

AVALIAÇÃO DE INDICADOR PARA O MONITORAMENTO DOS IMPACTOS DA SECA EM ÁREAS DE PASTAGENS NO SEMIÁRIDO DO BRASIL

*Assessing Indicator for Drought Impacts Monitoring over Pasturelands in the
Brazilian Semiarid Region*

**Ana Paula M. do Amaral Cunha, Sheila Santana de Barros Brito, Luciana
Rossato, Regina Célia dos Santos Alvalá, Magog A Carvalho, Marcelo Zeri,
Christopher Cunningham, Aliana Paula dos Reis Maciel, Eliana Soares
Andrade & Rita Marcia da Silva Pinto Vieira**

**Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN
Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento**

Estrada Doutor Altino Bondesan, 500 - Distrito de Eugênio de Melo, CEP:12.247-016, São José dos Campos/SP, Brasil
luciana.rossato@gmail.com, {ana.cunha, sheila.brito, regina.alvala, magog.araujo, marcelo.zeri, christopher.castro,
aliana.maciell, eliana.andrade, eliana.andrade}@cemaden.gov.br

*Recebido em 16 de Outubro, 2015/ Aceito em 28 de Setembro, 2016
Received on October 16, 2015/ Accepted on September 28, 2016*

RESUMO

A seca é considerada o desastre natural que pode causar as maiores perdas econômicas e sociais, com o maior número de pessoas afetadas diretamente dentre todos os tipos de desastres naturais. Na região semiárida do Brasil, é manifestada por meio da redução da produtividade agrícola ou mesmo pecuária, causando sérios problemas sócio-políticos. Diferentes indicadores de seca são conhecidos e utilizados na comunidade científica. O presente trabalho explora a aplicabilidade de um índice híbrido de seca, calculado a partir de dados de NDVI e temperatura da superfície, denominado VSWI. O índice foi aplicado em áreas de pastagens no semiárido do Brasil para a avaliação dos impactos da seca de 2012-2013 na vegetação. De acordo com os resultados 85% da região foi impactada pela seca entre os anos de 2012-2013. De maneira geral, os resultados obtidos por meio do índice VSWI concordaram com aqueles obtidos por meio de interpolação de dados observacionais de precipitação, armazenamento de água no solo (modelo de balanço hídrico) e dados de produção pecuária. Diante disso, a relação empírica LST-NDVI pode ser eficazmente explorada como um indicador das características espaço-temporais de condições de estresse hídrico na vegetação para a região semiárida do Brasil. Além disso, os resultados também pontuaram para a importância da dinâmica da vegetação nas análises dos impactos da seca, uma vez que anos previamente mais secos ou mais úmidos apresentam impactos nos anos subsequentes (efeitos memória e recuperação vegetal).

Palavras chaves: Semiárido, Impactos da Seca, Monitoramento da Seca, Sensoriamento Remoto, Índice de vegetação.

ABSTRACT

Drought is a complex natural phenomenon that can lead to reduced water supplies and can consequently have substantial effects on agriculture and socioeconomic activities that cause social crises and political problems. Different drought indicators are used for identifying droughts. This study explored the efficiency of a near-real time vegetative drought monitoring methodology, Vegetation Supply Water Index (VSWI), which integrates land surface reflectance

and thermal properties. The results indicate that during a major drought event from 2012 to 2013, approximately 85% of the Brazilian semiarid region was affected. Daily interpolated precipitation, soil water content (water balance model) and livestock production data were used to verify the results. The empirical LST-NDVI relationship can be effectively exploited as an indicator of spatial temporal characteristics of water stress conditions in the Brazilian Semiarid Region. The results also highlight interannual persistence effects in vegetation dynamics, as shown by the complex mechanisms of the recovery and memory effects.

Keywords: Semiarid, Drought Impacts, Drought Monitoring, Remote Sensing, Vegetation Index.

1. INSTRUÇÕES GERAIS

A seca é considerada o desastre natural que pode causar as maiores perdas econômicas e sociais, com o maior número de pessoas afetadas diretamente e indiretamente dentre todos os tipos de desastres naturais (CAROLWICZ, 1996; IPCC, 2007). A seca é considerada um “fenômeno gradual”, sendo difícil determinar seu início e fim. Os efeitos da seca se acumulam lentamente ao longo de um período considerável de tempo e podem perdurar anos após a finalização do evento (BATISTA JÚNIOR, 2012). A definição de seca depende de sua duração e dos impactos causados, geralmente são classificadas em meteorológica, agrícola, hidrológica e socioeconômica. A meteorológica, primeira a ser percebida, é definida por Wilhite (2000) como o resultado de um déficit de precipitação, isto é, quando o valor de chuva acumulado em um período e em uma área se encontra significativamente abaixo do valor climatologicamente esperado. A seca agrícola é decorrente da deficiência hídrica no solo e conseqüente estresse hídrico às plantas, provocando redução na produção de biomassa. A seca hidrológica está relacionada com a redução dos níveis médios de água em reservatórios de superfície e subterrâneos por um determinado período de tempo, podendo ser da escala de dias ou até mesmo anos. Finalmente, a seca socioeconômica está relacionada com o impacto da seca sobre as atividades humanas, incluindo os impactos diretos e indiretos na produção agrícola e outras atividades econômicas (MAIA *et al.*, 2015).

Com base nos dados do “*Center for Research on the Epidemiology of Disaster*” (<http://www.emdat.be/>), nas últimas décadas, as secas têm se apresentado com frequência e intensidades cada vez maiores em grande parte do planeta, o que pode estar relacionado às mudanças climáticas (MARENGO, 2008; ALLEN *et al.*, 2010; DAI, 2013; DIFFENBAUGH *et al.*, 2015). A porcentagem de área afetada pela

seca em todo o globo dobrou nos últimos 50 anos, principalmente na América do Norte, África Central, Norte da China e em algumas áreas na América do Sul (DAI *et al.*, 2004; NAGARAJAN, 2009).

No Brasil, tal fenômeno ocorre principalmente na região semiárida, devido a sua vulnerabilidade hídrica. A falta de acesso a recursos hídricos e recorrentes secas têm afetado durante séculos as atividades agropecuárias no sertão, causando entre outros, má-nutrição, migração e mortes prematuras (OBERMAIER, 2011). A última grande seca de 2012 e 2013 causou impactos em cerca de 1300 municípios, afetando mais de 10 milhões de pessoas. Na economia gerou uma perda de aproximadamente R\$ 3,6 bilhões na agricultura (para os principais tipos de culturas da região), R\$ 3,2 bilhões devido à perda de gado e cerca de R\$ 3,2 bilhões com seguros, totalizando aproximadamente R\$ 10 bilhões (IBGE, 2013; MI, 2014).

As projeções futuras de clima indicam riscos de secas intensas no semiárido, reduções de chuva em até 40% e aumento de dias secos consecutivos. Além disso, mais frequentes e intensos anos de El Niño (ENSO) causados pelas mudanças climáticas podem também aumentar a escassez hídrica e o risco de secas (ALVES & REPELLI, 1992, MARENGO, 2008). Os impactos dessas alterações poderão afetar diretamente cerca de 7 milhões de pessoas que são vinculadas à agricultura familiar no NEB, e que frequentemente se encontram em condições de extrema pobreza (IBGE, 2006; LINDOSO *et al.*, 2011).

Vários métodos e índices têm sido desenvolvidos para a avaliação e quantificação da seca, considerando diferentes variáveis de causa e resposta da seca, tais como precipitação, umidade do solo, evapotranspiração, condição da vegetação, etc. (PALMER, 1965, 1968; GIBBS & MAHER, 1967; SHAFER & DEZMAN, 1982; KOGAN, 1990, 2002; MCKEE *et al.*, 1993;

KEYANTASH & DRACUP, 2004, BHUIYAN *et al.*, 2006, ABBAS *et al.*, 2014).

Os indicadores de seca são particularmente úteis para o monitoramento dos impactos da variabilidade climática, especialmente para a identificação espacial e temporal dos episódios de seca, o que geralmente é bastante complexo. Na literatura é possível encontrar uma variedade de índices de seca, incluindo meteorológicos, hidrológicos, aqueles baseados em dados coletados por sensores a bordo de satélites, saídas de modelos de balanço hídrico (umidade do solo), entre outros (PALMER, 1965, 1968, GIBBS & MAHER, 1967, SHAFER & DEZMAN, 1982, WILHITE & GLANTZ, 1985, KOGAN, 1990, 2002, MCKEE *et al.*, 1993, KEYANTASH & DRACUP, 2004, STEINMANN *et al.*, 2005, WILHITE, 2009, FERNANDES *et al.*, 2009, LEIVAS *et al.*, 2014, SAUSEN & LACRUZ, 2015), utilizados para a quantificação e avaliação dos impactos das secas.

Métodos tradicionais de avaliação e monitoramento da seca dependem de dados observados de precipitação, como por exemplo, o índice de severidade de Palmer (PDSI, PALMER, 1965, 1968), índice de precipitação padronizado (SPI, MCKEE *et al.*, 1993), dados de percentis da precipitação, etc. Entretanto, em áreas extensas onde a densidade de estações meteorológicas, ou mesmo a escala temporal dos dados é insuficiente, a tarefa de monitorar a intensidade da seca, nessas regiões torna-se uma tarefa desafiadora. Embora a interpolação espacial dos dados de precipitação ou de índices de seca forneça informações importantes sobre as condições atualizadas da seca, é necessário considerar as incertezas associadas ao processo de interpolação (RHEE *et al.*, 2010).

Em contrapartida, dados baseados em sensoriamento remoto são consistentemente disponibilizados e podem ser utilizados para a detecção do início e final da seca, a duração e magnitude em grande escala (THIRUVENGADACHARI & GOPALKRISHNA, 1993; HAN *et al.*, 2010).

O sensoriamento remoto tem o potencial reconhecido para a avaliação dos aspectos espaciais e temporais das condições de seca em todo o globo (JOHNSON *et al.*, 1993; PETERS *et al.*, 2002). A utilização dos dados coletados pelo *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) desempenha

um papel cada vez mais importante no monitoramento e avaliação da seca (WAN *et al.*, 2004) em função de sua rica informação espectral, alto ciclo de repetição temporal e meios convenientes de acesso a dados.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI, sigla em inglês) que fornece uma medida geral do estado de saúde da vegetação, foi um dos primeiros indicadores baseados em sensoriamento remoto que foi utilizado para a detecção e monitoramento da seca (HENRICKSEN & DURKIN, 1986; KARNIELI *et al.*, 2010). Muitos estudos têm registrado alta correlação entre índices de vegetação, precipitação e umidade do solo (DAVENPORT & NICHOLSON, 1993, HERRMANN *et al.*, 2005, LIU *et al.*, 2013, IBRAHIM *et al.*, 2015). Esse é o motivo pelo qual o NDVI é amplamente utilizado para o monitoramento da seca agrícola (HENRICKSEN & DURKIN, 1986, TUCKER & CHOUDHURY, 1987, TUCKER, 1989, GUTMAN 1990).

Por outro lado, a condição da cobertura vegetal, dada pelos índices de vegetação, apresenta uma resposta relativamente lenta ao stress hídrico, ou seja, o índice apresenta condição de seca, quando esta já ocorreu.

Em contraste, a temperatura da superfície ou radiométrica (LST) derivada por meio de sensores nas bandas de infravermelho termal, é considerada uma variável de resposta rápida (GOETZ *et al.*, 1997; HAN *et al.*, 2010). O TS é um bom indicador do balanço de energia na superfície continental devido esse ser um dos parâmetros chave nos processos físicos que ocorrem na superfície em escala regional ou global. A resposta da TS ao déficit hídrico pode ocorrer mesmo quando as plantas estão verdes, isso porque os estômatos fecham para minimizar a perda de água pela transpiração (BERLINER *et al.*, 1984, CARSON *et al.*, 1994, YANG & MERCHNAT, 1997).

Vários estudos têm mostrado que a combinação da condição da saúde da vegetação (vigor vegetativo) e condições de temperatura seja uma maneira de inferir sobre o conteúdo de umidade no solo (KOGAN 1990, 1997; CARLSON *et al.*, 1990; CARLSON *et al.*, 1994; BHUIYAN *et al.*, 2006; KARNIELI *et al.*, 2010; HAN *et al.*, 2010; YAGCI *et al.*, 2011; ZHOU *et al.*, 2012; SON *et al.*, 2012; DU *et al.*, 2013; MU *et al.*, 2013; YANG *et al.*, 2013; ABBAS *et al.*, 2014; NICHOL *et al.*, 2015).

Um grande número de índices de saúde da vegetação e índices de seca foram desenvolvidos a partir da relação TS/NDVI para o monitoramento e quantificação da seca agrícola/vegetativa, dentre estes se destacam o *Vegetation Health Index* (VHI, KOGAN 1990, 1997), o *Temperature-Vegetation Drought Index* (TVDI, SANDHOLT *et al.*, 2002), o *Vegetation Supply Water Index* (VSWI, CARLSON *et al.*, 1990; CARLSON *et al.*, 1994) e o *Drought Severity Index* (DSI, MU *et al.*, 2013). A combinação TS/NDVI tipicamente apresenta alta correlação negativa e a condição de estresse hídrico acontece quando a água armazenada no solo é insuficiente para sustentar o crescimento vegetal.

Para o monitoramento e diagnóstico eficaz da seca na região semiárida do Brasil é preciso desenvolver métodos que levem em consideração toda a extensão territorial da região, que é de aproximadamente 980 km², por outro lado a informação precisa ter um detalhamento necessário no nível municipal para direcionar as ações do Governo Federal de mitigação dos impactos da seca. Tais métodos ou indicadores necessitam ser de fácil interpretação e refletir os impactos diretos da seca nas atividades agrícolas e de pecuária. Posto isto, o objetivo do presente estudo foi avaliar o desempenho do índice VSWI como indicador de impactos da seca em áreas de atividades agropecuárias em toda a região semiárida do Brasil.

2 ÁREA DE ESTUDO

A região semiárida do Brasil (SAB) ocupa uma área de 982.000 km² e abrange um total de 1136 municípios com uma população de aproximadamente 22 milhões de pessoas (cerca de 12% da população total do Brasil - MEDEIROS *et al.*, 2012). Tal número faz da região semiárida do Brasil, a mais populosa em todo o mundo. Devido principalmente à alta variabilidade espacial e temporal da chuva, a agricultura de subsistência e a pecuária extensiva praticadas nesta região são também variáveis e consideradas de alto risco.

A produção agrícola no SAB é predominantemente formada por agricultura familiar (cerca de 90%), sendo a maior parte constituída de plantios em sistema de sequeiro, caracterizada por baixos índices de produtividade (IBGE, 2006). Embora o peso da pecuária dentro

dos contextos rurais familiares varie entre os diferentes municípios, de maneira geral representa uma das atividades mais importantes para os agricultores familiares, dada à sua maior resistência à seca quando comparada às explorações agrícolas. Assim, em alguns locais a pecuária se constitui em um dos principais fatores para a garantia da segurança alimentar das famílias rurais e geração de emprego e renda (COUTINHO *et al.*, 2013).

A Figura 1 apresenta as áreas de pastagens e atividades agrícolas na região de estudo de acordo com o mapeamento dos usos e cobertura realizado por VIEIRA *et al.* (2013), considerando imagens dos sensores TM (Thematic Mapper) e ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) do satélite Landsat 5 e 7.

Segundo o IBGE (2006), o número de estabelecimentos de agricultura familiar no semiárido brasileiro é de 1.493.852, com uma área média de 16,5 ha. A Figura 2 mostra a distribuição dos estabelecimentos de agricultura familiar em toda a região semiárida.

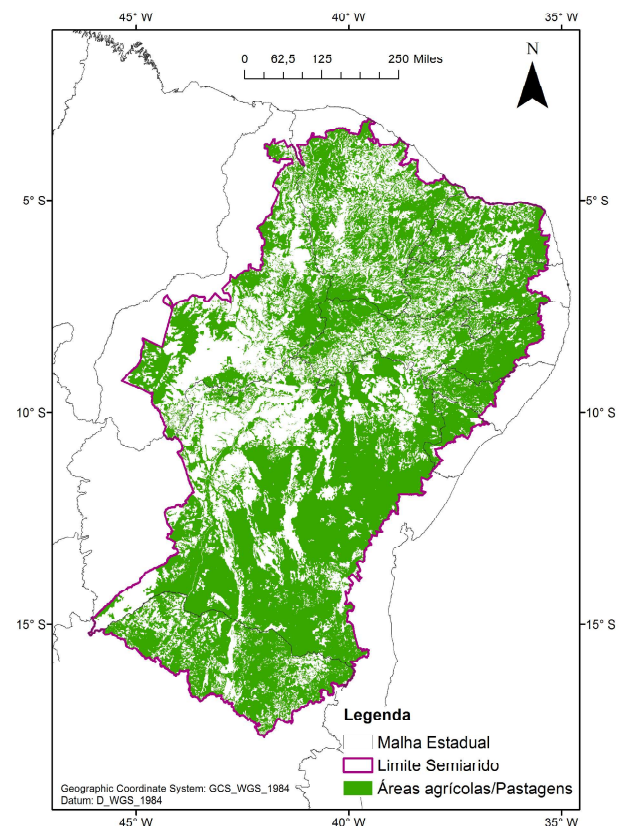


Fig. 1 - Localização geográfica da área de estudo e distribuição das áreas de pastagens e atividades agrícolas no semiárido do Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os conjuntos de dados utilizados no presente estudo consistem de dados provenientes de sensoriamento remoto (NDVI e TS), dados de precipitação obtidos de estações meteorológicas localizadas na área de estudo e dados de armazenamento de água no solo obtidos por modelo de balanço hídrico.

2.1 Dados de Precipitação

O banco de dados de precipitação consiste de dados observacionais disponíveis no Centro de Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e oriundos de diversas outras fontes tais como do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Centros Estaduais de Meteorologia. Os dados foram interpolados em grade regular de 5 km de resolução espacial utilizando a técnica de *kriging* (MATHERON, 1969). O período de dados considerado foi de 1998 a 2014.

2.2 Dados de Armazenamento de água no solo

Os dados de armazenamento de água no solo, utilizados no presente trabalho, foram obtidos a partir de um modelo de balanço hídrico oriundo do Projeto MUSA – Monitoramento de Umidade do Solo no sudeste da América do Sul (DOYLE et al., 2003), cujas informações estão detalhadas em <http://musa.cptec.inpe.br/index.html>. As estimativas de água no solo são realizadas integrando informações pedológicas e meteorológicas. As informações pedológicas são de levantamentos de solos da Embrapa e do RadamBrasil. O projeto RadamBrasil, realizado entre 1973-1984, mapeou extensivamente o território nacional (escala 1:1.000.000) considerando interpretação de imagens de radar e de outros sensores, apoiada em trabalhos de campo. Os solos foram amostrados determinando-se a profundidade dos horizontes, o tipo de solo, o tipo de vegetação, o tipo de relevo, etc. Para cada horizonte foram efetuadas análises físicas (textura, estrutura, etc) e químicas (matéria orgânica, macro e micro nutrientes, carbono, etc). Os perfis de solos foram interpolados utilizando técnicas de krigagem com uma resolução de 0,25°. Para a obtenção do armazenamento de água no solo são utilizadas funções de pedo-transferência

(TOMASELLA et al., 2000, ROSSATO et al., 2004) as quais são baseadas na equação de retenção de van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980). Cada parâmetro desta equação é relacionado com dados das propriedades básicas do solo, como textura, conteúdo de carbono orgânico, umidade equivalente e densidade global foram usadas técnicas de regressão linear múltipla, utilizando-se um polinômio de segunda ordem com coeficientes lineares (ROSSATO et al., 2005). As informações meteorológicas consideradas para o balanço de água no solo são obtidas pela rede de plataforma de coleta de dados do INPE e pelos dados da rede sinótica do INMET, os quais permitem a estimativa da evapotranspiração utilizando o modelo de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998).

2.3 NDVI e TS

Neste trabalho foram utilizados dois conjuntos de imagens do sensor MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua, disponibilizadas pelo Earth Observing System (EOS/NASA) por meio do Land Processes Distributed Active Archive Center (LP-DAAC). O primeiro conjunto é composto por dados de NDVI dos produtos MOD13A2 e MYD13A2, ambos com resolução espacial de 1 km e composição de 16 dias. O segundo conjunto de dados é composto por dados de temperatura da superfície dos produtos MOD11A2 e MYD11A2, ambos com resolução de 1 km e composição de 8 dias. Os dois conjuntos de dados foram elaborados para o período de 2003 a 2014.

As imagens do sensor MODIS são disponibilizadas diariamente, porém para a utilização dos dados é necessário realizar uma série de processamentos. As séries temporais do MODIS provem dados em tempo quase real, de maneira contínua e com alta resolução espacial. Tais imagens podem ser utilizadas para avaliação do desenvolvimento das secas, bem como sua severidade principalmente em regiões onde as observações meteorológicas são escassas e não acuradas. As imagens adquiridas no formato HDF foram convertidas para o formato Geotiff e reprojatadas para Projeção Geográfica (datum WGS-84) com o auxílio da ferramenta *MODIS Reprojection Tool* (MRT), disponibilizada gratuitamente no endereço eletrônico <http://edcdaac.usgs.gov/landdaac/tools/modis/index.asp> (Anderson et al. 2005).

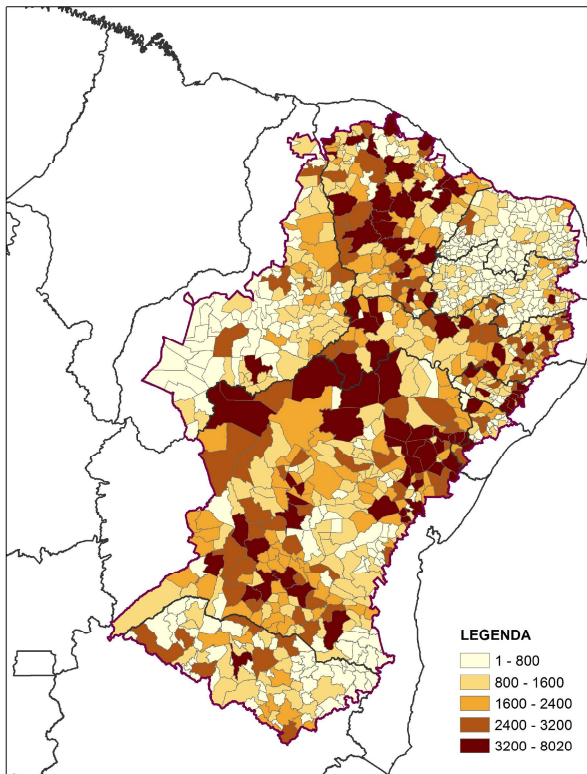


Fig. 2 - Número de Estabelecimentos agropecuários com efetivo da pecuária na agricultura familiar na Região Semiárida do Brasil segundo IBGE (2006).

As escalas temporais dos dados de temperatura da superfície e NDVI foram ajustadas por meio de composição das imagens em médias mensais. Ambos os conjuntos de dados foram filtrados com a finalidade de extrair ruídos provenientes de corpos d'água e áreas urbanas.

2.4 Vegetation Supply Water Index (VSWI)

O crescimento da cultura necessita continuamente de suprimento de água para assegurar a colheita. As principais fontes de água para agricultura são a chuva e a irrigação. Quando o suprimento de água no solo é suficiente, a evapotranspiração da agricultura aumenta, levando à redução da temperatura do dossel (característica que pode ser observada pelas imagens de satélite). Durante período de seca, o suprimento de água no solo não atende a demanda de água para o crescimento da cultura. Consequentemente, ocorre o fechamento dos estômatos para a redução da perda de água do dossel pela evapotranspiração, levando ao aumento da temperatura. Assim, as características de adaptação fisiológicas da vegetação se alteram em função da umidade do solo e podem ser

detectadas por meio de sensores em forma de características espectrais da copa da vegetação.

O VSWI relaciona o NDVI com TS em forma de razão. O índice indica condição de seca quando o valor do NDVI é baixo (baixa atividade fotossintética) e a temperatura da vegetação é alta (estresse hídrico). Portanto, o índice é inversamente proporcional ao conteúdo de umidade do solo e fornece uma indicação indireta do suprimento de água para a vegetação.

Para cada pixel i no período j para o ano k , valores maiores de VSWI indica alta temperatura do dossel e baixo valor de índice de vegetação que significa que a vegetação está sob condição de estresse hídrico. O índice VSWI é calculado utilizando imagens de NDVI e temperatura do sensor MODIS a bordo dos satélites AQUA e TERRA (NASA EOS). A resolução espacial do produto final é de 1 km e resolução temporal de 8 dias (composição Terra/Aqua).

Uma das adaptações realizadas para a aplicação do índice VSWI como indicador de impacto da seca foi calcular o índice apenas sob áreas de atividades agropecuárias (pastagens e cultivos agrícolas), excluindo assim áreas urbanas, corpos d'água e vegetação natural (caatinga, cerrado, etc). O limite espacial das áreas sob atividades agropecuárias foi extraído do mapeamento atualizado dos usos e cobertura da terra elaborado para a Região Nordeste do Brasil (VIEIRA *et al.*, 2013). O mapa foi derivado de imagens Landsat 7 (15 metros) e Landsat 5.

O índice VSWI apresenta grande variabilidade espacial na área de estudo. Um valor alto do índice pode indicar seca em uma região, mas em outra pode não ser indicativo de seca. Tal relação depende da cobertura vegetal e solo da região (entre outros fatores). Assim, para evitar o uso de um range de valores que possa conter erros, consideramos o uso de porcentagens de anomalias de VSWI. As porcentagens de anomalias VSWI foram calculadas para avaliar as mudanças do índice em relação às condições normais. Porcentagens de anomalias positivas indicam que o índice em determinado período é maior do que a média, indicando condição de seca e vice-versa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo do índice VSWI, imagens de temperatura e NDVI obtidas do sensor MODIS nas plataformas Terra/Aqua foram processadas

com a finalidade de obter um conjunto robusto de dados com a mesma resolução temporal.

A Figura 3 apresenta os valores médios do índice VSWI para o ano hidrológico considerando os dados de 2003 a 2014. Valores mais elevados de VSWI (>80) implicam em temperaturas elevadas do dossel e/ou baixa densidade do dossel, o que pode indicar uma situação de estresse hídrico. De modo geral são observados valores mais altos de VSWI. A maior parte da área do semiárido apresenta valores elevados do índice VSWI, que podem estar associados com a distribuição da precipitação anual na região (não mostrado). Climatologicamente, a região é caracterizada por acumulados de precipitação igual ou inferior à 800 mm.

A região semiárida é predominantemente coberta por áreas de pastagens e caatinga (VIEIRA *et al.*, 2013). Estes tipos vegetacionais normalmente apresentam valores mais baixos de NDVI durante todo o ano. Na Figura 3 as áreas associadas com valores mais altos de VSWI, correspondem em sua maioria em áreas com vegetação esparsa e áreas de solo exposto. Nos casos de áreas de solo exposto e dunas, por exemplo, o solo arenoso fica exposto à intensa radiação solar e tem baixa eficiência para a retenção de água, ou seja, são regiões onde nenhuma atividade fotossintética é observada o que corrobora para o índice VSWI apresente valores elevados. Ressalta-se que a utilização dos valores brutos do índice VSWI como indicador de estresse hídrico para tais áreas, torna-se pouco aplicável em função da resposta do solo (SON *et al.*, 2012).

A Figura 4 apresenta a variação espacial e temporal do percentual de anomalia de VSWI para os anos hidrológicos de 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013 e 2013-2014. Os períodos foram selecionados com a finalidade de analisar a seca de 2012-2013 que impactou toda a região semiárida. Anomalias positivas do índice VSWI indicam que o índice é maior do que a média (tons de vermelho), assinalando uma condição de seca e vice-versa (anomalias negativas: tons em azul).

Para o ano hidrológico de 2010-2011, pode ser observado que a maior parte da região semiárida apresentou condições de “não-seca”, ou seja, anomalias negativas do índice VSWI,

principalmente nas porções central e norte da região (Figura 4 a). Na média, as anomalias atingiram o valor de aproximadamente -8%, o que indica uma condição de mais produtividade vegetal (sem impactos de seca). Tal condição indica que de modo geral o ano hidrológico 2010-2011 foi adequado para as atividades agrícolas e produção pecuária em grande parte do semiárido. O acumulado de precipitação para este período na região semiárida foi de 900 mm (não mostrado). Os resultados obtidos com o índice VSWI, vão de encontro com aqueles obtidos a partir de dados dos percentis de precipitação (Figura 5 a).

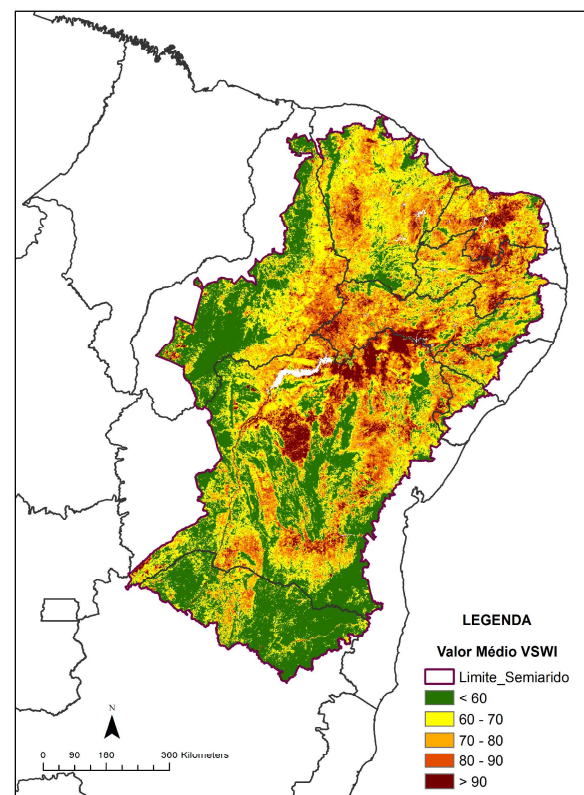


Fig. 3 – VSWI médio no ano hidrológico (Outubro à Setembro) para o período de 2003 a 2014.

O percentil possui cinco diferentes classificações. Se uma região apresentar um acumulado de chuva abaixo do percentil de 15%, considera-se que esta região está passando por um período muito seco, se chuva permanecer entre os percentis de 15% e 35% a região passa por um período seco, entre 35% e 65% normal, entre 65% e 85%, úmido e regiões com chuvas acima do percentil 85% são consideradas muito úmidas.

De acordo com a Figura 5 a, o ano hidrológico 2010-2011, foi um período chuvoso em grande parte do semiárido o que esteve associado a quase nenhum impacto de seca para a vegetação. A exceção acontece apenas algumas regiões no leste da Bahia que apresentaram escassez de chuvas. Para algumas dessas regiões, as anomalias de VSWI também foram positivas. Os dados de armazenamento de água no solo para o ano hidrológico de 2010-2011, também apresentam o mesmo padrão identificado com o índice VSWI e os percentis de precipitação (Figura 6 a), valores mais elevados de água no solo, principalmente na porção mais ao norte e mais ao sul da região.

No ano hidrológico 2011-2012 a região semiárida passou por escassez de chuvas, onde o acumulado de precipitação não ultrapassou os 500 mm. Como resultado, a vegetação passou por estresse hídrico. A condição de seca vegetativa esteve presente em cerca de 50% de todo semiárido. O estresse hídrico foi mais intenso no leste da Bahia (que já havia apresentado sinais de estresse hídrico no ano anterior).

A região em torno do Ceará foi a única a manter a condição de vigor vegetativo.

Os percentis de precipitação, o armazenamento de água no solo e as anomalias de VSWI apresentaram concordância para essas áreas. (Fig. 4 b, 5 b e 6 b).

A seca foi mais intensa no ano hidrológico de 2012-2013, quando a vegetação experimentou estresse hídrico e, portanto, baixa produtividade vegetal (Figura 4 c). Nesse ano o acumulado de chuva na região foi de 600 mm. A maior parte da área de estudo foi submetida a uma extensiva e intensiva seca vegetativa (aproximadamente 85%), principalmente nas porções norte e central da região. O pico de anomalia positiva foi de 15,4%. Cerca de 60% da região semiárida consiste de pecuária extensiva e áreas de atividade de agricultura familiar, consequentemente a ocorrência de seca em intensidade e em vastas áreas comprometeu a produção agropecuária. Com relação aos dados de percentis, nota-se que houve um déficit de chuva em grande parte do semiárido, porém não tão intenso como no ano anterior (Fig. 5 c). Nesse caso, em pelo menos 50%, os dados de VSWI e os percentis de precipitação não concordam em intensidades de seca.

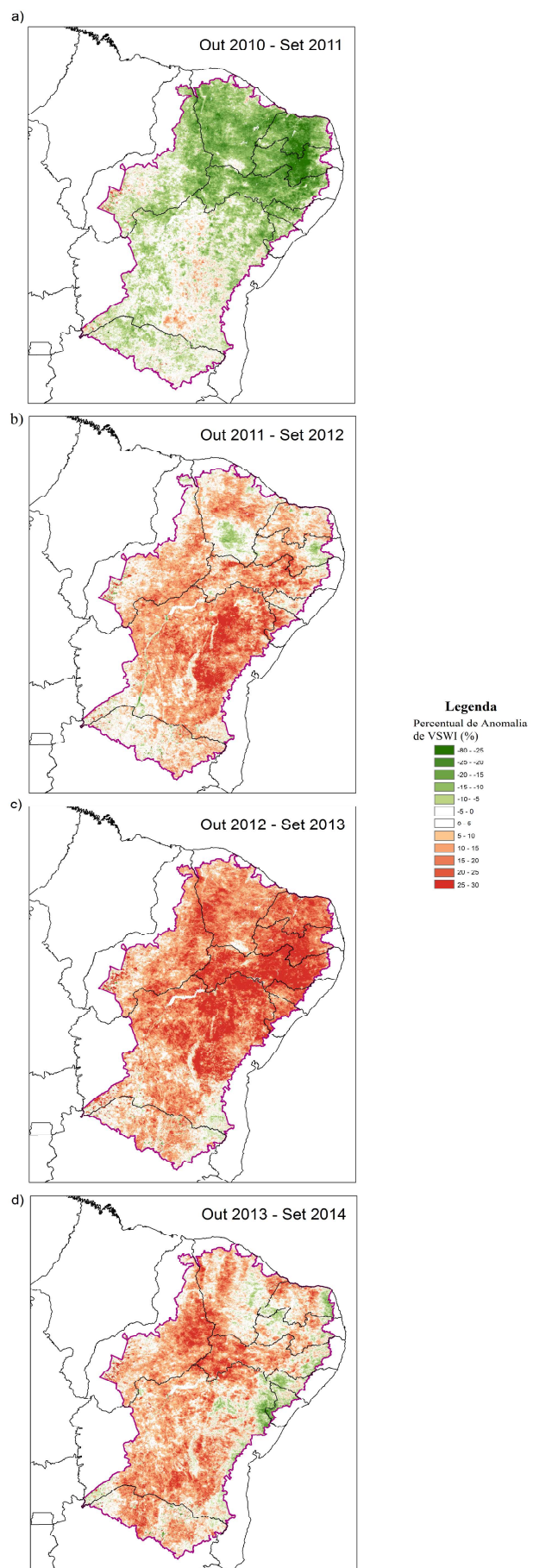


Fig. 4 – Percentual de anomalia de VSWI para os anos hidrológicos 2010-2011 (a), 2011-2012 (b), 2012 – 2013 (c), 2013 -2014 (d).

Segundo as anomalias de VSWI, o ano hidrológico 2012-2013 foi mais intenso que 2011-2012, o oposto é verificado com os percentis. Uma explicação para a baixa concordância entre os indicadores é o “efeito memória” da vegetação.

Em regiões áridas e semiáridas, a chuva ocorre em períodos curtos do ano, o que afeta diretamente o período chuvoso do ano corrente bem como, indiretamente o período chuvoso do ano seguinte através do efeito memória (capacidade dos ecossistemas semiáridos em se beneficiar dos excedentes de suprimento de água, indicando uma memória de um evento passado de excedente hídrico em um intervalo de tempo de um ano, MARTINY *et al.*, 2005, PHILIPPON *et al.*, 2005) e também o “efeito recuperação” (dificuldade da vegetação em recuperar de um ano seco prévio, MARTINY *et al.*, 2005). A seca pode reduzir a resiliência, tornando as plantas mais vulneráveis a um evento anômalo de seca recorrente. Em outras palavras, as anomalias positivas de VSWI de um ano precedido pela seca podem ser mais intensas, tal como aquele visto no ano hidrológico de 2012-2013 que foi precedida por um ano hidrológico seco (2011-2012).

A vegetação pode ser intensamente impactada pela seca, em um ano hidrológico precedido por outro ano seco (efeito recuperação). Por outro lado, um ano hidrológico mais úmido afeta o ano hidrológico seguinte, daí o fato do ano hidrológico 2012-2013 ter sido mais impactado que o ano 2011-2012. De acordo com os dados de armazenamento de água no solo o ano hidrológico 2012-2013 também permaneceu sob condição de estresse hídrico com armazenamento inferior a 50% em grande parte da região (Figura 6 c).

Finalmente, no ano hidrológico de 2013-2014, o acumulado de precipitação foi maior do que nos anos anteriores (700 mm, ainda abaixo da média climatológica).

Com isso, os impactos da seca também foram menos intensos (Figura 4 d), principalmente na porção norte da região semiárida. O total de áreas impactadas foi reduzida para 40 %. Segundo os dados calculados de percentis de precipitação, nesse período, o leste do semiárido volta a receber a categoria de muito úmido e úmido (Figura 5 d). O armazenamento de água no solo também apresenta um aumento, principalmente nas porções mais a leste e norte da região (Figura 6d), sendo que em alguns pontos o armazenamento volta a atingir mais 75%. Por outro lado, áreas em condição de seca ainda permanecem no norte de Minas Gerais e sul

da Bahia e também na fronteira entre sul do Ceará, leste do Piauí e extremo oeste de Pernambuco (menor resiliência).

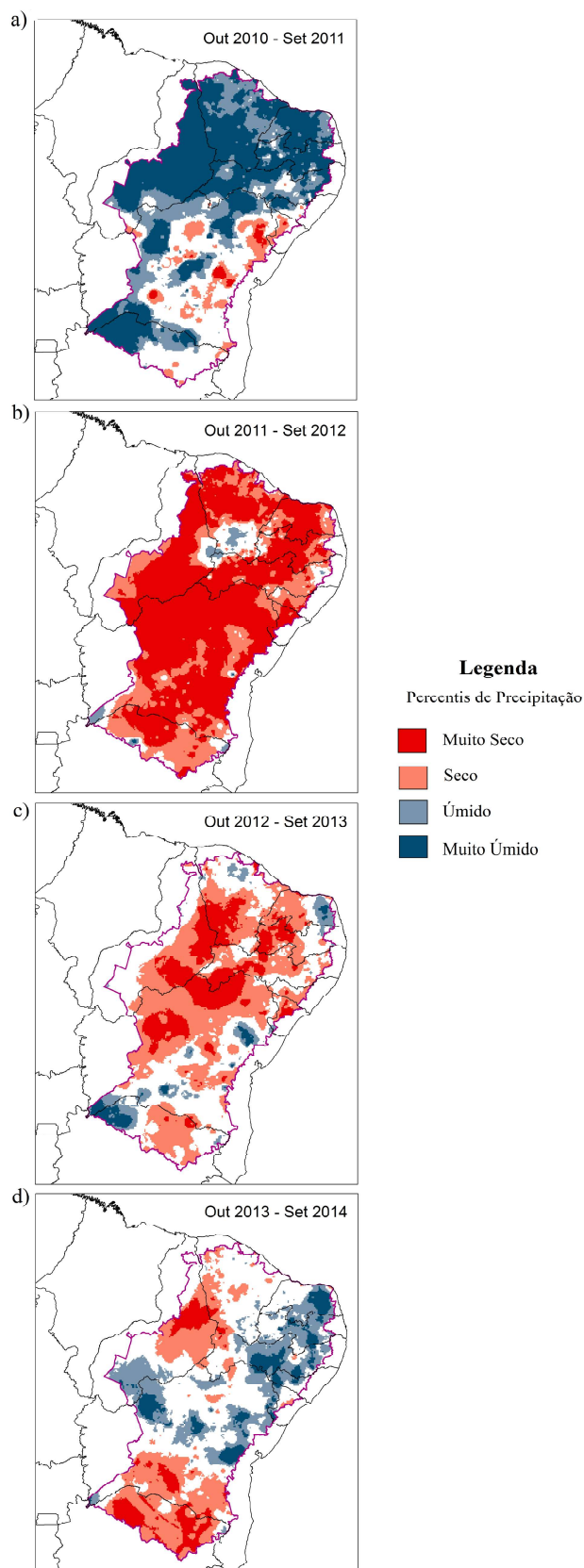


Fig. 5 – Percentis de precipitação para os anos hidrológicos 2010-2011 (a), 2011-2012 (b), 2012 – 2013 (c), 2013 -2014 (d).

3.2 Validação dos Impactos da Seca

Com a finalidade de verificar a relação do índice VSWI com a distribuição da precipitação em nível local, dados observacionais de precipitação obtidos de sete diferentes estações meteorológicas para o período de 2011-2013 foram analisados.

Os dados de precipitação e VSWI apresentaram consistência na evolução temporal da seca (Figura 7), mostrando correlação inversa entre o índice e precipitação. De modo geral, os valores de VSWI são mais elevados em períodos mais secos, indicando um agravamento do estresse hídrico. Após período de chuva, o índice volta a apresentar valores reduzidos, indicando uma recuperação do estresse hídrico. Os coeficientes de correlação entre a precipitação e VSWI variaram entre 0,54 a 0,82, ou seja, o índice VSWI refletiu a ocorrência de condições de déficit hídrico ou condição inversa.

Como era esperado observa-se um pequeno delay entre o número de dias com chuva e a curva do índice VSWI, ou seja, o evento de chuva e o tempo de resposta da vegetação.

Comportamento este já identificado em muitos outros estudos que correlacionam o NDVI com precipitação (ABBAS *et al.*, 2014) O tempo de resposta é muito dependente do tipo de vegetação, sendo que o maior tempo geralmente é identificado para áreas cobertas por vegetação mais densa e tempos mais curtos para áreas de pastagens e agrícola (COLDTIZ *et al.*, 2007; SHAHABFAR *et al.*, 2013). No presente estudo, foram consideradas apenas áreas de pastagens e/ou agrícolas.

Na maioria dos casos selecionados, observa-se uma alternância de condições de seca e “não-seca”, configurando um comportamento bi-modal anual tanto do índice VSWI como da precipitação (Figura 6a,b,d,e), sendo característico de regiões com a estação chuvosa e seca bem marcadas (como é em grande parte da região semiárida).

Dos municípios selecionados, os que apresentaram valores mais elevados do índice foi Monteiro (cerca de 130), seguido de Florânia e Monte Santo (cerca de 120). Em todos os casos, no início da série, VSWI apresentou valores baixos (cerca de 60), sugerindo uma condição mais úmida nos primeiros meses de 2011 (Figura 7), tal condição de umidade também é verificada pelos acumulados de chuva no ano hidrológico 2010-2011 (Figura 5a).

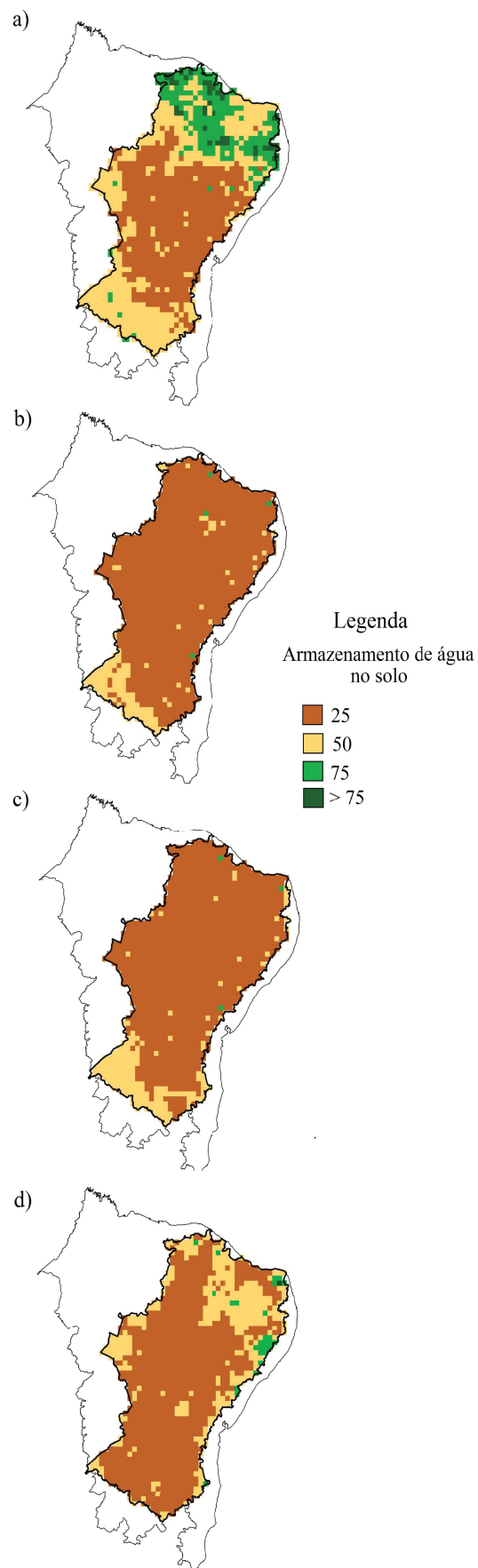


Fig. 6 - Armazenamento de água no solo (mm), média para os anos hidrológicos 2010-2011 (a), 2011 – 2012 (b), 2012-2013 (c), 2013-2014 (d) para a região do Semiárido do Brasil.

A correlação de VSWI considerando os dados observados de precipitação foi maior do que considerando os dados interpolados (não mostrado). O que pode ser explicado por inconsistências nos dados de precipitação interpolados, uma vez que as estações meteorológicas são poucas e distantes entre si considerando toda a região de estudo. Assim, em regiões com baixa densidade de estações meteorológicas, tais erros devem ser considerados.

Para avaliar a aplicabilidade do índice VSWI em áreas de produção pecuária (pastagens), foram considerados dados do IBGE da produção da pecuária mensal para o período de 2006 a 2014 e realizadas análises de correlação. Ressaltando que os dados de VSWI foram extraídos por município considerando apenas as áreas cobertas por pastagens, excluindo assim, corpos d'água, áreas de vegetação natural e urbana. A Figura 8 apresenta a variação anual da produção pecuária e os dados médios anuais de VSWI, e os respectivos coeficientes de determinação, r^2 .

Para todos os municípios analisados, observa-se um pronunciado crescimento da produção pecuária entre os anos de 2007 e 2011 e redução acentuada no ano de 2012. Tal resultado vai de encontro com as variações interanuais do índice VSWI, onde se observa uma redução do índice entre os anos de 2007 a 2011 e aumento no ano de 2012. Tal resultando indica que a queda da produção pecuária pode estar relacionada à condição de estresse hídrico observado nas áreas de pastagens como resultado da seca intensa na região. A correlação entre a perda da produção pecuária e o índice VSWI variou entre 0,56 e 0,95 nos municípios avaliados.

Durante eventos de seca, a redução da precipitação associada ao aumento da temperatura corrobora para a queda da produção vegetal. Uma parcela substancial da atividade econômica da Região Nordeste é baseada na produção agropecuária, sendo que grande parte, em sistema de sequeiro. Nesse contexto, a vulnerabilidade das camadas mais pobres da produção eleva-se consideravelmente.

3.2.1 VSWI versus Umidade do Solo “in situ”

A redução da precipitação, bem como o aumento da temperatura pode levar à baixa disponibilidade de água no solo. Se o cenário é de um período prolongado de déficit de precipitação, o conteúdo de água no solo reduz acentuadamente devido à transpiração das plantas e evaporação da água no solo, em especial nas camadas insaturadas. Em tal condição a extração de água pelas raízes torna-se árdua. Com a redução da água disponível, a vegetação sofre estresse hídrico o que pode levar ao desenvolvimento de alguma doença ou mesmo à morte (HE *et al.*, 2015).

Conforme já foi destacado, o índice VSWI é inversamente proporcional ao conteúdo de umidade do solo e fornece uma indicação indireta do suprimento de água para a vegetação (MARZEN *et al.*, 2003). Um dos objetivos do presente estudo foi realizar uma comparação entre o índice VSWI com variáveis associadas à seca, dentre elas, o conteúdo de água no solo.

Devido à escassez de dados observacionais de umidade do solo em todo o Nordeste do Brasil, o índice VSWI foi validado considerando dados de umidade do solo medidos de um único sítio experimental.

A Figura 9 apresenta a evolução temporal dos dados acumulados de precipitação, VSWI e conteúdo volumétrico de água no solo para o sítio experimental localizado na Embrapa (9°03'30,6''S; 40°19'45,1''W) – Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido

CPATSA. O total de chuva acumulado entre os meses de outubro de 2003 a janeiro de 2005 apresenta uma estação seca prolongada e pronunciada na região, com chuva intensa concentrada nos meses de janeiro a março. Com relação ao conteúdo volumétrico de água no solo, é observado um pico nos primeiros meses do ano 2004 e então, uma redução e estabilidade nos meses seguintes. Embora, as três variáveis apresentem um pequeno atraso de resposta, a curva de umidade do solo segue o padrão da precipitação acumulada. Como esperado, a curva VSWI tem uma relação inversa com a precipitação acumulada e conteúdo volumétrico de água.

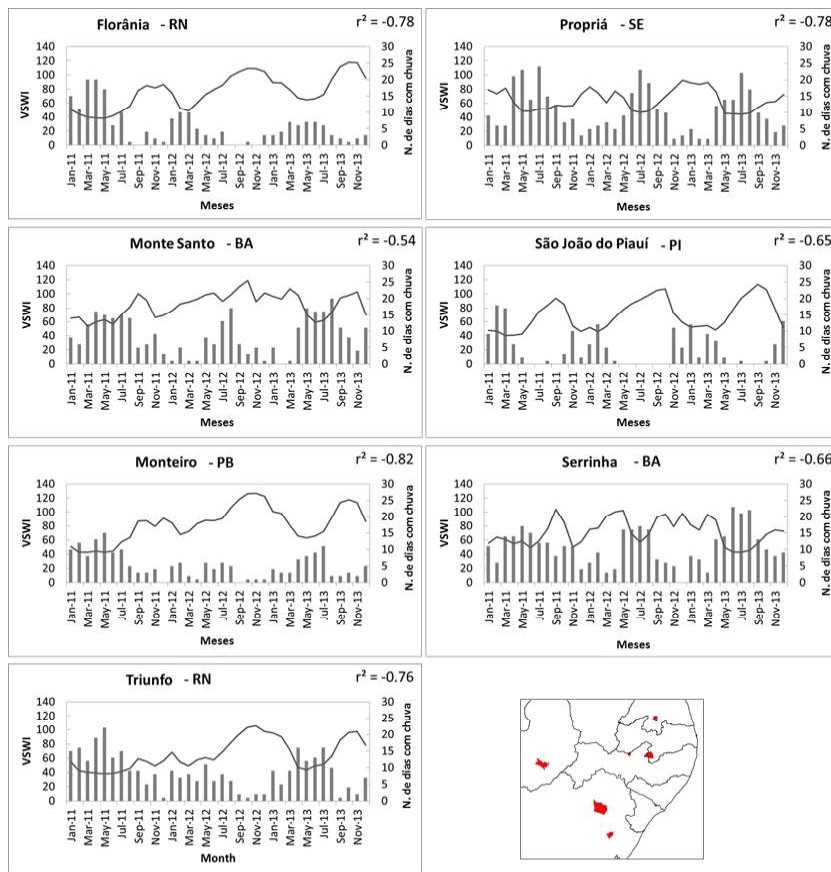


Fig. 7 - Número de dias com chuva por mês e evolução mensal do índice VSWI.

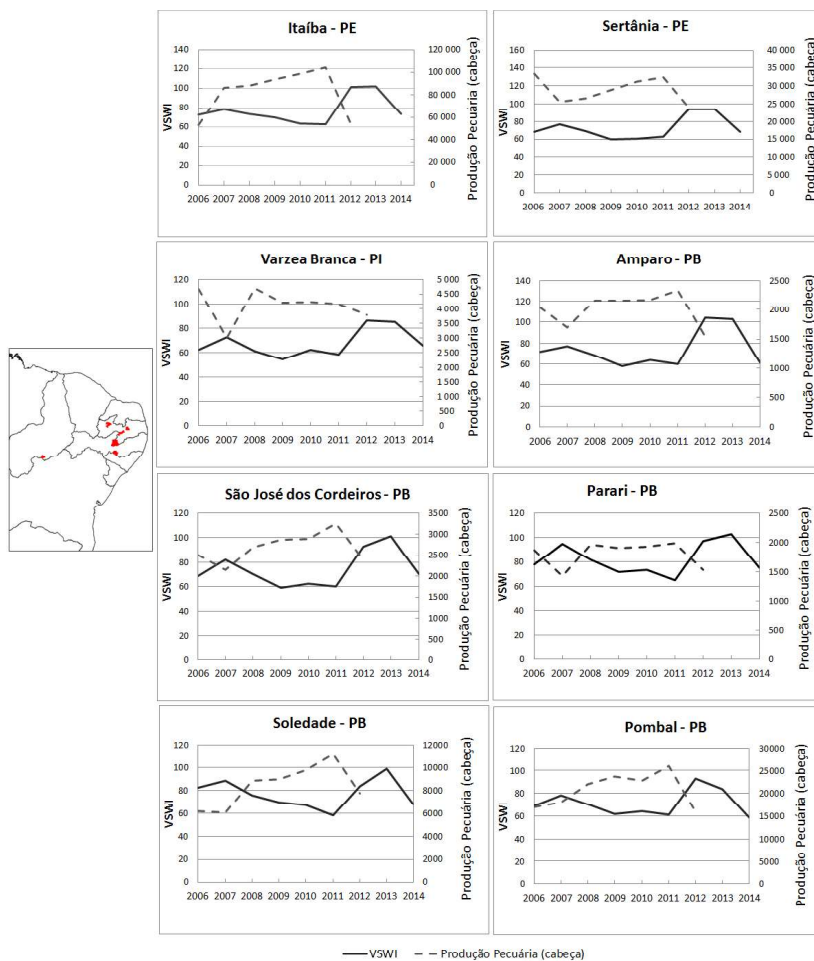


Fig. 8 - Produção pecuária municipal (IBGE) e evolução anual do índice VSWI

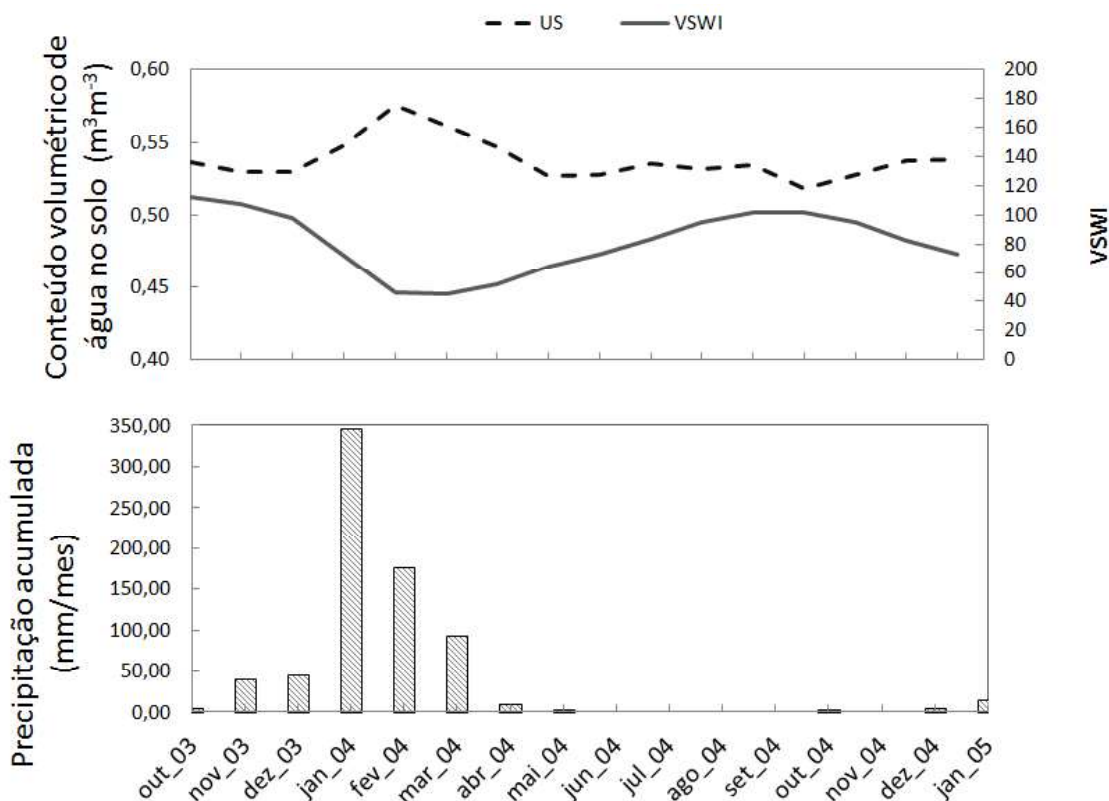


Fig. 9 - Evolução mensal da precipitação acumulada, VSWI médio mensal e conteúdo volumétrico de água no solo ($m^3 m^{-3}$)

4. CONCLUSÕES

A seca é um fenômeno natural que é manifestada por meio da redução da produtividade agrícola ou mesmo pecuária, causando problemas sócio-políticos. Diferentes indicadores de seca são conhecidos e utilizados na comunidade científica. Porém, os impactos da escolha de um determinado indicador para a caracterização da seca (isto é, severidade, frequência e duração) permanecem pouco compreendidos. De modo geral, os diferentes indicadores de seca, muitas vezes não se correlacionam uns com os outros. Algum indicador pode acusar condição de seca em uma região, enquanto o outro pode não apresentar condições semelhantes. Os dados hidrometeorológicos para o monitoramento de seca, tais como precipitação e umidade do solo obtidos por estações meteorológicas e/ou agrometeorológicas muitas vezes apresentam baixa densidade espacial, especialmente em regiões extensas como a do semiárido do Brasil. Em casos como esse, dados provenientes de sensores a bordo de satélites, demonstram ser ferramentas úteis para a tarefa de monitorar áreas extensas impactadas pela seca, tanto espacialmente como temporalmente.

Os resultados do presente trabalho mostram que a relação empírica LST-NDVI pode ser eficazmente explorada como um indicador das características espaço-temporais de condições de estresse hídrico na vegetação, em especial em áreas cobertas por pastagens.

O índice VSWI deve ser utilizado na forma de anomalias, a fim de evitar interpretações não consistentes. Além disso, a utilização do índice é principalmente recomendada para o período de crescimento vegetal (estações chuvosas).

Os resultados também pontuaram para a importância da dinâmica da vegetação nas análises dos impactos da seca, uma vez que anos previamente mais secos ou mais úmidos apresentam impactos nos anos subsequentes (efeitos memória e recuperação vegetal).

Devido às diferentes fontes de dados e informações que são utilizados para o desenvolvimento de índices de seca, os resultados do monitoramento que são obtidos a partir dos índices, muitas vezes podem apresentar algumas diferenças. Dessa maneira, é importante que para análises de impactos da seca, principalmente para fins de gestão pública no que concerne a aplicação de ações emergenciais, torna-se importante a não

consideração de apenas um único índice. O uso combinado de diferentes indicadores, ao mesmo tempo ou índices que integram várias fontes de informação podem alcançar resultados que são mais consistentes com a situação real.

Além disso, é necessário ter a clareza sobre o tipo de seca que se propõe avaliar, uma vez que determinados indicadores são desenvolvidos para tipos específicos de seca. Por exemplo, o uso do SPI é apropriado para a seca meteorológica, por outro lado, indicadores como aqueles relacionados à umidade do solo, tal como o VSWI, são mais apropriados para o monitoramento da seca vegetativa/agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, S., NICHOL, J.E., QAMER, F.M., XU, J. Characterization of drought development through remote sensing; a case study in Central Yunnan, China. **Remote Sensing** 6(6), p. 4998–5018. 2014.

ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M., 1998. “Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements,” FAO—**Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome**. 297p.

ALLEN, C.D., A.K. MACALADY, H. CHENCHOUNI, D. BACHELET, N. MCDOWELL, M. VENNETIER, T. KIZBERGER, A. RIGLING, D.D. BRESHEARS, E.H. HOGG, P. GONZALEZ, R. FENSHAM, Z. ZHANG, J. CASTRO, N. DEMIDOVA, J.H. LIM, G. ALLARD, S.W. RUNNING, A. SEMERCI, AND N. COBB. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. **Forest Ecology and Management**. v. 259(4), p. 660-684. 2010.

ALVES, I. M. B., REPELLI, C. A. Rainfall variation in the northern part of the Brazilian Northeast and the El Niño events—Southern Oscillation (ENSO), **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. v. 7, p. 583–592. 1992.

ANDERSON, L. O., ARAGÃO, L. E. O. C., LIMA, A., SHIMABUKURO, Y. E. Detecção de cicatrizes de áreas queimadas baseada no modelo linear de mistura espectral e imagens índice de vegetação utilizando dados multitemporais

do sensor MODIS/TERRA no estado do Mato Grosso, Amazônia brasileira. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 35, n. 4, p. 445-456, Dec. 2005.

BATISTA JÚNIOR, W. **Identificação e avaliação dos fatores de ocorrência de secas na bacia do Rio Guandu – Espírito Santo**. Tese de Doutorado. Meteorologia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa. 2012.

BERLINER, P., OOSTERHUIS, D.M., GREEN, G.C. Evaluation of the infrared thermometer as a crop stress detector. **Agricultural Forest Meteorology** 31, p. 219-230. 1984.

BHUIYAN, C., SINGH, R. P., AND KOGAN, F. N. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**. 8, p. 289–302. 2006.

CAROLWICZ, M., 1996. Nature hazards need not lead to natural disasters. **EOS77**, v.16, p. 149–153. 1996.

CARLSON, T.N., PERRY, E.M., SCHMUGGE, T.J. Remote estimation of soil moisture availability and fractional vegetation cover for agricultural fields. **Agricultural Forest Meteorology** 52, p. 45–69. 1990.

CARLSON, T.N., GILLIES, R.R., PERRY, E.M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. **Remote Sensing Reviews** 9, p. 161–173. 1994.

COUTINHO, M. J. F.; CARNEIRO, M. S. S.; EDVAN, R. L. et al. A Pecuária como atividade estabilizadora no semiárido brasileiro. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.20, p.9-17, 2013.

DAI, A.G., TRENBERTH, K.E., QIAN, T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming. **Journal of Hydrometeorology**. v. 5, p. 1117–1130. 2004.

DAI, A. Increasing drought under global warming in observations and models. **Nature Climate Change** v. 3, p. 52–58. 2013.

DAVENPORT, M. L.; NICHOLSON, S.

- E. On the relation between rainfall and the Normalized Difference Vegetation Index for diverse vegetation types in East Africa. **International Journal of Remote Sensing**, 14, 2369-2389. 1993.
- DIFFENBAUGH, N. S., SWAIN, D. L., TOUMA, D. Anthropogenic warming has increased drought risk in California. 112, p. 3931–3936. doi: 10.1073/pnas.1422385112. 2015.
- DU, L., TIAN, Q., YU, T., MENG, Q., JANCOSO, T., UDVARDY, P., HUANG, Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. **International Journal of Applied Earth Observation** 23, p. 245-253. 2013.
- FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.F.; AMORIM, A.O.; CARDOSO, A.S. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2009. 45p. (Documentos, 244).
- GIBBS, W.J., MAHER, J.V. Rainfall Deciles as Drought Indicators. **Bureau of Meteorology Bulletin No. 48. Commonwealth of Australia, Melbourne**. 1967.
- GOETZ, S.J. Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature, and biophysical variables at a mixed grassland site. **International Journal of Remote Sensing** 18 (1), p. 71–94. 1997.
- GUTMAN, G. Towards monitoring droughts from space. **Journal of Climate**. 3, p. 282–295. 1990.
- HAN, Y., WANG, Y.Q., ZHAO, Y.S. Estimating soil moisture conditions of the greater Changbai Mountains by land surface temperature and NDVI. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 48, p. 2509–2515. 2010.
- BINBIN, H., LIAO, Z., QUAN, X., LI, X., Hu, J. 2015.
- A Global Grassland Drought Index (GDI) Product: Algorithm and Validation. **Remote Sensing** 7(10): p. 12704-12736.
- HENRICKSEN, B. L., DURKIN, J.W. Growing period and drought early warning in Africa using satellite data. In: **Journal of Remote Sensing** v.7, p. 1581-1608. 1986.
- HERRMANN, S.M., ANYAMBA, A., TUCKER, C.J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. **Global Environmental Change** 15, p. 394–404. 2005.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e estatística. Censo Agropecuário, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>.
- IBRAHIM, Y.Z., BALZTER, H., KADUK, J., TUCKER, C.J. Land Degradation Assessment Using Residual Trend Analysis of GIMMS NDVI3g, Soil Moisture and Rainfall in Sub-Saharan West Africa from 1982 to 2012. **Remote Sensing** 7, p. 5471-5494. 2015.
- JOHNSON, G.E., ACHUTUNI, V.R., THIRUVENGADACHARI, S., KOGAN, F.N. The role of NOAA satellite data in drought early warning and monitoring: selected case studies. Chapter in: **Drought assessment, management and planning: Theory and case studies**, eds. D.A. Wilhite. Kluwer Academic Publ. 1993.
- KARNIELI, A., AGAM, N., PINKER, R.T., ANDERSON, M., IMHOFF, M.L., GUTMAN, G.G., PANOV, N., GOLDBERG, A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations. **Journal of Climate** 23, p. 618–633. 2010.
- KEYANTASH, J., DRACUP, J.A. An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. **Water Resources Research** 40, doi:10.1029/2003WR002610 (W09304). 2004.
- KOGAN, F.N. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. **International Journal of Remote Sensing** v. 11 (8), p. 1405 – 1419. 1990.
- KOGAN, F.N. Global drought watch from space. **Bulletin of the American Meteorological Society** 78, p. 621–636. 1997.
- KOGAN, F.N. World droughts in the new millennium from AVHRR-based Vegetation Health Indices. **Eos Transactions American Geophysical Union** 83 (48), p. 562–563. 2002.
- LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E.; BOLFE, E. L. Monitoramento da seca 2011/2012 no Nordeste

- brasileiro a partir do satélite Spot-Vegetation e TRMM. **Revista Engenharia na Agricultura** 22.3 : p. 211-221, 2014.
- LINDOSO, D.; ROCHA, J. D.; DERBOTOLI, N. PARENTE, I. I. C.; EIRÓ, F. BURSZTYN, M.; RODRIGUES-FILHO. Climate Change and Vulnerability to drought in the Semiarid: the case of smallholder farmers in the Brazilian northeast. In: Seroa da Motta, R.; Hargrave, J.; Luedemann, G.; Gutierrez, M. B. S. (Eds.). **Climate change in Brazil: economic, social and regulatory aspects**. Brasília: Ipea, p. 235–256, 2011.
- LIU, J., WU, J., WU, Z., LIU, M. Response of NDVI dynamics to precipitation in the Beijing–Tianjin sandstorm source region. **International Journal of Remote Sensing**. 34, p. 5331-5350. 2013.
- MAIA, R.; VIVAS, E.; SERRALHEIRO, R.; CARVALHO, M. Socioeconomic Evaluation of Drought Effects. Main Principles and Application to Guadiana and Algarve Case Studies. **Water Resources Management**. v. 29 (2), p. 575-588. 2015.
- MARZEN, L.J, WERSINGER, J.M., KOPALLE, D., BHUTA, A. 2003. Evaluation of an approach for estimating surface moisture status with MODIS data. **Proceedings of the Applied Geography Conference**, 26.
- MCKEE, T.B., DOESKEN, N.J., KLEIST, J. The relation of drought frequency and duration to time scales. **Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology**. Am. Meteorol. Soc. Boston. P. 179–184. 1993.
- MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil, **Parcerias Estratégicas**, v. 27, p. 149–175, 2008.
- MARTINY, N., RICHARD, Y., CAMBERLIN, P. Interannual persistence effects in vegetation dynamics of semi-arid Africa, **Geophysical Research Letters**. 32, L24403, doi:10.1029/2005GL024634. 2005.
- MATHERON, G. Le krigeage universel. Technical Report 1, Paris School of Mines. Cah. Cent. Morphol. Math., Fontainebleau. 1969.
- MEDEIROS, S. S., Cavalcante, A. M. B., Perez Marin, A. M., Tinôco, L. B. M., Harnan, S. I., Pinto, T. F. **Sinopse do Censo Dem o gráfico para o Semiárido Brasileiro**. Campina Grande, PB: INSA, 2012.
- MU, Q., ZHAO, M., KIMBALL, J.S., MCDOWELL, N.G., RUNNING, S.W. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. **Bulletin of the American Meteorological Society** 94, p. 83–98. 2013.
- NAGARAJAN, R. Drought assessment. Capital Publishing Company, co-published by Springer Science + Business. 2009.
- NICHOL, J. E., ABBAS, S. Integration of remote sensing datasets for local scale assessment and prediction of drought. **Science of the Total Environment** 505, 5p. 03-507. 2015.
- OBERMAIER, M. **Velhos e Novos dilemas nos sertões: Mudanças Climáticas, Vulnerabilidade e Adaptação no Semiárido Brasileiro**. (Tese de doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2011.
- PALMER, W.C. **Meteorological drought**. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Washington, DC. 1965.
- PALMER, W.C. Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new Crop Moisture Index. *Weatherwise*. 21, p. 156 – 161. 1968.
- PETERS, A.J., WALTER-SHEA, JII, E. A., VINA, A., HAYES, M., SVOBODA, M. D. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** 68 (1), p. 71-75. 2002.
- PHILIPPON, N., MOUGIN, E., JARLAN, L., FRISON, P.-L. Analysis of the linkages between rainfall and land surface conditions in the West African monsoon trough CMAP, ERS-WSC, and NOAA-AVHRR data. **Journal of Geophysical Research**., 110, D24115, doi:10.1029/2005JD006394. 2005.
- RHEE, J., IM, J., CARBONE, G.J. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. **Remote Sensing of Environment**. 114, p.2875–2887. 2010.
- ROSSATO, L.; ALVALA, R. C. S.;

- TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 19, 2, p. 113-122, 2004.
- ROSSATO, L., TOMASELLA, J., ALVALÁ, R.C.S., Avaliação da Umidade do Solo no Brasil durante o Episódio El Niño (1982/83). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria. 13 (1), p. 143-153. 2005.
- 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** 79, p. 213–224. 2002.
- SAUSEN, T. M., LACRUZ, M. S. P. **Sensoriamento remoto para desastres**. Editora Oficina de textos. 2015.
- SHAFER, B.A., DEZMAN, L.E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: **Proceedings of the Western Snow Conference, Fort Collins, CO**, p. 164 – 175. 1982.
- SHAHABFAR, A., GHULAM, A., CONRAD, C. Understanding hydrological repartitioning and shifts in drought regimes in Central and South-West Asia using MODIS derived perpendicular drought index and TRMM data. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing** 7, p. 1–11. 2013.
- SON, N.T., CHEN, C.F., CHEN, C.R., CHANG, L.Y., MINH, V.Q. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** 18, p. 417–427. 2012.
- STEINMANN A.C., HAYES M.J., CALVALCANTI L.F.N. Drought indicators and triggers. Chapter 4. In:
- THIRUVENGADACHARI, S., GOPALKRISHNA, H.R. An integrated PC environment for assessment of drought. **International Journal of Remote Sensing** 14, p. 3201–3208. 1993.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M.G., ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**. J. 64, p. 327-338. 2000.
- TUCKER, C. J. & CHOUDHURY, B. J., 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. **Remote Sensing of Environment** 23, p. 243-251.
- TUCKER, C. J. Comparing SMMR and AVHRR data for drought monitoring. **International Journal of Remote Sensing** 10, p. 1663–1672. 1989.
- VAN GENUCHTEN, M.T. VAN. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal** v.44, p.892-898, 1980.
- VIEIRA, R. M. S. P., CUNHA, A. P. M. A., ALVALÁ, R. C. S., CARVALHO, V. C., FERRAZ NETO, S., SESTINI, M. F. Land use and land cover map of a semiarid region of Brazil for meteorological and climatic models, **Revista Brasileira de Meteorologia** 28, p. 129–138. 2013.
- WAN, Z., ZHANG, Y., ZHANG, Q., LI, Z. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature, **International Journal of Remote Sensing**. 25, p. 261-274. 2004.
- WILHITE, D.A., GLANTZ, M.H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. **Water International** 10 (3), p. 111–120. 1985.
- WILHITE, D.A. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions (Chapter 1). In: D.A. Wilhite (ed.), **Drought: A Global Assessment (Volumes 1 and 2)**, Routledge Publishers, London. 2000.
- WILHITE, D. A. Drought monitoring as a component of drought preparedness planning—chapter 1, in IGLESIAS, A., GARROTE, L., CANCELLIERE, A., CUBILLO, F., WILHITE, D. (eds), **Coping with Drought Risk in Agriculture and Water Supply Systems, Advances in Natural and Technological Hazards Research** 26, Springer, ISBN 978-1-4020-9044-8, 3–19, 2009.

- YAGCI, A.L., DENG, M., DI, L., HAN, W., PENG, C. Vegetation index based technique for global agricultural drought monitoring,” Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on , vol., no., pp.137,141, 9-11 June 2011, doi: 10.1109/RAST.2011.5966808. 2011.
- YANG, W. & MERCHANT, J. W. Impacts of Upscaling Techniques on Land Cover Representation in Nebraska, USA. **GeoCarto International** 12 (1), p. 27-39. 1997.
- YANG, S., XU, Y., GAO, Y. Summer Drought Assessment Based on Vegetation Supply Water Index in Chongqing. **Advances in Intelligent Systems Research**. doi:10.2991/rsete.2013.231. 2013.
- ZHOU, L., ZHANG, J., WU, J., ZHAO, L., LIU, M., LÜ, A., WU, Z. Comparison of remote sensed and meteorological data derived drought indices in Mid-Eastern China. **International Journal of Remote Sensing** 33, p. 1755–1779. 2012.