

Bibliographic Review

Monitoramento remoto de plantas submetidas à condição de seca

Resumo

Renato Herrig Furlanetto ¹
Camila Rocco da Silva ²

A seca é um fenômeno natural complexo difícil de ser detectado, causa sérias consequências econômicas, ambientais e sociais. Devido ao desenvolvimento lento, sem início e fim distintos, causam mudanças no comportamento das plantas em nível morfológico, fisiológico e fenológico para poder sobreviver a tal condição. Estas mudanças podem ser detectadas por meio de técnicas do sensoriamento remoto. A detecção e até mesmo a quantificação baseia-se na diferença da reflectância da energia eletromagnética da luz que incide sob as plantas. As diferenças de reflectância podem ser obtidas por sensores, como os satélites de observação da terra, extraindo através da relação de diferentes comprimentos de onda, índices de vegetação que destacam a ocorrência do fenômeno de seca, podendo ser incorporados dados fenológicos e climatológicos, melhorando os resultados obtidos. O objetivo desta revisão é apresentar as características das plantas submetidas ao déficit hídrico, além de métodos disponíveis para o monitoramento remoto deste fenômeno, através do uso do sensoriamento remoto.

Palavras chave: Estresse hídrico; seca na agricultura; sensoriamento remoto; índices de vegetação.

Abstract

Remote monitoring of plants submitted to the drought condition

The drought is a complex natural phenomenon difficult to detect, cause serious economic, environmental and social consequences. Due to the development slow, without beginning and end known, cause changes in the behavior in level morphological, physiological and phenological to able to survive such a condition. These changes can be detected by techniques of remote sensing. The detection and quantification is based on difference in reflectance of the electromagnetic energy of the light that focuses under the plants. The differences in reflectance can be obtained by sensors, such as earth observation satellites, extracted through the relation of different wavelengths, vegetation index that shows the occurrence of the drought phenomenon and it can be incorporated phenological and climatological data, improving the results obtained. The objective of this review is to present the characteristics of plants when submitted to drought conditions, in addition methods to available for remote monitoring of this phenomenon, through the use of remote sensing.

Key words: Hydric stress; drought in agriculture; remote sensing; vegetation index.

Resumen

Monitoreo remoto de las plantas sometidas a la condición de sequía

La sequía es un fenómeno natural complejo difícil de detectar, causa serias consecuencias económicas, ambientales y sociales. Debido al desarrollo lento, sin inicio y fin distintos, causan cambios en el comportamiento de las plantas a nivel morfológico, fisiológico y fenológico como una forma de sobrevivir a tal condición. Estos cambios se pueden detectar mediante técnicas de detección remota. La detección e incluso la cuantificación es basada en la diferencia de la reflectancia de la energía electromagnética de la luz que incide en las plantas.

Received at: 09/04/2017

Accepted for publication at: 03/08/2017

¹ Eng. Agrônomo. Mestrando no Programa de Pós Graduação. Universidade Estadual de Maringá - UEM - Avenida. Colombo, 5790 - Zona 7, Maringá - PR, 87020-900. Email: renatohfurlanetto@hotmail.com

² Eng. Agrônoma. PPG. Programa de Pós Graduação. Universidade Estadual de Maringá - UEM - Avenida. Colombo, 5790 - Zona 7, Maringá - PR, 87020-900. Email: camila_rocco@uem.br

Las diferencias de reflectancia pueden ser obtenidas por sensores, como los satélites de observación de la tierra, extrayendo través de la relación de diferentes longitudes de onda, índices de vegetación que destacan la ocurrencia del fenómeno de sequía, pudiendo ser incorporados datos fenológicos y climatológicos, mejorando los resultados obtenidos. El objetivo de esta revisión es presentar las características de las plantas sometidas al déficit hídrico, además de métodos disponibles para el monitoreo remoto de este fenómeno, través del uso del sensoriamiento remoto.

Palabras clave: Estrés hídrico; sequía en la agricultura; detección remota; los índices de vegetación.

Introdução

A seca é um dos mais importantes estresses abióticos que as plantas podem ser submetidas, sendo considerado um fator extremamente limitante à produtividade (CARVALHO, 2008; SANTOS, 1998). Ramakrishana e Ravishankar (2011) apontam que a baixa disponibilidade de água no solo reduzida a níveis críticos e a perda de água contínua, devido a condições atmosféricas, propicia o fenômeno da seca.

As plantas de modo geral possuem capacidade de passar por períodos de seca sem comprometer o ciclo fenológico. Para suportar tais injúrias, as mesmas utilizam de mecanismos conhecidos como tolerância, escape, evasão e flexibilidade fenotípica, promovendo alterações como a melhoria na absorção de água, fechamento dos estômatos, síntese de hormônios sinalizadores, diminuição da perda de água por evapotranspiração, entre outras importantes alterações morfológicas e fisiológicas (HARB, 2010). Outras espécies mantêm-se inativas até que se tenha água novamente no ambiente, também há o aumento na produção de raízes para acesso a águas subterrâneas. Outras espécies se desenvolvem relativamente bem em condições de seca, tolerando os efeitos em ambientes áridos através da abertura de seus estômatos no período noturno (LAMBERS, 2008; TAIZ e ZEIGER, 2004).

A baixa perda de água em algumas espécies vegetais são características que conferem sobrevivência a maiorias das plantas de ambientes seco, tais mecanismos de sobrevivência foram desenvolvidos para que mesmo em condições de estresse hídrico essas espécies mantenham-se ativas. Salisbury e Ross (2012) asseguram que espécies suculentas são capazes de armazenar água por longos períodos, visto que a taxa transpiratória dessas plantas são extremamente menores quando comparadas às demais, ou seja, a perda de água é mínima, pois a abertura estomática na ausência de luminosidade apresenta transpiração menor do que

durante o período com luminosidade. Para Brodribb e Cochard (2009), a sobrevivência das plantas nos diversos ambientes necessita de equilíbrio entre a necessidade de água e de carbono para a fotossíntese.

Nos solos a variação da infiltração de água após precipitação ou irrigação é variável, tornando a umidade no perfil heterogênea (KAR, 2011; SANTOS, 1998). Nestas condições para economizar água as plantas respondem fisiologicamente diminuindo o consumo de água, como exemplo em regiões áridas, a taxa de crescimento nos períodos chuvosos é elevada para garantir o armazenamento de água durante o(s) período(s) de seca.

O uso do sensoriamiento remoto para o monitoramento do déficit hídrico em plantas através do uso de índices de vegetação torna-se uma ferramenta extremamente importante para ajudar as ações de manejo de culturas agrícolas. Devido às alterações morfológicas, bioquímicas e fisiológicas que ocorrem nas plantas, alterações nos índices de vegetações evidenciam a condição de deficiência hídrica sofrida. Estas alterações baseiam-se na radiação refletida do dossel foliar, onde o uso de determinadas bandas espectrais podem fornecer informações importantes para o monitoramento da seca. Deste modo, para obter um maior entedimento da utilização destas ferramentas no monitoramento remoto da seca, é necessário o conhecimento de algumas características fisiológicas das plantas e alguns fundamentos do sensoriamiento remoto, conforme será discutido nesta revisão.

O déficit hídrico e alterações morfológicas e fisiológicas nas plantas

O déficit hídrico nas plantas ocorre quando todo o conteúdo de água de um tecido ou célula se encontra abaixo da capacidade de maior estado de hidratação. Geralmente, ocorre quando a água disponível no solo é reduzida e as condições atmosféricas causam perda contínua de água por transpiração ou evaporação. Devido às condições

de estresse, ocorrem alterações no desenvolvimento e crescimento das plantas cuja severidade irá depender do genótipo, a duração e o estágio de desenvolvimento, podendo ser este efeito reversível ou irreversível (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Alterações morfológicas como a redução da área foliar pode ser considerada uma das primeiras reações das plantas contra o estresse hídrico, como forma de defesa tem-se uma redução do número de folhas, redução na taxa de crescimento dos ramos e maior abscisão foliar. Tal fato ocorre, pois o solo seco não pode fornecer nitrogênio suficiente para suprir as necessidades de crescimento da cultura sendo o nitrogênio do interior da planta translocado das folhas mais velhas para os pontos mais novos de crescimento. Esta característica atua como sendo uma forma de ajuste para a limitação de água, visto que as plantas necessitam manter uma área foliar suficiente para o desenvolvimento (WOLFE et al., 1988).

A expansão foliar é observada de acordo com o nível de estresse das plantas. Pantin et al. (2011) constatou que limitações hídricas severas resultaram em uma intensa redução da área foliar durante o dia, sendo que no período noturno permaneceram inalteradas. Em plantas bem supridas a expansão foliar pode ser limitada quando há competição por água entre as plantas, isto ocorre devido a maiores necessidades hídricas impostas para crescimento das mesmas. Machado et al. (2009) relataram que a restrição hídrica na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) tem reduzido a expansão foliar e o alongamento das folhas, o mesmo ocorre com o crescimento secundário de colmos. Stolf-Moreira et al. (2010) relata que a redução da área foliar em plantas de soja é responsável por diminuir a perda de água e consequentemente a área útil para realização da fotossíntese e assimilação de carbono.

Efeitos na produção de biomassa e fotossimilados também têm sido relatado por diversos pesquisadores. Pizzaro e Bisigato (2010) demonstraram que o estresse hídrico contribui para reduzir a biomassa total e o crescimento em plantas jovens de diferentes espécies, assim como alterações no desenvolvimento de estruturas morfológicas e reprodutivas como a redução no número e tamanho de flores, atraso no desenvolvimento de anteras, alongamento dos filamentos, deiscência e redução do número de sementes produzidas.

O estresse hídrico influencia severamente o aparato fotossintético, ocasionando a interrupção e desorganização das principais vias para realização

da fotofosforilação, sendo o transporte de elétrons, ciclo de redução do carbono, controle estomático os mais afetados devido à condição de estresse (ALLEN e ORT, 2001). Anjum et al. (2011a) relataram que o estresse hídrico no milho (*Zea mays*) proporcionou um declínio considerável na fotossíntese líquida, sendo de aproximadamente 33,22%, na taxa de transpiração em 37,84%, na condutância estomática (25,54%), na eficiência do uso da água (50,87%), na eficiência intrínseca no uso da água (11,58%) e concentração intercelular de CO₂ (5,86%), quando comparada a condições ideais de suprimento de água. Outra consequência é a possível alteração na eficiência das plantas em realizarem fotossíntese, tal condição acarreta na redução das atividades da enzima Rubisco e no processo de carboxilação, desta maneira o metabolismo e os processos fisiológicos são afetados podendo vir a reduzir a taxa de crescimento (XU et al., 2010).

Alguns estudos mostraram que a seca e o calor excessivo são responsáveis pela produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), aumentando a concentração destes compostos a um nível tóxico às plantas, pois as mesmas não conseguem metabolizar e neutralizar a toxicidade destas substâncias em altas concentrações nas células, resultando em danos oxidativos em proteínas, DNA, membranas e lipídios, podendo ocasionar a morte celular (APEL e HIRT, 2004). Ocorre também a degradação das moléculas de clorofilas, sendo que a presença destes pigmentos fotossintéticos é de extrema importância para a interceptação da luz e síntese de compostos com poder redutor, degradando às espécies reativas de oxigênio e outros compostos nocivos às plantas. Manivannan et al. (2007b) relataram que o estresse hídrico ocasionou diminuição no teor de clorofilas "a", "b" e total em diferentes variedades de girassol (*Helianthus annuus*). Resultados semelhantes foram observados em duas cultivares de azeitona (*Olea europaea*) submetidas às mesmas condições de deficiência, onde o conteúdo de clorofilas também foi reduzido, sendo estas reduções de 29 e 42% para cada cultivar, respectivamente (GUERFEL et al., 2009).

O transporte de água e íons também é afetado podendo influenciar na absorção de CO₂, consequentemente nas taxas de fotossíntese líquida e o crescimento celular. Com isso, as plantas passam a controlar a pressão de turgescência com o fechamento dos estômatos de forma que a transpiração decresça significativamente a fim de

perder o mínimo possível de água e manter suas atividades metabólicas (OSAKABE et al., 2014). Ocorre também o acúmulo ou a diminuição de metabólitos produzidos pelas plantas, promovendo alterações nas enzimas superoxidase dismutase, glutathione redutase, catalase e ascorbato peroxidase, na síntese de proteínas osmoprotetoras e à capacidade antioxidante, responsáveis ao aumento na tolerância à seca (VERSLUES et al., 2006; GRATÃO et al., 2005).

Além disso, o estresse hídrico proporciona a síntese de hormônios como ácido abscísico (ABA) e giberelina, nestas condições as raízes enviam sinais para a parte aérea e, através do fluxo ascendente, estes sinais codificam respostas fisiológicas e moleculares nas plantas, atuando como sinais para as plantas se adaptarem a períodos de estresses fisiológicos. O ácido abscísico (ABA) induz o fechamento estomático através da redução da pressão de turgor das células guardas, na qual é requerido um efluxo de K^+ e ânions, remoção de sacarose e conversão de malato em amido osmoticamente inativo (MACROBBIE, 1998).

Para NG et al. (2014) a concentração de ABA é determinada pelo equilíbrio de hormônio através da biossíntese, reações de catabolismo nas plantas e velocidade de transporte para os sítios de ação. Além disso, o ABA em plantas adultas atua de forma a permitir a sobrevivência em períodos de seca, em sementes e mudas as respostas fisiológicas estão direcionadas a evitar a germinação e paralisar o crescimento das plântulas. O crescimento do sistema radicular, mais especificamente o desenvolvimento de raízes laterais, pode ser inibido por altas concentrações de ABA, no entanto o mesmo não ocorre em raízes primárias quando submetida às baixas concentrações (XIONG et al., 2006).

A sinalização das plantas também é verificada através de alterações na concentração Ca^{2+} e produção de moléculas secundárias no interior das células (VERMA et al., 2016). Assim como o ABA, o etileno e ácido jasmônico são produzidos e respondem rapidamente ao estresse hídrico quando se encontram em determinados níveis, resultando em um diferente padrão de crescimento das plantas.

Segundo BOSCH et al. (2004), a síntese de etileno em níveis superiores reduz a fotossíntese, causa alterações na proteção antioxidante das plantas e reduzem a eficiência máxima da fase fotoquímica sob estresse hídrico. As enzimas nitrogenase e rubisco, por sua vez, são afetadas principalmente por se encontrarem em menor disponibilidade em períodos de seca excessiva.

No solo, durante o período de seca, o potencial hídrico decresce drasticamente e consequentemente ocasiona uma menor abertura das células guardas dos estômatos, a condutância estomática (gs), taxa de assimilação líquida, assim como o potencial hídrico, tendem a diminuir progressivamente quando há limitações de água no ambiente (TOMBESI et al., 2015; LAWER e TEZARA, 2009). Quando avaliado em condição de campo, o déficit hídrico ocorre de forma lenta sendo as alterações na condutância estomática (gs) praticamente imperceptível, no entanto o índice de área foliar mostra-se reduzido ao longo do período de seca como forma de sobrevivência. Lawer e Tezara (2009) afirmam que alterações na condutância estomática (gs) são devido às modificações no conteúdo médio de água na raiz e alterações no potencial osmótico, tais mudanças tornam o conteúdo de água nas folhas extremamente baixo, como consequência da falta de água, ocorre o processo de desidratação dos tecidos devido a perda de turgor das células, desta forma as plantas não têm capacidade de manter o processo de transpiração e fotossíntese (PIMENTEL, 2004).

Tolerância à seca e mecanismos de adaptabilidade

A tolerância à seca é definida como a capacidade de crescer, florescer e completar o ciclo biológico sendo que esta tolerância varia de acordo com a intensidade e duração do estresse hídrico, assim como o estágio de desenvolvimento também poderá definir como será a recuperação após este período. A tolerância é comum em praticamente todas as plantas, no entanto sua proporção varia de espécie para espécie. As plantas respondem, adaptam-se e sobrevivem em condição de seca através de alterações morfológicas, bioquímicas e fisiológicas, utilizando de mecanismo para suportar a condições de deficiência, como exemplo a tolerância, escape, evasão, flexibilidade fenotípica, entre outros.

O escape é um dos mecanismos mais comuns. É alcançado através da redução no ciclo de desenvolvimento das plantas permitindo que se reproduzam antes do ambiente tornar-se seco. O tempo de floração é um dos fatores mais importantes relacionado à adaptação da seca, onde um ciclo de vida curto pode levar o escape desta condição limitante, sendo esta característica determinada por fatores genotípicos e fenotípicos (ARAUS et al., 2002). No entanto, um dos efeitos desta alteração no ciclo de desenvolvimento é a redução no rendimento.

Lambers et al. (2008) afirmam que de acordo com a fenologia é possível evitar ou minimizar os danos causados pela seca, sendo que algumas espécies vegetais são capazes de perder ou manter a maior parte de suas folhas em situações de escassez de água.

A flexibilidade fenotípica por sua vez refere-se a alterações morfológicas em ramos, raízes e folhas, limitando o crescimento e expansão destes órgãos para reduzir a perda de água. Em nível morfológico, o ramo e a raiz são os mais afetados e ambos são os principais componentes da adaptação da planta à seca. As plantas geralmente limitam o número e a área foliar em resposta ao estresse, buscando reduzir a demanda de água ao custo da perda de rendimento (SCHUPPLER et al., 1998). Como as raízes são a única fonte para adquirir água do solo, o crescimento da raiz, sua densidade, proliferação e tamanho são respostas fundamentais das plantas ao estresse hídrico (KAVAR et al., 2008).

Por apresentarem capacidade em adaptar ao ambiente, as mesmas foram classificadas, com base na disponibilidade hídrica, em plantas xerófilas mesófilas e hidrófilas. As plantas caracterizadas como xerófilas vivem em ambientes extremamente áridos onde desenvolveram, ao longo do processo evolutivo, compartimentos e estruturas celulares capazes de armazenar água necessária para o crescimento e desenvolvimento, além de raízes superficiais, longas e profundas para absorver o máximo de água após um período chuvoso e também explorar o solo em uma maior profundidade com maior possibilidade em obter água.

As plantas mesófilas por sua vez são típicas de ambientes com condições adequadas de suprimento de água, suportam um período relativamente longo de seca, apresentam numerosas folhas com grande área foliar e são as plantas mais comumente encontradas. Por outro lado, as plantas classificadas como hidrófilas, são plantas onde o desenvolvimento e crescimento se dá somente em ambiente extremamente úmido sendo cessado caso ocorra à falta de água, podendo ocasionar a morte das plantas sob grande período de tempo em tal condição.

O desenvolvimento de pelos e tricomas é uma característica que ajuda a proteger as folhas da carga excessiva de calor. As folhas com elevado número de pelos reduzem a temperatura da folha e a transpiração (SANDQUIST e EHLERINGER, 2003). Sob alta temperatura e estresse por radiação, o pelo aumenta a reflectância da luz e minimiza a perda de água ao aumentar a resistência da camada limítrofe

ao movimento do vapor de água longe da superfície da folha.

Outra característica importante é a dormência em sementes de plantas. Este fenômeno é considerado um mecanismo de sobrevivência e perpetuação de espécies, pois as sementes somente germinarão se as condições do ambiente forem favoráveis à ocorrência de tal processo. Um bom exemplo são as sementes das espécies efêmeras do deserto, suas sementes mantêm-se dormentes e germinam somente quando há umidade no solo (SALISBURY e ROSS, 2012). Durante o período de maturação produzem pelo menos uma semente antes que a água do solo seja escassa. Segundo VERMA et al. (2016) a dormência em sementes tem fundamental importância para o atraso da germinação, em períodos de seca são importantes para manutenção das espécies, pois a probabilidade da sobrevivência através de mudas é mínima em condições de estresse abiótico.

O acúmulo de cera nas folhas como forma de evitar a perda de água é considerado uma estratégia evolutiva para as plantas, a presença de cutícula espessa dificulta a perda de água excessiva por transpiração sendo, portanto, um importante mecanismo de tolerância ao déficit hídrico (CASTRO, 2009).

Tendo conhecimento de algumas das alterações em nível morfológico, fisiológico e bioquímico que ocorre nas plantas quando submetidas ao déficit hídrico, torna-se possível mensurar estas alterações através da utilização de produtos de sensores remotos espectrais, identificando processos iniciais de deficiência hídrica e facilitando ações de manejo. Nos itens a seguir serão discutidos conceitos, definições e resultados de trabalhos científicos demonstrando o potencial de utilização de diferentes ferramentas do sensoriamento remoto no monitoramento da seca.

Sensoriamento remoto e o comportamento espectral da vegetação

O sensoriamento remoto pode ser definido como uma tecnologia na qual se adquire informações sobre alvos da superfície terrestre sem que haja contato físico com os mesmos (LILLESAND e KIEFER, 1994). Utiliza-se de sensores de forma conjunta, e equipamentos para o processamento de dados com a finalidade de estudar de forma analítica as interações entre a radiação eletromagnética e as diversas coberturas vegetais que compõem o globo terrestre (NOVO, 2010).

O uso de imagens de satélites é uma ferramenta que oferece amplas possibilidades de estudos em aplicações agrícolas, graças à sua cobertura sinóptica, rápida e repetitiva da superfície terrestre, constituí uma importante técnica para o monitoramento sistemático e dinâmico da vegetação. Apresenta-se como uma solução de baixo custo quando comparado às medições realizadas *in situ*, no entanto possui algumas desvantagens, como a necessidade de processamento para eliminar ruídos nas séries de dados e, em alguns casos, a necessidade de validar as informações com dados de campo.

Toda energia eletromagnética que incide sobre a vegetação é fracionada em três partes, ou seja, absorvida, transmitida e refletida. A magnitude de cada uma dessas partes depende da região do espectro eletromagnético. As quantidades de energia absorvida, transmitida e refletida pelas folhas das plantas podem diferir de uma espécie para outra ou até mesmo dentro da própria espécie, pois existem os fatores ambientais que influenciam direta ou indiretamente nesta interação (MOREIRA, 2011).

No mesófilo os pigmentos estão divididos em clorofilas (65%), carotenos (6%), xanofilas (29%) e antocianinas, a energia eletromagnética absorvida pelas folhas é espalhada em virtude das interações da radiação com as paredes celulares hidratadas, o que origina múltiplas reflexões e refrações, propiciando melhor absorção da radiação pelos pigmentos (KNIPLING, 1970). Devido às características dos mesmos, a absorção máxima de energia é maior no comprimento de onda de 453 a 643 nm para clorofila "b" e de 430 a 660 nm para clorofila "a", α - Caroteno de 420, 440 e 470 nm, β - Caroteno de 425, 450 e 480 nm, Xantofilas, Lutol 425, 445 e 475 nm, Violoxanto 425, 450 e 475 nm (ASSUNÇÃO et al., 1989; MOREIRA, 2011). Essa energia participa na síntese de compostos ricos em energia (fotossíntese), altera estruturas moleculares (fotoconversão), acelera reações, como a fotooxidação das xantofilas ou ainda destrói estruturas de uma molécula devido à formação de espécies oxidativas de oxigênio.

Na região do infravermelho próximo (700 a 1300 nm), o comportamento da radiação eletromagnética quanto à reflexão, transmissão e absorção é denominado pelas propriedades ópticas da folha, existe uma pequena absorção e considerável espalhamento interno que dependem das estruturas celulares do mesófilo. Nessa região espectral, a absorção é muito baixa (menos de 15%) e a reflectância pode chegar até 50% (TUCKER e

GARRATT, 1977). A Região do infravermelho médio (1300 a 3000 nm) caracteriza-se por um decréscimo da reflectância da vegetação, em razão da quantidade de água líquida presente na folha. A água absorve nos comprimentos de onda de 1400, 1900 e 2500 nm. Com isso, quanto maior a presença de água na folha, menor será a reflectância nessa faixa do espectro eletromagnético.

Dentre as regiões do espectro eletromagnético, o uso de índices de vegetações resultados de combinações lineares de dados de duas ou mais bandas espectrais são amplamente utilizadas para extrair informações como a atividade da vegetação, índice de área foliar, porcentagem de cobertura, teor de clorofila, biomassa, radiação fotossinteticamente ativa, monitoramento da estiagem e déficit hídrico das plantas, sendo utilizadas as bandas do vermelho e infravermelho próximo (JENSEN, 2009; RIPPLE, 1985; ROJAS, 2007).

Índices de vegetação no monitoramento da seca

Difícilmente o fenômeno de seca é detectado diretamente em uma imagem de satélites de observação da terra. Geralmente ele é identificado por meio de índices ou produtos que permitem integrar os dados para caracterizar a ocorrência de um fenômeno. Os sistemas de sensoriamento remoto mais utilizados para estudos da seca são: National Oceanic And Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer, (NOAA/AVHRR), o sensor Modis (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), a bordo dos satélites Terra e Aqua, o Landsat (Land Remote Sensing Satellite), o Spot/Vegetation e o IRS (Indian Remote Sensing).

Os índices de vegetação resultam de combinações lineares de dados espectrais, realçando o sinal da vegetação tendo como base a assinatura espectral em diferentes bandas do espectro eletromagnético, que minimizam as variações na irradiância solar e os efeitos do substrato do dossel vegetal (JACKSON e HUETE, 1991).

São encontrados mais de 80 índices de vegetação na literatura com objetivo de ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação ao solo e a outros alvos. Um dos índices de vegetação mais utilizados para análise das culturas agrícolas é o Normalized Difference Vegetation Index – NDVI proposto por Rouse (1973), sendo obtido a partir dos fatores de reflectância bidirecional das

bandas vermelho e infravermelho próximo. Possui a característica de minimizar os efeitos topográficos ao produzir resultado em uma escala linear de medida, variando de -1 a 1, onde valores negativos representam corpos d'água e nuvens, aqueles próximos de zero representam o solo exposto ou sem vegetação, e valores próximos de 1, representam a maior densidade de cobertura vegetal.

Segundo Rojas (2007) devido às propriedades da vegetação verde, o NDVI é um indicador da atividade fotossintética da planta. Dessa forma, parâmetros como estresse hídrico podem ser monitorados com êxito através da análise dos valores de tal índice.

Crusiol et al. (2012) destacam a boa eficiência do NDVI na diferenciação do comportamento espectral de diferentes cultivares de soja sob déficit hídrico, onde os autores demonstraram que plantas irrigadas apresentam NDVI muito superior às não irrigadas.

Ripple (1985) atribuíram o efeito secundário do conteúdo de água nas folhas às variações na concentração de clorofila e ao desarranjo nas estruturas internas destas. O pico de reflectância não ocorre mais no verde, ele caminha para a região do vermelho, aumentando a reflectância nessa faixa do espectro (PONZONI, 2001). Segundo os autores, a redução do conteúdo de clorofila nas folhas propicia menor absorção de energia na região do visível e, conseqüentemente, aumenta a reflectância nesta faixa espectral. Por outro lado, na região do infravermelho próximo, a reflectância aumenta em consequência de mudanças nas estruturas internas da folha. Porém, devido o NDVI ser baseado no espectro eletromagnético das bandas do vermelho e infravermelho próximo, na qual estão alocados a uma região de forte absorção pelas clorofilas e alta reflectância do dossel da vegetação, o NDVI representa clorofilas ao invés do conteúdo de água, sendo de uso limitado (GAMON et al., 1995; GAO, 1996). A limitação é devido à saturação quando a cobertura vegetal é densa. Outro problema é que o NDVI não considera os efeitos do solo, o que limita seu uso em situações onde o solo apresenta alta intensidade de brilho, interferindo na interpretação das condições da vegetação, também é sensível a ruídos aditivos como espalhamentos e absorções atmosféricas.

Buscando contornar este problema, Huete et al. (2002) propuseram o Enhanced Vegetation Index (EVI), baseado nas reflectâncias das bandas do

vermelho, azul e infravermelho próximo do espectro eletromagnético, utilizando de coeficientes que corrigem a influência dos aerossóis na banda da região espectral correspondente ao vermelho e um fator que faz o ajuste para compensar a radiação de fundo do dossel. Essa compensação deve ser feita porque a transmissão da radiação, correspondente às faixas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, através do dossel vegetal é diferente (KUNTSCHIK, 2004). De acordo com Song et al. (2013) trata-se de um índice muito utilizado para estudos de seca agrícola, pois melhora a sensibilidade em condições de elevada biomassa, o que reduz as influências do sinal de fundo do dossel e da atmosfera, além de ser mais sensível à estrutura do dossel (HUETE et al., 2002). Em situações de deficiência hídrica, a diferença entre as duas bandas diminui, o que causa queda no valor do índice. Pelo contrário, quando a vegetação está sadia são esperados valores altos do índice.

Sousa et al. (2011) realizaram um amplo trabalho no qual caracterizaram secas para toda a região sul do Brasil entre os anos de 2000 a 2009 por meio de dados do índice EVI provenientes do sensor MODIS presentes nos satélites Terra e Aqua. Os mesmos destacaram a potencialidade da metodologia no monitoramento de anomalias negativas de condição da vegetação, o que é grande indicativo de estiagem. Os autores concluíram também que os estados do Paraná e Rio Grande do Sul foram severamente castigados pela seca nos verões de 2005 e 2009.

Neste mesmo sentido, Silva et al. (2007) avaliaram três regiões do estado do Paraná compreendendo a mesorregião do oeste do estado, região norte do Paraná e região leste central, avaliando o efeito da estiagem na vegetação no período entre 23 de março de 2005 e 26 de junho de 2006, utilizando como base para este estudo dados do produto MOD13Q1, onde contém dois índices de vegetação, o EVI e NDVI do sensor MODIS. Os autores obtiveram boa correlação entre os índices NDVI e EVI durante o período de déficit hídrico nas regiões estudadas, sendo o NDVI com maiores oscilações durante o tempo, os autores concluíram que ambos os índices apresentam como um importante instrumento para o monitoramento das áreas afetadas pelas estiagens prolongadas.

Song et al. (2013) realizaram um estudo semelhante, porém, incorporando elementos de fenologia vegetal em suas análises e propondo uma metodologia que focasse nos impactos da seca

na vegetação do Mt. Kenya, na África. Para tal, utilizaram séries temporais de valores de EVI obtidos de imagens do MODIS e dados de precipitação de estações meteorológicas. Os autores concluíram que, com a utilização de métricas fenológicas associadas aos dados de precipitação, uma boa caracterização das anomalias na vegetação pôde ser alcançada.

Wagle et al. (2015) avaliaram a produtividade primária bruta de lavouras de soja sob diferentes níveis de manejo hídrico. Para tal, utilizaram índices de vegetação derivados do sensor MODIS, associando-os aos dados de fluxo de carbono estimados por uma torre de fluxo, obtendo resultados com desempenho satisfatório dos índices de vegetação em captar os efeitos da seca.

Outro índice importante no estudo da seca é o Normalized Difference Water Index (NDWI) proposto por GAO (1996), é um índice derivado das bandas do infravermelho (NIR) e infravermelho próximo (SWIR). A reflectância do infravermelho próximo (SWIR) reflete mudanças no conteúdo de água da vegetação e a estrutura do mesófilo esponjoso nos dosséis, enquanto a reflectância do infravermelho (NIR) é afetada pela estrutura interna das folhas e teor de matéria seca. A combinação de NIR com SWIR remove as variações induzidas pela estrutura interna das folhas e o teor de matéria seca das folhas, melhorando a precisão no resultado do conteúdo de água na vegetação (CECCATO et al., 2001). A quantidade de água disponível na estrutura interna da folha em grande parte controla a reflectância espectral no intervalo SWIR do espectro eletromagnético. A reflectância de SWIR é, portanto, negativamente relacionado com o conteúdo de água na folha, sendo sua utilização para monitoramento de seca e alerta precoce demonstrados em vários estudos (TUCKER, 1980).

De acordo com Gao (1996), o NDWI é um bom indicador para o conteúdo de água na vegetação, sendo os dados do sensor MODIS, calculando NDWI, utilizado para detectar e monitorar a condição de umidade do dossel da vegetação em grandes áreas (DELBART et al., 2005; JACKSON et al., 2005), além de sua importante característica de não saturação quando obtidos em áreas agrícolas com alto índice de área foliar, sendo muito utilizado na caracterização de seca agrícola (GU et al., 2008). Gu et al. (2007) observaram que os valores de NDWI apresentaram uma resposta mais rápida a condição de seca do que NDVI.

O fechamento dos estômatos quando as plantas estão submetidas à condição de deficiência

hídrica diminui o fluxo de calor latente o que traduz em uma redução substancial do índice de vegetação (BONIFACIO et al., 1993). Consequentemente, para manter o balanço de energia, haverá aumento do fluxo de calor sensível incorrendo em aumento de temperatura de superfície da folha (TANG e LI, 2014).

Deste modo, Epiphanyo et al. (1984) destaca a diferença de interação radiação-planta na faixa do infravermelho termal, verificando que plantas de soja sob déficit hídrico apresentam, em geral, temperaturas mais elevadas se comparadas àquelas com boa disponibilidade hídrica.

Dados da região do infravermelho termal podem ser adquiridos durante o dia e a noite e medem a energia emitida da superfície terrestre, a qual está relacionada com a temperatura de superfície e a emissividade dos materiais da superfície (ANYAMBA e TUCKER, 2012). Essa região espectral é utilizada para monitorar e detectar estresse na planta e também gerar índices que modelam o fluxo de calor sensível e latente. Esses índices estão relacionados com a temperatura de brilho e são utilizados no monitoramento da estiagem.

Os resultados destes estudos indicam o relacionamento dos eventos de seca nas vegetações com outros parâmetros para o monitoramento de áreas afetadas, a utilização de dados fonológicos e meteorológicos produzem resultados mais confiáveis, quando incorporados nos índices de vegetação para caracterização de eventos de seca na agricultura. Os satélites de observações da terra podem obter informações de forma direta por medições dos sensores. Em alguns casos, a obtenção desses dados na maneira convencional, isto é, por meio de estações meteorológicas, não é possível devido à amplitude das áreas e a falta de equipamentos para algumas regiões. Deste modo, o uso do sensoriamento remoto para a caracterização de seca na agricultura torna-se uma ferramenta de suma importância, produzindo resultados confiáveis, rápidos, cobrindo grandes áreas e principalmente a um custo relativamente baixo.

Conclusão

A seca é um fenômeno natural complexo, que causa sérias consequências ambientais, econômicas e sociais em todo o mundo. Trata-se de um fenômeno difícil de ser detectado nas plantas devido ao desenvolvimento lento, início e o fim indistintos e muitas vezes cobrindo áreas extensas.

As plantas respondem quando submetidas à condição de déficit hídrico, expressando mudanças a nível morfológico, fisiológico e fenológico, alterando rotas metabólicas, síntese de hormônios, produção de espécies tóxicas de metabólitos, redução da área foliar, teor de clorofila, entre outras importantes alterações. Estas mudanças devido à condição de estresse hídrico são passíveis de mensuração por meio de técnicas do sensoriamento remoto, através do uso de dados provenientes de diferentes sensores localizados em diversas plataformas, expressos por

índices de vegetação.

Deste modo, conhecendo as respostas das plantas submetidas ao déficit hídrico, incorporando conhecimento de diferentes áreas da ciência, torna-se possível traçar estratégias para o planejamento e inserção de culturas agrícolas em determinada região com alta probabilidade de ocorrência de seca, bem como seu monitoramento, disponibilizando resultados mais confiáveis para explicar tal fenômeno de forma rápida, eficiente, em curto espaço de tempo, independente do tamanho da área em questão.

Referências

- ALLEN, D. J.; ORT, D. R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants. **Trends in Plant Science**, v.6, n.1, p.36-42, 2001.
- ANJUM, S. A.; WANG, L. C.; FAROOQ, M.; HUSSAIN, M.; XUE, L. L.; ZOU, C. M. Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v.197, n.3, p.177-185, 2011a.
- ANYAMBA, A.; TUCKER, C. J. Historical perspective of AVHRR NDVI and vegetation drought monitoring. **Remote Sensing of Drought**. 1 ed. Innovative Monitoring Approaches, 2012. p.23-50.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: Metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annual Review of Plant Biology**, v.55, p.373-399, 2004.
- ARAUS, J. L.; SLAFER, A. G.; REYNOLDS, M. P.; ROYI, C. Plant Breeding and Drought in C3 Cereals: What Should We Breed For?. **Annals of botany**, v. 89, p.925-940, 2002.
- ASSUNÇÃO, G. V.; FORMAGGIO, A. R.; ALVES, A. R. **Mapa de aptidão agrícola das terras e uso adequado das terras: uma abordagem usando SGI e imagens de satélite**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Manaus, 1990, p.162-166.
- BAYARJARGAL, Y.; KARNIELI, A.; BAYASGALAN, M.; KHUDULMUR, S.; GANDUSH C.; TUCKER C. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.105, n.1, p.9-22, 2006.
- BONIFACIO, R.; DUGDALE, G.; MILFORD, J. R. Sahelian rangeland production in relation to rainfall estimates from METEOSAT. **International Journal of Remote Sensing**, vol.14, n.14, p. 2695-2711, 1993.
- BOSCH, S. M.; PEÑUELAS, J.; ASENSIO, D.; LIUSIA, J. Airborne Ethylene May Alter Antioxidant Protection and Reduce Tolerance of Holm Oak to Heat and Drought Stress. **Plant Physiology**, v.136, n.2, p.2937- 2947, 2004.
- BRODRIBB, T. J.; COCHARD, H. Hydraulic Failure Defines the Recovery and Point of Death in Water-Stressed Conifers. **Plant Physiology**, v.149, n.1, p.575-584, 2009.
- CARVALHO, M. H. Drought stress and reactive oxygen species production, scavenging and signaling. **Plant Signaling & Behavior**, v.3, n.3, p.156-165, 2008.
- CASTRO, E. M.; PEREIRA, F. J.; PAIVA, R. **Histologia Vegetal: Estrutura e Função de Órgãos Vegetativos**. Lavras: UFLA, 234p., 2009.
- CECCATO, P.; FLASSE, S.; TARANTOLA, S.; JACQUEMOND, S.; GREGOIRE, J. M. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, p. 22-33, 2001.

- CRUSIOL, L. G. T.; CARVALHO, J. F. C.; SIBALDELLI, R. N. R.; PROCÓPIO, S. O.; NEUMAIER, N.; NEPOMUCENO, A. L.; GUIMARÃES, F. C.; FARIAS, J. R. B. **Influência do horário das medições nos valores de NDVI**. In: VI Congresso Brasileiro de soja, Cuiabá, 2012, p.82.
- DELBART, N.; KERGOAT, L.; TOAN, T. L.; LHERMITTE, J.; PICARD, G. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p. 26-38, 2005.
- EPIPHANIO, J. C. N.; VALÉRIO, F. M.; VITORELLO I.; CARVALHO L. J. C. B. **Sensoriamento remoto termal na diferenciação de cultivares de soja (*Glycinemax* (L.) Merrill) submetidas ao déficit hídrico**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Rio de Janeiro 1984, p.613-621.
- GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; GOULDEN, M.; GRIFFIN, K.; HARTLEY, A.; JOEL, G.; PEÑUELAS, J.; VALENTINI, R. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthetic activity in three Californian vegetation types. **Ecological Application**, v.5, n.1, p. 28-41, 1995.
- 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.
- GU, Y.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P.; WARDLOW, B. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. **Geophysical Research Letters**, v.34, p. L06407, 2007.
- GU, Y.; HUNT, E.; WARDLOW, B.; BASARA, J. B.; BROWN, J. F.; VERDIN, J. P. Evaluation of MODIS NDVI and NDWI for vegetation drought monitoring using Oklahoma Mesonet soil moisture data. **Geophysical Research Letters**, v.35, p. L22401, 2008.
- GUERFEL, M.; BACCOUR, O.; BOUJNAH, D.; CHAIBI, W.; ZARROUK, M. Impacts of water stress on gas exchange water relations, chlorophyll content and leaf structure in the two main Tunisian olive (*Olea europaea* L.) cultivars. **Scientia Horticulturae**, v.119, n.3, p.257-263, 2009.
- GRATÃO, P. L.; POLLE, A.; LEA, P. J.; AZEVEDO, R. A. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. **Functional Plant Biology**, v.32, n.6, p.481-494, 2005.
- HARB, A.; KRISHNAN, A.; AMBAVARAM, M. R.; PEREIRA, A. Molecular and Physiological Analysis of Drought Stress in Arabidopsis Reveals Early Responses Leading to Acclimation in Plant Growth. **Plant Physiology**, v.154, n.3, p.1254-1271, 2010.
- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p.195-213, 2002.
- JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive Veterinary Medicine**, v.11, n.3-4, p.185-200, 1991.
- JACKSON, T. J.; CHEN, D.; COSH, M.; LI, F.; ANDERSON, M.; WALTHALL, C.; DORIASWAMY, P.; HUNT, E. R. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. **Remote Sensing of Environment**, v. 97, p.475-482, 2005.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres**. Parêntese Editora, São Paulo, 650 p., 2009.
- KAR, R. K. Plant responses to water stress: role of reactive oxygen species. **Plant Signaling & Behavior**, v.6, n.11, p.1741-1745, 2011.
- KAVAR, T.; MARAS, M.; KIDRIČ, M.; ŠUŠTAR-VOZLIČ, J.; MEGLIČ, V. Identification of genes involved in the response of leaves of *Phaseolus vulgaris* to drought stress. **Molecular Breeding**, v.21, n.2, p.159-172, 2008.
- KNIPLING, E. B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.1, n.3, p.155-159, 1970.
- KOGAN, F. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. **Advanced Space Research**, v.15, n.11, p.91-100, 1995.

- KUNTSCHIK, G. **Estimativa de biomassa vegetal lenhosa em cerrado por meio de sensoriamento remoto óptico e de radar**. 2004. 154 p. Tese (Doutorado em Ecologia) – Instituto de Biociências. Universidade de São Paulo – USP, São Paulo.
- LAMBERS, H.; CHAPIN III, F. S.; PONS, T. L. **Plant Physiological Ecology**. 2.ed. New York: Springer. 610p., 2008.
- LAWER, D. W.; TEZARA, W. Causes of decreased photosynthetic rate and metabolic capacity in water-deficient leaf cells: a critical evaluation of mechanisms and integration of processes. **Annals of Botany**, v.103, p.561-579, 2009.
- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- MACHADO, R. S.; RIBEIRO, R. V.; MARCHIORI P. E. R.; MACHADO D. F. S. P.; MACHADO E. C.; LANDELL M. G. A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1575-1582, 2009.
- MACROBBIE, E. A. C. Signal transduction and ion channels in guard cells. **The Royal Society**. v.353, p.1475-1488, 1998.
- MANIVANNAN, P.; JALEEL, C. A.; SANKAR, B.; KISHOREKUMAR, A.; SOMASUNDARAM, R.; LAKSHMANAN, G. M. A.; PANNEERSELVAM, R. Growth, biochemical modifications and proline metabolism in *Helianthus annuus* L. as induced by drought stress. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.59, n.2, p.141-149, 2007b.
- MOREIRA, A. M. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metologias de aplicação**. 4.ed. Viçosa, MG: UFV. 422p., 2011.
- NG, L. M.; MELCHER, K.; TEH, B. T.; XU, H. E. Abscisic acid perception and signaling: structural mechanisms and applications. **Acta Pharmacologica Sinica**, v.35, n.5, p.567-584, 2014.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4.ed. São Paulo - SP. Edgard Blucher, 388p., 2010.
- OSAKABE, Y.; OSAKABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L. S. P. Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, v.5, p.86, 2014.
- PANTIN, F.; SIMONNEAU, T.; ROLLAND, G.; DAUZAT, M.; MULLER, B. Control of leaf expansion: a developmental switch from metabolics to hydraulics. **Plant Physiology**, v.156, n.2, p.803-815, 2011.
- PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: Edur, 2004. 191p.
- PIZARRO, L. C.; BISIGATO, A. J. Allocation of biomass and photoassimilates in juvenile plants of six Patagonian species in response to five water supply regimes. **Annals of botany**, v.106, n.2, p.297-307, 2010.
- PONZONI, F. J. Comportamento espectral da vegetação. In: Meneses, PR., Madeira Neto, J. S. **Sensoriamento Remoto: reflectância de alvos naturais**. Brasília: Editora UnB/Embrapa Cerrados; 2001. p. 157-95.
- RAMAKRISHANA, A.; RAVISHANKAR, G. A. Influence of abiotic stress signals on secondary metabolites in plants. **Plant Signaling & Behavior**, v.6, n.11, p.1720-1731, 2011.
- RIPPLE, W. J. Spectral reflectance relationship to leaf water stress. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.52, n.10, p.1669-1675, 1985.
- ROJAS, O. Operational maize yield model development and validation based on remote sensing and agrometeorological data in Kenya. **International Journal of Remote Sensing**, v.28, n.17, p.3775-3793, 2007.
- ROUSE, J.; HAAS, R.; SCHELL, J. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation**. 1974. 164f. Tese (Doutorado) – Texas A & M University, Texas, United States.
- SALISBURY, F. B.; ROSS, C. W. **Fisiologia de plantas**. 4.ed. São Paulo: Cengage Learning, 774p., 2012.

- SANDQUIST, D. R.; EHLERINGER, J. R. Population - and family-level variation of brittlebush pubescence: its relation to drought and implications for selection in variable environments. **American Journal of Botany**, v.90, n.10, p.1481-1486, 2003.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológico e fisiológico das plantas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.287-294, 1998.
- SCHUPPLER, U.; HE, P. H.; JOHN, P. C. L.; MUNNS, R. Effect of water stress on Cdc2-like cell-cycle kinase activity in wheat leaves. **Plant Physiology**, v.117, n.2, p.667-678, 1998.
- SILVA, M. R.; RIBEIRO, M. G.; CENTENO J. A. S. **Monitoramento de estiagens com imagens MODIS**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, 2007. p. 6229-6236.
- SONG, Y.; NJOROGE, J. B.; MORIMOTO, Y. Drought impact assessment from monitoring the seasonality of vegetation condition using long-term time-series satellite images: a case study of Mt. Kenya region. **Environmental monitoring and assessment**, v.185, n.5, p.4117-4124, 2013.
- SOUSA, M. A.; SAUSEN, T. M.; LACRUZ, M. S. P. Monitoramento de estiagem na região sul do Brasil utilizando EVI/MODIS no período de Dezembro de 2000 a Junho de 2009. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011. p. 5901-5908.
- STOLF-MOREIRA, R.; MEDRI, M. E.; NEUMAIER, N.; LEMOS, N. G.; PIMENTA, J. A.; TOBITA, S.; BROGIN, R. L.; GUIMARÃES, M. F. C.; OLIVEIRA, M. C.; FARIAS, J. R.; ABDELNOOR, R. V.; NEPOMUCENO, A. L. Soybean physiology and gene expression during drought. **Genetics and Molecular Research**, v.9, n.4, p.1946-1956, 2010.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3.ed. Porto Alegre: Artmed, 786p., 2004.
- TANG, H.; LI, Z. L. Quantitative remote sensing in thermal infrared. **Remote Sensing/Photogrammetry**. 1 ed. Berlin, 2014. 298 p.
- TOMBESI, S.; NARDINI, A.; FRIONI, T.; SOCCOLINI, M.; ZADRA, C.; FARINELLI, D.; PONI, S.; PALLIOTTI, A. Stomatal closure is induced by hydraulic signals and maintained by ABA in drought-stressed grapevine. **Scientific Reports** 5, n.12449, 2015.
- TUCKER, C. J.; GARRATT, M. W. Leaf optical system modelled as a stochastic process. **Applied Optics**, v.16, n.3, p.635-642, 1977.
- TUCKER C. J. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. **Remote Sensing of Environment**, v.10, p.23-32, 1980.
- VERMA, V.; RAVINDRAN, P.; KUMAR, P. P. Plant hormone-mediated regulation of stress responses. **BMC Plant Biology**, p.16-86, 2016.
- VERSLUES, P. E.; AGARWAL, M.; KATIYAR-AGARWAL, S.; ZHU, J.; ZHU, J. K. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v.45, n.4, p.523-539, 2006.
- WAGLE, P.; XIAO, X.; SUYKER, A. E. Estimation and analysis of gross primary production of soybean under various management practices and drought conditions. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 99, p.70-83, 2015.
- WOLFE, D. W.; HENDERSON, D. W.; HSIAO, T. C.; ALVINO, A. Interactive Water and Nitrogen Effects on Senescence of Maize. II. Photosynthetic Decline and Longevity of Individual Leaves. **Agronomy Journal**, v.80, n.6, p.865-870, 1987.
- XIONG, L.; WANG, R. G.; MAO, G.; KOCZAN, J. M. Identification of Drought Tolerance Determinants by Genetic Analysis of Root Response to Drought Stress and Abscisic Acid. **Plant Physiology**, v.142, n.3, p.1065-1074, 2006.
- XU, Z.; ZHOU, G.; SHIMIZU, H. Plant responses to drought and rewatering. **Plant Signaling & Behavior**, v.5, n.6, p.649-654, 2010.