrico. Maki, Ishihara e Tamura (2004) propuseram o Índice de Seca da Vegetação – VDI (Vegetation Dryness Index) que foi desenvolvido para estimar o conteúdo global de água da vegetação e déficits ao nível do dossel, podendo identificar áreas de riscos potenciais a queimadas.

O Índice de Ressecamento da Vegetação por Temperatura - TVDI (*Temperature Vegetation Dryness Index*) monitora a umidade do solo e da cobertura vegetal, é um indicador de escassez de água para a vegetação e também é utilizado na estimativa do potencial de evaporação do solo e evapotranspiração da vegetação (HUANG et al. 2013). O TVDI varia de 0 a 1, os valores próximos de zero indicam condições ótimas de umidade da superfície e vegetação sem estresse, além de ocorrer evapotranspiração máxima e acesso ilimitado a água. Os valores próximos de 1 compreendem condição limitada à disponibilidade de água, superfície seca e estresse hídrico severo na vegetação. O estresse hídrico se estabelece quando o potencial hídrico decresce ao ponto de afetar os processos fisiológicos da vegetação (SANDHOLT; RASMUSSEN; ANDERSEN, 2002; ISHIMURA et al., 2011; HUANG et al. 2013; MENGUE et al. 2015).

A vegetação exerce influência sobre a temperatura da superfície e, através da relação entre a temperatura e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) é possível fazer uma estimativa das condições de umidade na superfície. O NDVI foi desenvolvido por Rouse et al. (1973), e envolve a razão entre duas combinações lineares de bandas nas regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, seus valores variam de -1 a 1, sendo que a vegetação possui valores positivos, corpos d'água e áreas úmidas têm uma resposta negativa e os próximos de zero representam solo sem vegetação (LOURENÇO; LANDIM, 2004; PAU, GILLESPIE; WOLKOVICH, 2012; RAFIQUE et al., 2016).

A estimativa empírica de TVDI é baseada nos pressupostos de que a umidade do solo é a principal fonte de variação da temperatura da superfície, devido às alterações na inércia térmica e do controle da evaporação e transpiração, sobre o balanço de energia solar (SANDHOLT; RASMUSSEN; ANDERSEN, 2002; GARCIA et al., 2007; ISHIMURA et al., 2011).

As condições sazonais do clima tropical com períodos úmidos e secos, associadas à radiação solar, atuam como fatores determinantes para o desenvolvimento fenológico da vegetação, podendo favorecer no período úmido o desenvolvimento e a reprodução das plantas, ou limitá-la no período seco (PEDRONI; SANCHEZ; SANTOS, 2002; MARQUES; OLIVEIRA, 2004; PEREIRA et al., 2008).

Neste contexto, a estrutura do solo e sua capacidade de armazenamento de água, participa como elemento importante na inter-relação sistêmica entre a umidade da vegetação e a temperatura de superfície. As principais variáveis que influenciam o conteúdo de água no solo são a capacidade de infiltração, as formas de manejo, os tipos de cobertura vegetal e a dinâmica climática (LIER; LIBARDI, 1999; TEIXEIRA, 2010; SOUZA et al., 2017).

Este estudo avaliou o padrão espacial e sazonal da temperatura de superfície, umidade do solo e da umidade da cobertura vegetal da bacia hidrográfica do rio Una, no município de Ibiúna, estado de São Paulo, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto orbital.

2. Materiais e Métodos

2.1 Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi aplicado na bacia hidrográfica do Rio Una, localizada no município de Ibiúna, Estado de São Paulo, entre as coordenadas UTM (Universal Transversa de Mercator) 263807/274706mE, 7365029/7384261mN (zona 23 S). Características locais indicam uma área territorial de 96,4 km², curso d'água com 25,5 km de extensão, alta fragmentação vegetal em decorrência da vocação agrícola da região e predominância de ocupação urbana a norte da bacia. Esta área possui relevante contribuição para o abastecimento de água da região, auxiliando no volume de água que forma o Reservatório de Itupararanga (**Figura 1**).

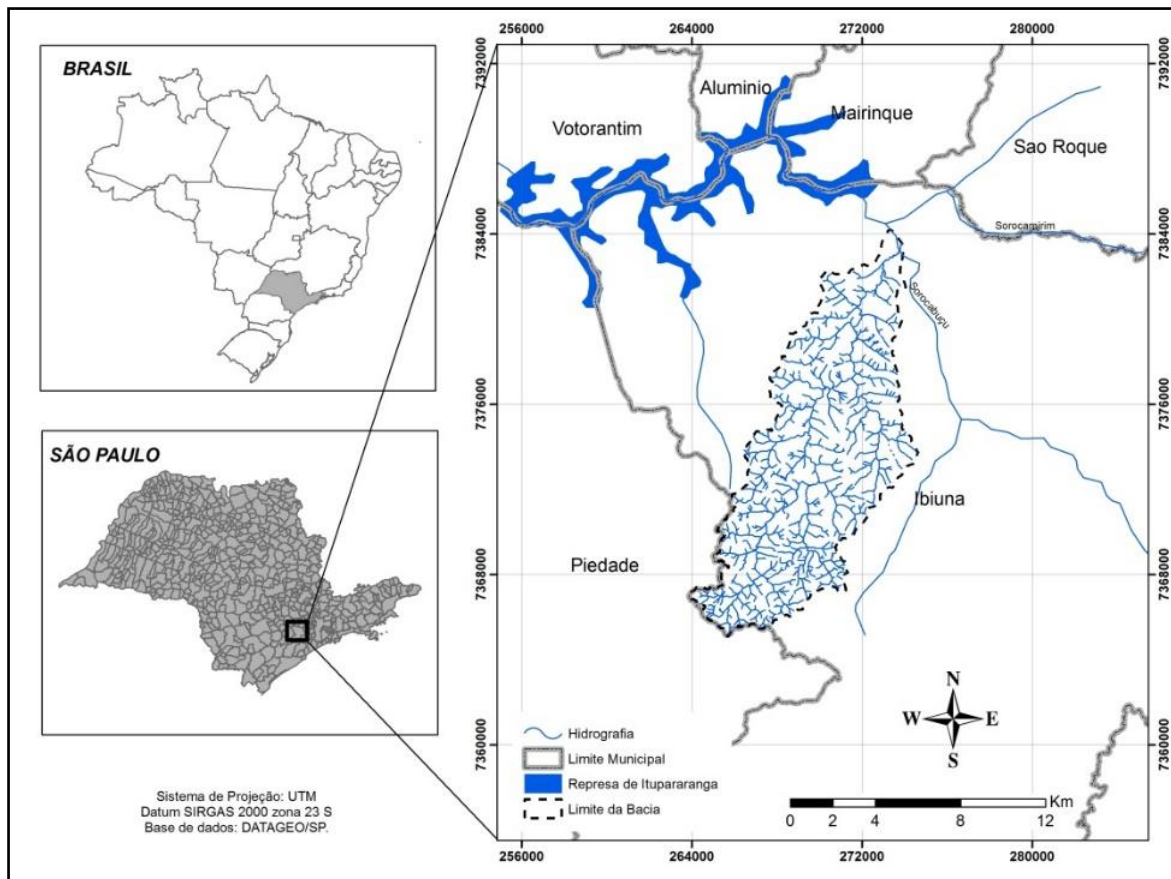


Figura 1: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Una, Ibiúna, São Paulo, Brasil.

2.2 Definição do Período de Análise e Escolha das Cenas

As imagens índice e de Temperatura de superfície (Ts) foram geradas a partir de imagens do sensor OLI acoplado ao Landsat-8. Foram estudados os meses de janeiro e agosto por serem os meses que apresentaram, respectivamente, os maiores e menores totais pluviométricos, no período de 1940 a 2015, de acordo com as séries históricas de precipitação do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas do Estado de São Paulo (CIIAGRO, 2016).

Procedeu-se a seleção das imagens com baixo percentual de nuvens, datadas de 10 de janeiro de 2015 e 22 de agosto de 2015, com órbita/ponto 219/76. As bandas espectrais utilizadas foram OLI4 (vermelho), OLI5 (Infravermelho próximo) e a TIRS10 (Infravermelho termal).

2.3 Estimativa de Temperatura de Superfície

Os números digitais (ND) de cada pixel nas bandas espectrais foram convertidos em unidades de radiância, através da seguinte equação:

$$L\lambda = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

$L\lambda$ = Radiância no topo da atmosfera ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$);

M_L = Fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 = 3.3420E-04;

Q_{cal} = Valor quantizado calibrado pelo pixel em níveis de cinza;

A_L = Fator de redimensionamento aditivo específico para a banda 10.

Os valores de radiância foram transformados em valores de temperatura estimada na unidade de Kelvin, através da seguinte equação:

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L\lambda) + 1 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

T = Temperatura Kelvin;

K_2 = Constante de calibração 2 = 1.321.08 (K);

K_1 = Constante de calibração 1 = 774.89 (K);

$L\lambda$ = Radiância espectral do sensor de abertura ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$);

Para conversão da temperatura para Célsius ($^{\circ}C$) aplicou-se a cada banda espectral trabalhada a equação:

$$^{\circ}C = K - 273,15 \quad \text{Eq. 3}$$

2.4 Cálculo do NDVI

O NDVI foi calculado a partir dos valores de refletância das bandas espectrais na região do vermelho e infravermelho próximo, por meio da razão simples de combinação das respectivas bandas. Sendo:

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

NIR = Infravermelho próximo

R = Vermelho

2.5 Cálculo do TVDI

O TVDI foi calculado conforme a equação abaixo, por meio dos valores de NDVI e T_s de cada pixel. Sendo:

$$TVDI = (T_s - T_{smin}) / (a + b \cdot NDVI - T_{smin}) \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

T_s = temperatura radiativa da superfície do pixel em Kelvin;

T_{smin} = mínima temperatura de superfície;

a e b = parâmetros da relação NDVI e T_s .

2.6 Amostragem, Análise e Interpolação dos Dados de Umidade do Solo

O levantamento dos dados de umidade do solo foi realizado nos meses de janeiro e agosto de 2015, contemplando o período úmido e seco, com o uso do Medidor de pH e Umidade de Solo Portátil – modelo PH 2500.

Os valores de umidade foram coletados em trinta e cinco pontos, contemplando uma malha amostral em toda a área de estudo que garantiu uma base vetorial em pontos para interpolação dos resultados e geração de mapas temáticos. A grade de pontos foi gerada espacialmente com distância aproximada entre os pontos de 1600 metros (**Figura 2**). Alguns pontos foram reajustados no sentido de contemplar diferentes tipos de cobertura vegetal.

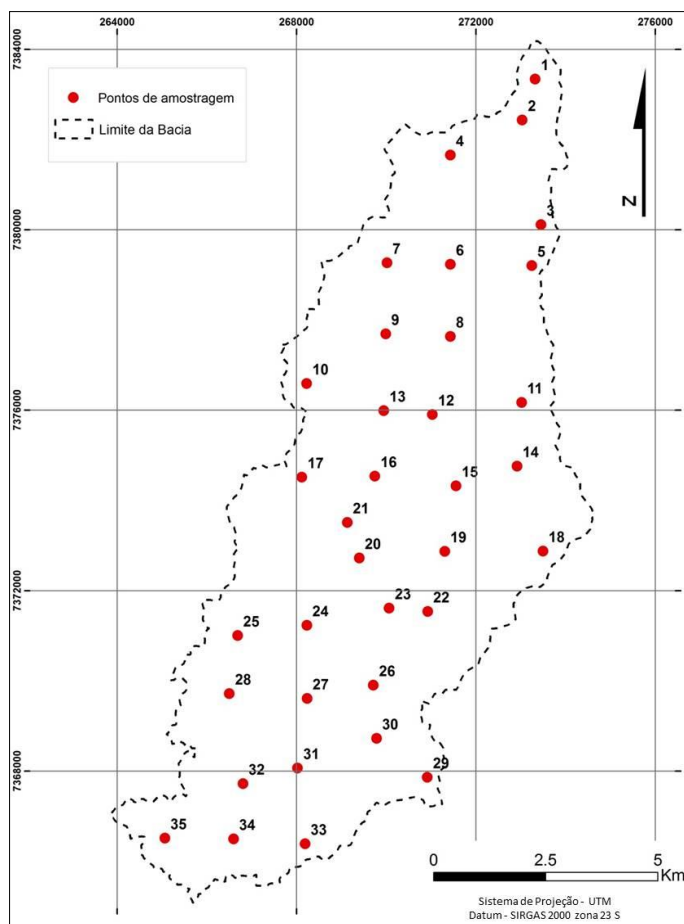


Figura 2: Grade de pontos de amostragem.

A interpolação dos valores de umidade do solo foi realizada utilizando o Inverso do Quadrado da Distância (IQD). O IQD é dado pela seguinte equação:

$$\hat{Z} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^p} Z_i \right)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}} \tag{Eq. 6}$$

Onde:

\hat{Z} = valor interpolado;

Z = valor medido no ponto i;

d = distância ao ponto i;

p = expoente de ponderação;

n = número de pontos utilizados no cálculo.

2.7 Espacialização dos Dados e Análise Estatística

O cálculo dos índices e o processo de interpolação foram realizados no *software* de geoprocessamento ArcGis versão 10.3 e o levantamento dos dados da estatística descritiva foram feitos no *Microsoft Office Excel*.

3. Resultados e Discussão

3.1 Temperaturas do Ar e de Superfície

A bacia hidrográfica do rio Una está em uma região de clima Subtropical de inverno seco e verão quente e chuvoso, caracterizado por Köeppen (1948) como do tipo Cwa. A temperatura do ar apresenta uma variação típica de clima subtropical, registrando médias máximas e mínimas reduzidas nos meses de junho, julho e agosto (**Figura 3**), marcando bem a relação direta entre altas temperaturas e o aumento dos totais de chuva (CIIAGRO, 2016).

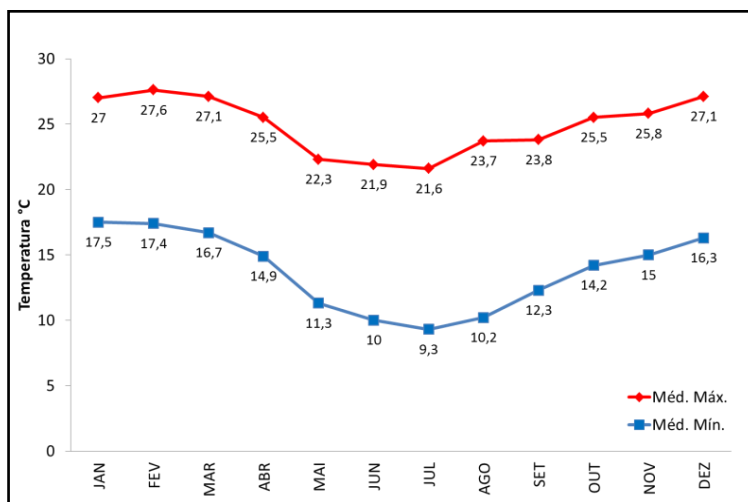


Figura 3: Média das temperaturas máxima e mínima do ar - Ibiúna (1996-2011).

Fonte: www.ciiagro.sp.gov.br

A temperatura de superfície (Ts) compreende uma estimativa da temperatura superficial do solo, da cobertura vegetal ou de áreas construídas. Na **Figura 4(A)-(B)** é possível verificar a espacialização da Ts em graus Célsius (°C) para a bacia nos diferentes períodos.

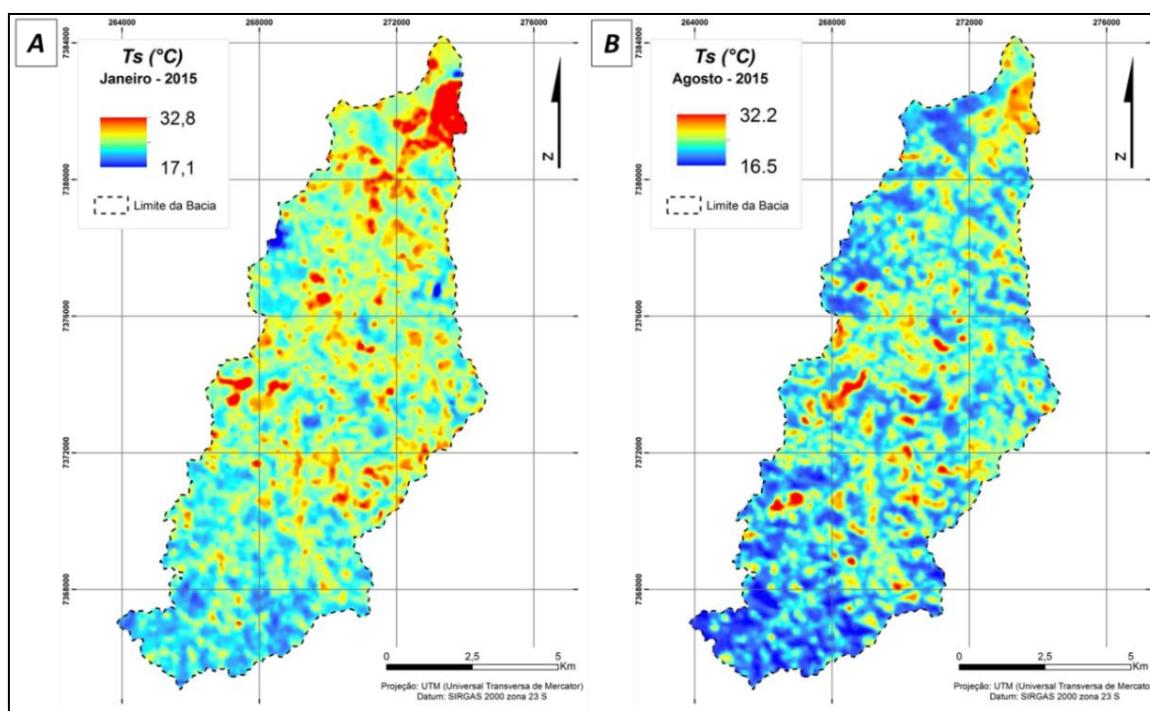


Figura 4: Imagens índice de Ts dos meses de Janeiro (A) e Agosto (B) da bacia do Rio Uma, Ibiúna, São Paulo.

Para o mês de janeiro, a temperatura da superfície ficou entre 17,1°C e 32,8°C, enquanto que em agosto ficou entre 16,5 °C e 32,2°C. Em relação aos escores de Ts não foi observada uma diferença significativa, mas espacialmente é possível identificar a ocorrência de temperaturas mais elevadas no mês de janeiro,

período de verão para o hemisfério sul. As altas temperaturas em janeiro predominam nos baixo e médio cursos da bacia, áreas com altitudes que variam de 850m a 950m e onde ocorrem as maiores taxas de ocupação antrópica.

A **Tabela 1** apresenta os intervalos de Ts dos usos e cobertura do solo que ocupam percentualmente as maiores áreas na bacia.

Tabela 1: Intervalos de Ts para os usos e cobertura do solo das imagens de janeiro e agosto.

Uso e cobertura do solo	Área em (%)	T s – Janeiro (°C)	TS – Agosto (°C)
Culturas temporárias	35,93	24 – 28	20 – 23
Matas	37,05	17 – 24	16 – 20
Edificações urbanas	14,69	28 – 32,8	23 – 32
Pastagens e campos	6,77	23 – 25	18 – 21

Em ambos os períodos, os intervalos com temperaturas mais elevadas ocorreram em áreas de edificações urbanas, podendo atingir Ts de 20°C a 28°C ao longo do ano. Em relação às diferentes coberturas vegetais, as matas registraram as menores temperaturas com Ts que não ultrapassa 24°C enquanto as culturas temporárias, as pastagens e campos, apresentaram temperaturas Ts intermediários em relação aos demais usos e cobertura do solo. Certamente as culturas temporárias apresentaram valores mais elevados de Ts por apresentar processos temporais de preparação do solo e crescimento variado da cobertura vegetal agrícola, o que estimula uma maior incidência de radiação solar direta ao solo e, conseqüentemente, maior temperatura nestas áreas.

Os histogramas das imagens de Ts (**Figura 5(A)-(B)**) apresentaram distribuição assimétrica à direita, com pico em janeiro em torno de 24°C e, em agosto, em torno de 20°C. O pico de frequência do mês de janeiro é mais proeminente do que o de agosto, confirmando o predomínio de Ts mais elevadas no período. Com base nestas observações é possível inferir uma influência da sazonalidade na frequência e nos valores da Ts da cobertura vegetal na superfície terrestre.

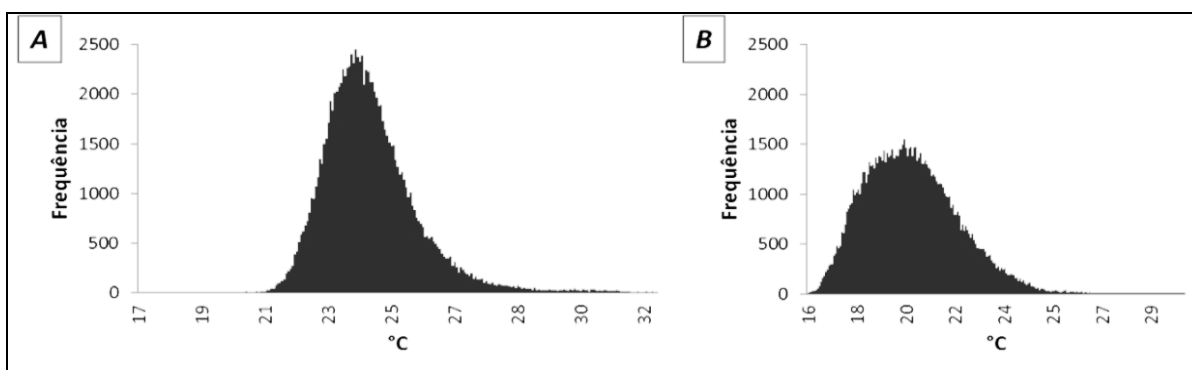


Figura 5: Histogramas de Ts para o mês de janeiro (A) e agosto (B) de 2015.

A estatística dos valores de Ts é apresentada na **Tabela 2**, indicando média de Ts mais elevada para o janeiro (24,5 °C) com menor variação e dispersão em torno da média, em relação a agosto, indicadas pelos valores de desvio padrão e coeficiente de variação. Em agosto a média de Ts reduz aproximadamente 4°C, uma variação importante se considerarmos a influência da taxa de temperatura nos processos ecossistêmicos, regulação climática e hidrológica em áreas de bacias hidrográficas.

Tabela 2: Estatística dos valores de Ts.

Período	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Janeiro	24,5°C	1,43	5,84
Agosto	20,4°C	1,77	8,68

3.2 Avaliação Sazonal e Espacial da Umidade do Solo

A umidade do solo, compreende o teor de água presente nos espaços vazios ou poros. No caso da bacia, observou-se que a umidade dos solos apresentou redução do período úmido para o seco. Estas condições estão diretamente relacionadas ao regime de chuvas, que reduz significativamente de fevereiro para julho. A espacialização da umidade do solo é apresentada na **Figura 6(A)-(B)**.

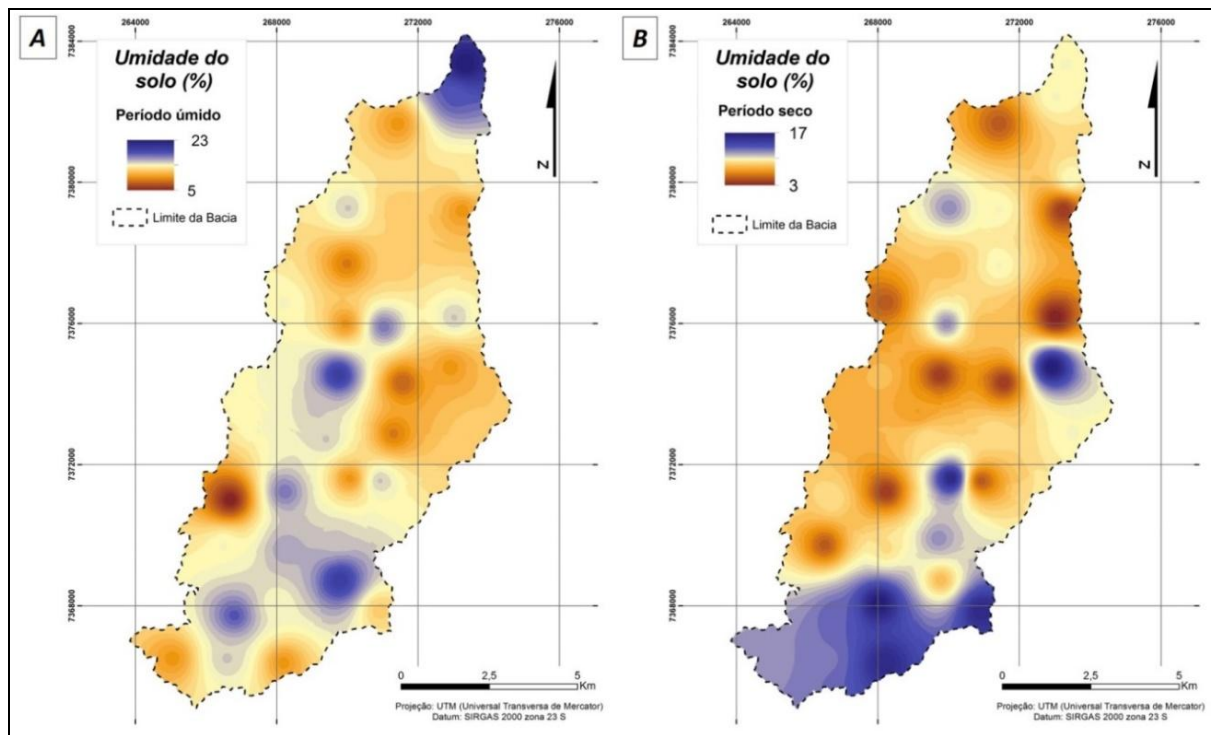


Figura 6: Mapas de umidade do solo interpolados para o período úmido (A) e seco (B) da bacia do rio Una, Ibiúna, São Paulo.

A umidade do solo no período úmido apresentou percentuais entre 5% e 23%, sendo as taxas mais elevadas relacionadas às áreas com cobertura vegetal campestre, proveniente de comunidade aluvial como campos alagados e solos hidromórficos. No período seco, a umidade variou entre 3% e 17%, tendo as melhores condições em áreas florestadas.

A temperatura do ar exerce importante influência sobre a vegetação, incluindo a dispersão, heterogeneidade de espécie e fitoformações (BLUM; RODERJAM; GALVÃO, 2011). Além disso, as florestas tropicais também afetam as condições de clima local por influir na precipitação e moderar a temperatura local, logo, a bacia tende a possuir locais com Ts mais amenas em áreas próximas ou ocupadas por matas nativas.

Em ambos os períodos, as áreas de cultivo temporário e pastagem registraram os menores teores de umidade. Esses valores possuem respaldo por conceber que áreas com maiores exposições a radiação solar e menor incidência de vegetação, com capacidade para interceptar a água e auxiliar na infiltração do solo, contribuem para menores taxas de umidade nestes ambientes.

Na **Figura 7** os valores de umidade do solo reforçam que os pontos 6, 14, 31, 33 e 35 apresentaram valores elevados de umidade no período seco, reflexo de áreas de irrigação por aspersão em culturas temporárias.

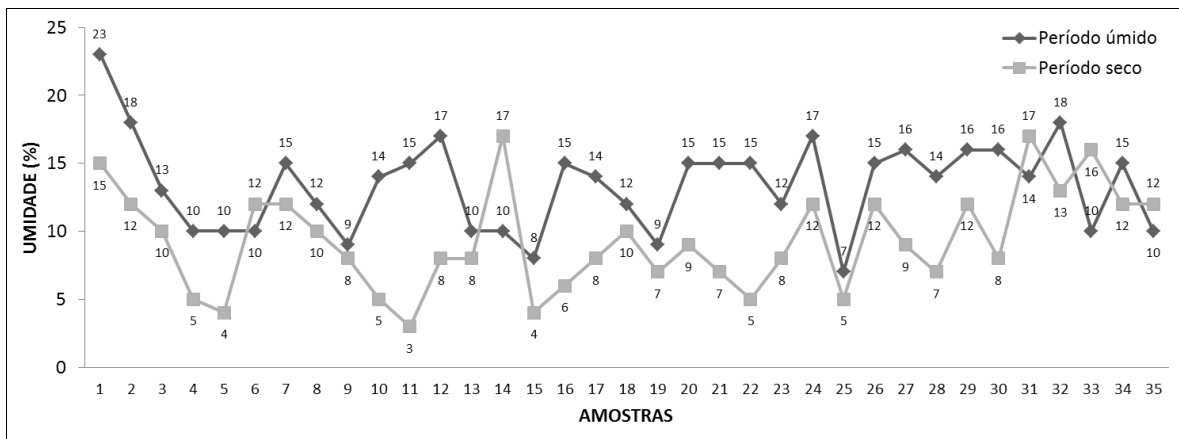


Figura 7: Teores de umidade em (%) dos pontos amostrais dos períodos úmido e seco.

Os resultados não indicaram um padrão de perdas de umidade do solo em relação às classes de uso e cobertura do solo. Considerando-se as médias, todas as classes de uso e cobertura do solo apresentaram redução de umidade do período úmido para o seco (Figura 8).

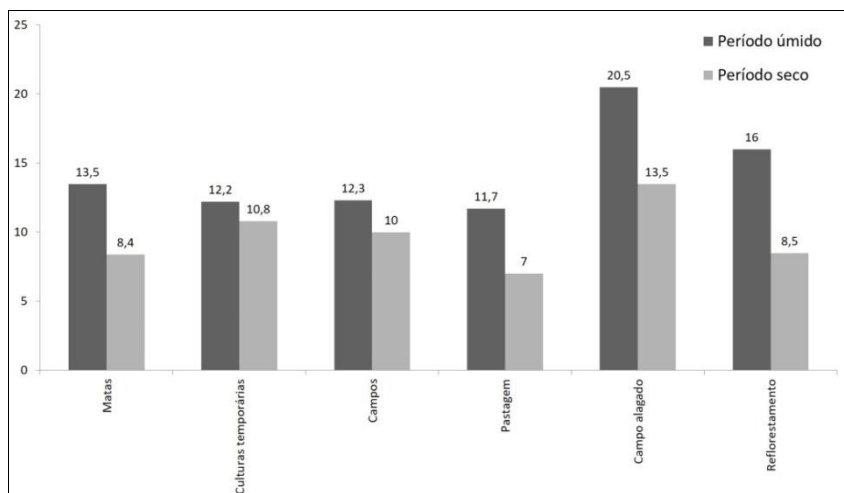


Figura 8: Médias de umidade em (%) por classe de uso e cobertura do solo.

Os campos alagados, em função das características hidromórficas dos solos, apresentaram as maiores médias percentuais de umidade, nos dois períodos, registrando 20,5% e 13,5% nos períodos úmido e seco, respectivamente. As culturas temporárias e os campos foram as classes que apresentaram a menor variação média entre os períodos, com redução média variando de 1,4% e 2,3%, respectivamente, enquanto os campos alagados e as áreas de reflorestamento registraram as maiores reduções médias de 7% e 7,5%, respectivamente.

3.3 Avaliação Sazonal e Espacial do TVDI

Os valores de TVDI variam de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, menor será a umidade da superfície, maior o nível de seca e, conseqüentemente, maior o estresse hídrico. Os valores próximos de 0 indicam que há evaporação máxima a partir do solo e o fornecimento de umidade é ilimitado, sendo assim as condições de umidade da vegetação são favoráveis, não havendo estresse (MARTÍNEZ; BART, 2013; BAI; YU; DI, 2016).

A Figura 9(A)-(B) apresenta o gráfico de dispersão e os valores dos coeficientes angular e linear utilizados no cálculo, como também as bordas úmidas e secas que indicam as melhores condições de umidade (linha azul) e as condições de estresse hídrico (linha vermelha).

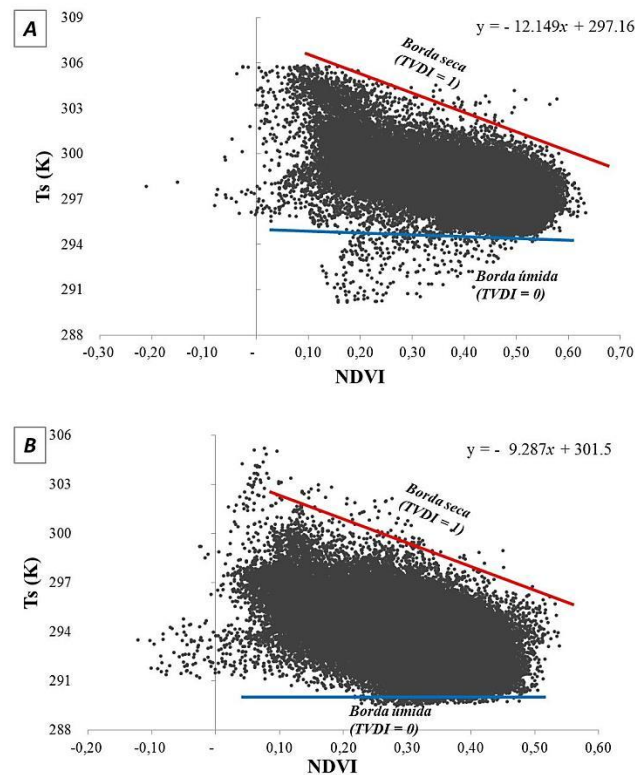


Figura 9: Dispersão entre Ts e NDVI para os meses de Janeiro (A) e Agosto (B) e delimitação das bordas secas e úmidas.

No período úmido, o NDVI apresentou valores entre -0,21 e 0,63 e, no seco, o índice variou de -0,12 a 0,54. A redução nos valores de NDVI no mês de agosto evidencia a influência direta entre a dinâmica sazonal do clima com a resposta espectral da vegetação. A redução no vigor e densidade da vegetação no período seco indicam processo de senescência progressiva, ocorrendo perda de nutrientes, mudança de cor e perda de folhas. Este comportamento da vegetação frente à sazonalidade climática interfere também no comportamento espectral da vegetação, sendo possível a detecção dessas mudanças a partir de imagens de satélite (MARQUES; OLIVEIRA, 2004; LIU, 2006).

A dispersão entre as variáveis analisadas (Figura 9) sinalizam uma tendência de quanto maior a densidade da vegetação, menores são os registros de Ts. O estresse hídrico é resultado da inter-relação direta entre a Ts, a quantidade de biomassa e a disponibilidade de água no sistema superfície- atmosfera (SCHIRMBECK, 2016).

Os valores de TVDI apresentaram variação espacial significativa do período úmido para o seco, conforme apresentado na Figura 10(A)-(B).

Evidencia-se que as condições de umidade da superfície se apresentam melhores no mês de janeiro, período em que ocorrem os maiores totais de chuva na região da área de estudo (188,1 mm de chuva) (CIIAGRO, 2016).

Em estudos desenvolvidos no Iran por Rahimzadeh-bajgiran, Omasa e Shimizu (2012), também identificaram relação entre baixos totais de chuva e altos valores de TVDI, mostrando uma forte dependência do índice com o regime de chuvas. Já Bai, Yu e Di (2016) associaram valores baixos de TVDI, na região central da China, às condições ambientais favoráveis, como recursos hídricos suficientes, condições boas de umidade no decorrer do ano, baixas temperaturas, alta precipitação, alta cobertura vegetal, baixo volume de evapotranspiração e conservação da vegetação.

De forma similar, Sandholt, Rasmussen e Andersen (2002) ao estimar o TVDI em Senegal, na África, evidenciaram a influência do regime de chuvas na variação do índice e concluíram que este índice é, em geral, sensível à precipitação e o índice diminui após ocorrências de chuva.

Na imagem índice de janeiro percebe-se um predomínio dos valores de TVDI entre 0,2 e 0,4, esses valores indicam umidade normal a estresse leve segundo García et al., (2007) e Seixas (2013). No mês de agosto, predominaram valores entre 0,4 e 0,6 indicando condições de ligeiramente seco a estresse moderado (GARCÍA et al., 2007; SEIXAS, 2013).

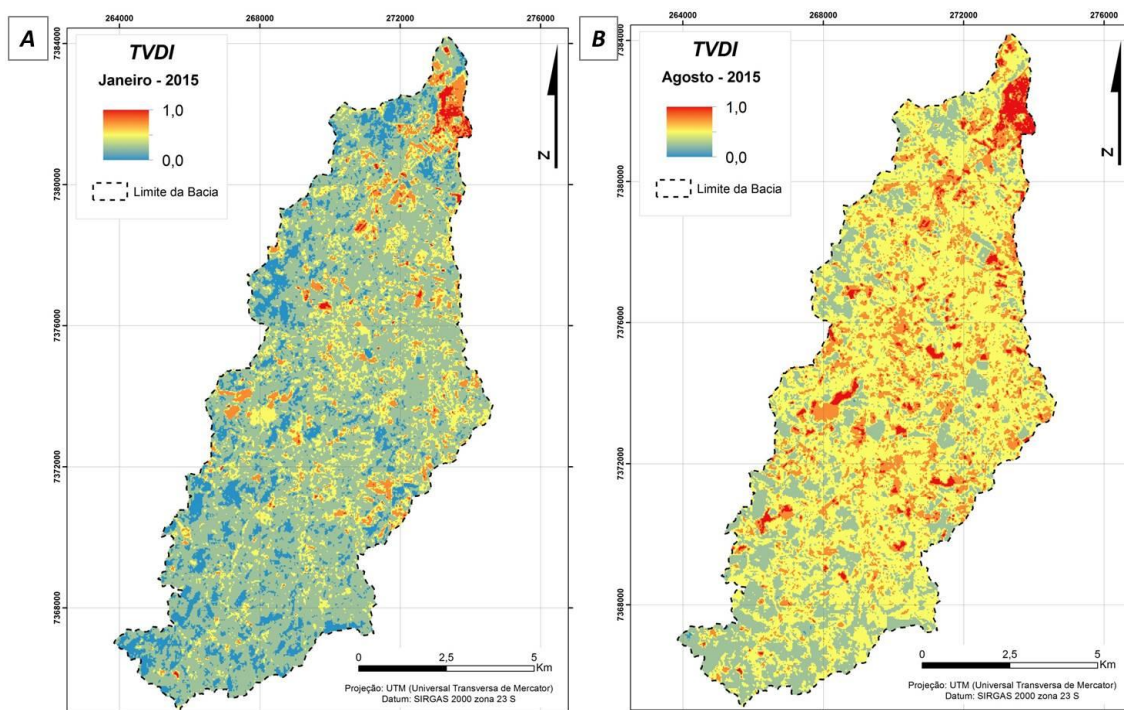


Figura 10: Imagens índice de TVDI dos meses de Janeiro (A) e Agosto (B) da bacia do rio Una, Ibiúna, São Paulo.

Os histogramas de frequência do TVDI (Figura 11 (A)-(B)) mostram que em janeiro, o pico de frequência é mais elevado, apresentado valores em torno de 0,2. Em agosto percebe-se uma elevação nestes valores, com frequência entre 0,5 e 0,6. Os histogramas corroboram com os resultados de TVDI apresentados espacialmente, indicando melhores condições de umidade para o mês de janeiro e, conseqüentemente, acentuada elevação do estresse hídrico da vegetação e seca do solo no mês de agosto.

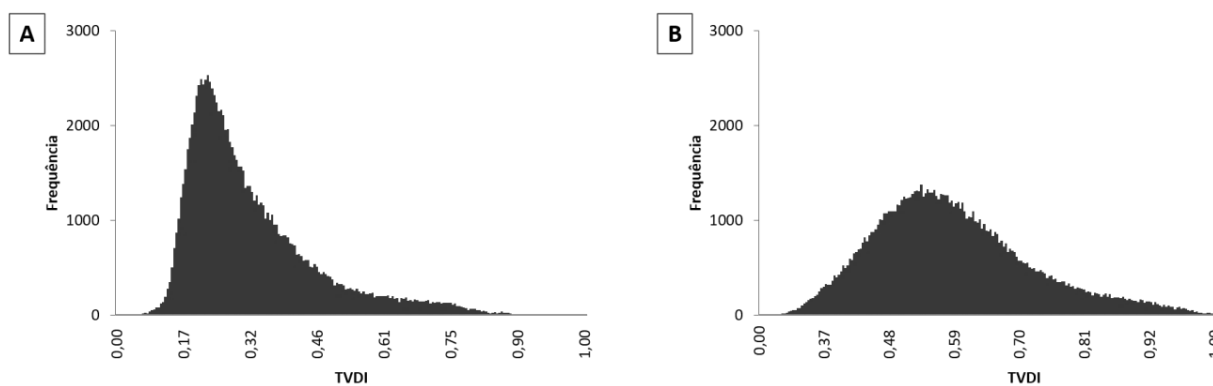


Figura 11: Histogramas do TVDI para o mês de janeiro (A) e agosto (B) de 2015.

A estatística dos valores de TVDI, apresentada na Tabela 3, indica um aumento pronunciado da média de janeiro para agosto, reforçando que as condições de estresse hídrico são mais acentuadas no período de estiagem. O coeficiente de variação do mês de janeiro apresenta maior dispersão dos dados em relação à média, se comparado aos resultados da imagem índice de agosto e, o desvio padrão nos dois períodos, o conjunto de dados se mostraram heterogêneos.

Tabela 3: Estatística dos valores de TVDI

Período	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Janeiro	0,33	0,14	42,42
Agosto	0,60	0,13	21,66

Na **Figura 12** é possível comparar a distribuição espacial das classes de TVDI para os dois períodos. Para janeiro 63,76% da bacia possuem condições normais de umidade, com valores até 0,4, enquanto que em agosto, somente 13,44% da área possuem essa condição e 8,61% da bacia registram condições severas de seca, com valores acima de 0,8.

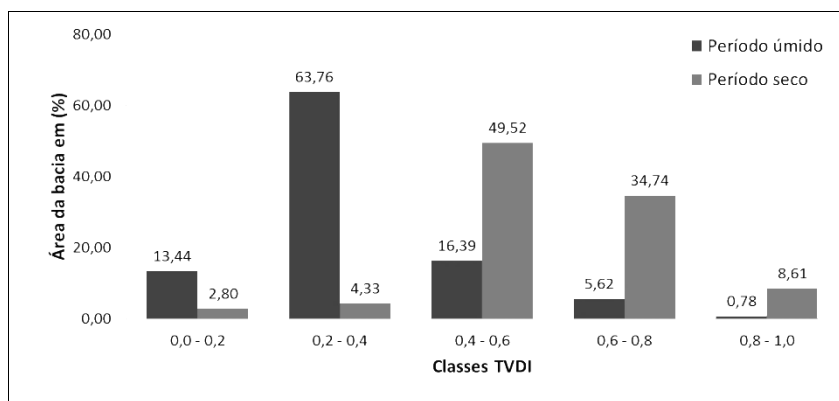


Figura 12: Distribuição percentual das classes de TVDI para os períodos úmido e seco

A **Tabela 5** apresenta os valores médios de TVDI das classes de uso e cobertura do solo. Excetuando as edificações urbanas, todas as classes de cobertura vegetal apresentaram aumento nos valores médios de TVDI em agosto, indicando redução da umidade de superfície e ocorrência de estresse hídrico em função da queda nos índices de chuva.

Tabela 5: Valores médios do TVDI para os usos e cobertura do solo em janeiro e agosto

Uso e cobertura do solo	TVDI (Janeiro)	TVDI (Agosto)
Culturas temporárias	0,40	0,75
Matas	0,10	0,35
Reflorestamento	0,20	0,35
Campos sujos	0,15	0,45
Pastagens	0,35	0,55
Edificações urbanas	0,85	0,85

Em relação às áreas com cobertura vegetal, as culturas temporárias foi a classe que apresentou a maior variação em relação à média, entre os períodos, indo de 0,40 no período úmido para 0,75 no período seco e, as áreas de reflorestamento registraram a menor variação, com média em janeiro de 0,20 e em agosto 0,35.

As matas e as culturas temporárias são as coberturas do solo que ocupam as maiores áreas da bacia, 37% e 36% respectivamente. As matas apresentaram as melhores condições de umidade nos dois períodos, em janeiro os valores variaram entre 0,0 e 0,2, mostrando condições satisfatórias de umidade, sem ocorrência de estresse hídrico. A partir destes achados, pode-se concordar na ocorrência de uma maior evapotranspiração e, conseqüentemente, redução da temperatura no sistema solo-planta.

Em agosto o TVDI das matas registrou valores entre 0,2 a 0,5, apresentado condições que variaram entre umidade boa e seca moderada. Para Martínez e Bart (2013), mesmo que ocorra influência da variação sazonal da umidade, as matas tendem a apresentar melhor condição de umidade em relação às outras coberturas do solo. Essa condição pode ainda ser reflexo de características fisiológicas das espécies florestais que promovem uma regulação estomática e de fotoproteção para reduzir o fluxo de calor latente e aumentar o fluxo de calor sensível, resultando no aumento da temperatura da vegetação em relação ao ar (WAN; WANG; LI, 2004; GARCÍA et al., 2007).

As áreas de culturas temporárias apresentaram valores entre 0,1 e 0,2 no período úmido, registrando boa umidade e ausência de estresse e, no período seco, o TVDI variou entre 0,0 a 0,8, oscilando entre condições de boa umidade a estresse severo. Reforça-se que as culturas temporárias possuem uma dinâmica diferenciada, por apresentar mais de um ciclo de cultivo por ano, onde as superfícies neste tipo de uso apresentam solo exposto (período de preparo da terra para cultivo), cobertura de vegetação verde e cobertura de vegetação seca, em um período de até cinco meses (IBGE, 2013). Esses fatores corroboram para que as variações nesta cobertura vegetal sejam explicadas.

4. Conclusões

O padrão espacial da Ts, da umidade do solo e do TVDI apresentou uma relação direta com a sazonalidade climática, com ênfase no regime de chuvas. A Ts apresentou variação influenciada pelo tipo de uso e cobertura do solo, registrando menores temperaturas, nos períodos úmido e seco, nas áreas florestadas. Os valores de umidade do solo, de forma geral, foram maiores no período úmido em função dos totais de chuva e, no período seco, os maiores percentuais ocorreram nas áreas irrigadas. Os campos alagados e as áreas de reflorestamento registraram as maiores perdas em umidade do período úmido para o seco.

O TVDI se mostrou apropriado para avaliar o déficit hídrico em diferentes coberturas do solo, com potencial para monitorar as perdas de umidade e secas severas do solo e da vegetação, sob influência da sazonalidade climática ou de ações antrópicas sob a superfície. Este índice pode ser utilizado como instrumento de gerenciamento e manejo em bacias hidrográficas, tendo em vista o seu potencial em indicar irregulares em relação à disponibilidade de água no sistema superfície-atmosfera, especialmente em áreas de matas e culturas temporárias.

Ressalta-se que, as áreas de culturas temporárias apresentaram variabilidade distinta das demais coberturas vegetais, em relação TVDI e umidade do solo. Os ciclos dinâmicos do cultivo, que perpassam pelo preparo da terra, o plantio, o desenvolvimento da cultura e a colheita, além do processo de irrigação, influenciam nos resultados das variáveis analisadas, independente das condições climáticas. Isto justifica as ocorrências pontuais de condições de umidade do solo, umidade e vigor vegetativo, em estado satisfatório, no período seco.

As imagens do satélite Landsat 8 são satisfatórias para estimar os parâmetros biofísicos e o estado fitossanitário da vegetação, com resolução espacial e temporal adequadas para estudos aplicados às bacias hidrográficas e análises das alterações sazonais da superfície, constituindo-se de um produto gratuito que deve ser considerado em estudos similares.

Referências

- BAI, J.; YU, Y; DI, L. Comparison between TVDI and CWSI for drought monitoring in the Guanzhong Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, 15(0): 60345-7, 2016.
- BOLFE, E. L. **Desenvolvimento de uma metodologia para a estimativa de biomassa e de carbono em sistemas agroflorestais por meio de imagens orbitais**. 2010. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- BLUM, C. T.; RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F. O clima e sua influência na distribuição da Floresta Ombrófila Densa na Serra da Prata, Morretes, Paraná. **FLORESTA**, v. 41, n. 3, p. 589-598, 2011.
- CASTANHEIRA, L. B.; LANDIM, P. M. B.; LOURENÇO, R. W. Variabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em áreas de reflorestamento: Floresta Estadual 'Edmundo Navarro de Andrade' (FEENA)/Rio Claro (SP). São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 33, n. 3, p.449-456, 2014.
- CIAGRO. Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas. *Balanço Hídrico: Resenha Agrometeorológica*. 2015. Disponível em: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QChuvaPeriodo.asp>>. Acesso em: 10 nov. 2016).
- CURI, N.; KAMPF, N. Caracterização do solo. In: KER, J. C. et al. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: SBCS, 2012. 342 p.
- GAO, B. C. NDWI: A Normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p.257- 266, 1996.

- GARCÍA, S. et al. Desarrollo y aplicación de indicadores de alerta temprana frente a sequías a escala regional desde MODIS. In: RIVAS, R.; GRISOTTO, A. y SACIDO, M. (editores). **Teledetección - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional**. Buenos Aires: Ed. Martin, 2007, p. 223-229.
- HUANG et al. Analysis of Spatial-Temporal Variation of Agricultural Drought and Its Response to ENSO over the Past 30 Years in the Huang-Huai-Hai Region, China. **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, v. 24, n. 4, Part II, p. 745-759, 2013.
- IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra**. Série Manuais Técnicos em Geociências n. 07. 3. ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2013.
- ISHIMURA, A. et al. Remote sensing of Japanese beech forest decline using an improved Temperature Vegetation Dryness Index (iTVDI). **Iforest - Biogeosciences And Forestry**, [s.l.], v. 4, n. 5, p.195-199, 3 nov. 2011.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução da 2ª ed. por (pesquisadores do INPE): José Carlos N. Epiphanyo (coord) [et al.]; São José dos Campos: Parêntese. 2009. 672 p.
- KÖEPPEN, W. **Climatología**. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.
- LOURENÇO, R. W.; LANDIM, P. M. B. Estudo da variabilidade do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI utilizando Krigagem Indicativa. **HOLOS Environment**, v.4, n. 1, p. 38-55, 2004.
- LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: UNIDERP, 2006. 908p.
- LIER, Q. J.; LIBARDI, P. L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **R. Bras. Ci. Solo**, 23:1005-1014, 1999.
- MARQUES, M. C. M.; OLIVEIRA, P. A. M. Fenologia de espécies do dossel e do sub-bosque de duas Florestas de Restinga na Ilha do Mel, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v.27, n.4, p.713-723, out.-dez. 2004.
- MARTÍNEZ, M. S.; BART, L. C. Aproximación a la determinación del déficit hídrico en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, a partir de imágenes MODIS y datos meteorológicos. **Revista de Geografía Norte Grande**, 55: 109-124, 2013.
- MAKI, M; ISHIAHRA, M; TAMURA, M. Estimation of leaf water status to monitor the risk of forest fires by using remotely sensed data. **Remote Sensing Of Environment**, [s.l.], v. 90, n. 4, p.441-450, abr. 2004.
- MENGUE, V. P. et al. Índice TVDI para mapeamento das culturas de arroz irrigado e soja em áreas agrícolas de Pelotas e Camaquã/RS. **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, João Pessoa-PB, 2015.
- PAU, S.; GILLESPIE, T. W.; WOLKOVICH, E. M.. Dissecting NDVI-species richness relationships in Hawaiian dry forests. **Journal Of Biogeography**, [s.l.], v. 39, n. 9, p.1678-1686, 2012.
- PEDRONI, F.; SANCHEZ, M.; SANTOS, F. A. M. Fenologia da copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf. – Leguminosae, Caesalpinioideae) em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, V.25, n.2, p.183-194, jun. 2002.
- PEREIRA, T. S. et al. Fenologia de espécies arbóreas em Floresta Atlântica da Reserva Biológica de Poço das Antas, Rio de Janeiro, Brasil. **IHERINGIA**, Sér. Bot., Porto Alegre, v. 63, n. 2, p. 329-339, jul./dez. 2008.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento Remoto da Vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.
- RAFIQUE, R. et al. Global and Regional Variability and Change in Terrestrial Ecosystems Net Primary Production and NDVI: A Model-Data Comparison. **Remote Sensing**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.177-193, 25 fev. 2016.
- RAHIMZADEH-BAJGIRAN, P; OMASA, K; SHIMIZU, Y. Comparative evaluation of the Vegetation Dryness Index (VDI), the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) and the improved TVDI (iTVDI) for water stress detection in semi-arid regions of Iran. **Isprs Journal of Photogrammetry And Remote Sensing**, [s.l.], v. 68, p.1-12, mar. 2012.

- SANDHOLT, I.; RASMUSSEN, K.; ANDERSEN, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. **Remote Sensing of Environment**, New York, n. 79, p. 213– 224, 2002.
- SCHIRMBECK, L. W. **Padrão espaço temporal do TVDI em área de cultivo de soja**. 2016. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Sensoriamento Remoto, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- SEIXAS, G. B. **Avaliação de vegetação monodominante do Pantanal e vegetação de Cerrado, utilizando parâmetros biofísicos estimados por imagens de satélites**. 2013. 102 f. Tese (Doutorado) - Pós-graduação em Física Ambiental, Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.
- SOUZA, J. C. **Metodologia para avaliação ambiental em bacias hidrográficas, utilizando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto**. 2014. 95 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2017.
- SOUZA, J. C. et al. Avaliação espacial e sazonal da umidade do solo utilizando técnicas de geoprocessamento e sistema de informações geográficas. **IV Simpósio Brasileiro de Geomática – SBG2017. II Jornadas Lusófonas - Ciências e Tecnologias de Informação Geográfica - CTIG2017**. Presidente Prudente - SP, 24-26 de julho de 2017. p. 054-059.
- TEIXEIRA, R. F. B. **Inferência do estado geral da umidade de superfície do solo pelo Índice de Seca Temperatura-vegetação e por imagens do satélite NOAA-17: aplicações no Semiárido do Ceará**. 2010. 120 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.
- TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão dos recursos hídricos. **Revista USP**, n. 70, p. 24-35, p. 25-35, 2006.
- WAN, Z.; WANG, P.; LI, X. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. **International Journal of Remote Sensing**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.61-72, jan. 2004.