Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Estimativas do Teor de Clorofila do Mangue da Baía de Vitória (ES) por meio de Dados Hiperspectrais

Elizabeth Dell'Orto e Silva¹, Monica Maria Pereira Tognella³ Alexandre Candido Xavier, Gabriela Carvalho Zamprogno² Sávila Soares Pascoalini¹, ..

¹Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Rodovia ES-10 565, - Aracruz - ES, Brasil. (27) 3145-380. Autor correspondente: (lisadellorto@gmail.com). ²Pós-doutoranda do Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo. ³Professora PhD do Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo.

Artigo recebido em 11/07/2019 e aceito em 16/12/2019

RESUMO

O teor de clorofila indica a saúde geral da vegetação, e alterações no conteúdo do pigmento da folha podem ter uma relação direta com mudanças na resposta espectral da folha. O objetivo deste estudo é estimar o conteúdo de clorofila do manguezal da Baía de Vitória (ES) por meio de dados hiperspectrais. Foi analisado o comportamento espectral de duas espécies de mangue; *R. mangle* e *L. racemosa* utilizando um espectrorradiômetro, e realizadas medidas em campo dos índices de clorofila a, b e total a partir de um medidor eletrônico ClorofiLOG CFL-1030 (Falker). Os índices de clorofila das duas espécies de mangue foram correlacionados com os índices espectrais obtidos por meio de álgebra de bandas ($\lambda_1 + \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2$), com a máxima reflectância da borda do vermelho (*red edge*) e bandas espectrais estreitas (350 nm a 2500 nm). Os índices criados a partir das bandas (391nm e 396nm) e (736nm e 821nm) apresentaram os maiores coeficientes de determinação quando correlacionados à clorofila a (r^2 0,72) e clorofila b (r^2 0,77) para a espécie *L. racemosa*. Para a espécie *R. mangle*, não foi possível identificar uma banda estreita ou um índice espectral que apresentasse alta correlação com os índices de clorofila a, b ou total. Os resultados apontam para a necessidade de uma caracterização detalhada das condições ambientais e biofísicas do bosque de mangue para obtenção de modelos de regressão precisos e específicos para cada espécie em particular

Palavras-chave: Clorofila a, b e total, análise hiperspectral, borda do vermelho, índice espectral.

Estimates of Vitoria Bay Mangrove (ES) Chlorophyll Content by Hyperspectral Data

ABSTRACT

The chlorophyll content may indicate the general health of the vegetation, and alterations in the content of the leaf pigment may have a direct relation with changes in the spectral response of the leaf. The objective of this study is to estimate the chlorophyll content of the Vitória Bay mangrove (ES) by means hyperspectral data. The spectral behavior of two mangrove species was analyzed; *R. mangle* and *L. racemosa* using a spectroradiometer, and field measurements of chlorophyll indices were performed with a ClorofiLOG CFL-1030 (Falker) electronic meter. The chlorophyll indices of the two mangrove species were correlated with the spectral indices obtained by means of band algebra ($\lambda_1 + \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2$), and with the maximum red edge reflectance and narrow spectral bands (350 nm at 2500 nm). The indices created from the bands (391nm and 396nm) and (736nm and 821nm) presented the highest coefficients of determination when correlated to chlorophyll a (r^2 0.72) and chlorophyll b (r^2 0.77) for *L. racemosa*. For the *R. mangle* species, it was not possible to identify a narrow band or a spectral index that showed high correlation with the indexes of chlorophyll a, b or total. The results point to the need to characterize in more detail the environmental conditions, as well as the biophysical conditions of the mangrove forest to obtain accurate and specific regression models for each species. Keywords: radiation, net radiation, photosynthetically active radiation, Caatinga, dry.

Key words: Chlorophyll a, b and total, hyperspectral analysis, red edge, spectral index.

Introdução

O sensoriamento remoto é uma ferramenta importante ao estudo do manguezal devido sua

capacidade em fornecer informações espaciais e temporais sobre a distribuição e diferenciação das espécies, detecção de mudanças fisiológicas, entre

outras. Tais estudos podem ser baseados em diferentes sensores que fornecem produtos, como a fotografia aérea, imagens ópticas de alta e média resolução, dados hiperespectrais, e dados de microondas ativos (Kuenzer et al., 2011).

Segundo Zhang et al. (2014), sensores orbitais óticos multiespectrais embarcados em satélites, como Landsat, QuickBird, IKONOS, e dados de radar imageador de abertura sintética, como Radarsat e ENVISAT, foram aplicados com sucesso no estudo de manguezais. Estes estudos mostram que os dados de sensoriamento remoto podem ser usados para mapear manguezais com base em medições qualitativas, bem como estimar mudanças na densidade da folha (e.g Índice de Área Foliar). No entanto, foram encontrados poucos estudos que examinassem as relações entre o conteúdo de pigmentos foliares e a variação nas respostas espectrais dentro de espécies individuais de manguezais.

Segundo Sinha (1987), o conhecimento e a compreensão prévia sobre as características de absorção e refletância do objeto de estudo, assim como os parâmetros que os influenciam, permitem interpretar os dados de sensoriamento remoto de maneira mais significativa e precisa. O estudo de assinaturas espectrais fornece a opção de selecionar as bandas espectrais ou larguras de banda, e selecionar o tipo de sensor mais adequado para o estudo específico.

Nos últimos anos, métodos para estimar o conteúdo de clorofila a partir de dados hiperespectrais melhoraram consideravelmente. O teor de clorofila é geralmente estimado usando análise de regressão, modelagem física e dados espectrais. Este último é amplamente utilizado, pois os mecanismos físicos são considerados na construção do índice e utilizam apenas uma banda estreita de observação (Dou et al., 2018).

Segundo Zhang et al. (2012), pigmentos de folhas, principalmente clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) e carotenóides, são compostos significativos responsáveis pela fotossíntese, dissipação de radiação luminosa e outras funções biológicas. Além disso, a variação na quantidade desses pigmentos pode ser indicativa de mudanças no desenvolvimento estrutural, no processo de senescência, ou até mesmo de estresse.

O teor de clorofila foliar e a concentração de nitrogênio são importantes bioindicadores de fisiologia vegetal e desempenham papéis-chave no processo de fotossíntese (Lichtenthaler, 1998).

Segundo Fillela et al. (1995), a quantidade de radiação solar absorvida por uma folha depende das concentrações foliares dos pigmentos fotossintéticos e, portanto, baixas concentrações de clorofilas podem limitar diretamente a atividade

fotossintética e, portanto, a produção primária. A quantificação dessas proporções pode fornecer informações importantes sobre as relações entre plantas e seu ambiente.

A região espectral da borda vermelha (680 a 780nm) é afetada por parâmetros bioquímicos e biofísicos, e tem sido usada como um meio para estimar o teor foliar de clorofila ou nitrogênio de plantas (Skidmore & Cho, 2005).

Dou et al. (2018) usaram dados hiperespectrais para desenvolverem um modelo de regressão utilizando a região da borda do vermelho. Nesse sentido, estimaram o conteúdo de clorofila em um manguezal em Quanzhou, China. Já Pastor-Guzman (2015) utilizou imagens do Satélite Landsat 8, e concluiu que os índices espectrais criados por meio de álgebras de bandas em torno da borda do vermelho são mais sensíveis à concentração de clorofila.

Kuenzer et al. (2011) analisaram dados espectrais de duas espécies de mangue no Vietnã, e mostraram que elas diferem devido às suas principais propriedades biofísicas e químicas, como conteúdo de água, celulose e lignina e de proteínas, bem como dos principais pigmentos foliares, isto é, clorofila a e b e carotenóides. O sinal de resposta espectral também depende da estrutura interna da folha, composta principalmente de parênquima paliçádico e ou esponjoso, que irão compor o mesófilo foliar, assim como o número de camadas celulares, de espaços intercelulares e interfaces ar-água e o tamanho das células.

Garbulsky et al. (2011) afirmam que os ecossistemas possuem propriedades bioquímicas e biofísicas que nos permitem explorar seu comportamento fotossintético, aparentemente complexo, usando métodos ópticos relativamente simples. Entretanto, entender a ecofisiologia que rege essas respostas continua sendo o principal desafio das pesquisas nessa área.

Sendo assim, o objetivo principal deste trabalho é obter um modelo preditor para estimativas do teor de clorofila a, b e total das espécies *R. mangle* e *L. racemosa* utilizando dados hiperespectrais.

Material e métodos

O manguezal da Baía de Vitória (ES) abrange os municípios de Vila Velha, Cariacica, Serra e Vitória, com área aproximada de 28,7 km² (IEMA, 2018). As estações de estudo localizam-se no município de Cariacica e foram denominadas de Santa Maria, Areia Branca, Porto de Santana e Porto Novo (Figura 1). As duas primeiras estão localizadas próximas ao Bairro de Vila Cajueiro, a noroeste do canal da Baía de Vitória, e as outras duas estão localizadas a sudoeste.

Figura 1. Identificação das áreas de estudo (1 - Areia Branca; 2 - Santa Maria; 3 - Porto de Santana; e 4 - Porto Novo) localizadas no manguezal da Baía de Vitória, município de Cariacica (ES). Fonte: elaborado pela autora.

As medidas de clorofila *in situ*, bem como a coleta das folhas para a análise da reflectância em laboratório, foram realizadas em 32 parcelas (10 x 10 metros) estabelecidas em campo, e distribuídas nas quatro estações de estudo: Santa Maria, Areia Branca, Porto Santana e Porto Novo. A pesquisa de campo foi realizada em maio de 2016. O mês de maio foi um mês atípico, pois a precipitação média mensal (12,3mm) ficou muito abaixo da média histórica (INMET, 2018).

As coletas dos valores de Clorofila a (Chl *a*), Clorofila b (Chl *b*) e Clorofila Total (TChl = Chl *a* + Chl *b*) foram realizadas utilizando o medidor eletrônico ClorofiLOG CFL-1030 (Falker), que emprega fotodiodos emissores de três faixas de frequência de luz para obter o índice de pigmentos. Este equipamento emite luz dentro do espectro de absorção da clorofila ($\lambda = 635$ e 660nm) e do infravermelho ($\lambda = 880\text{nm}$) (Falker, 2008). Este último comprimento de onda serve como referência interna para avaliar a espessura da folha e o teor de água. Os dados produzidos vão gerar um índice, que é igual à absorbância da clorofila (Barbieri Junior et al., 2012). As leituras são realizadas com

emissão de luz e a resposta do sensor em torno de 2s, sendo a área ativa de recepção da folha de 9mm^2 e foliar de $50,3\text{mm}^2$.

Para cada árvore, foram medidas seis folhas (amostra) do segundo par foliar de cada ramo, consideradas como completamente expandidas; em cada folha foram feitas seis medições (réplicas). Não foi realizada medição de clorofila para a espécie *A. schaueriana*, pois esta espécie de mangue ocorre de forma pontual e isolada, inviabilizando a coleta de um número amostral representativo. Na estação de Santa Maria não foi realizada a medição de clorofila para a espécie *L. racemosa* por também não haver representatividade. Posteriormente, os dados foram digitados em uma planilha Microsoft Excel® e calculada a média dos valores do índice de clorofila *a*, *b* e total para cada árvore.

Para a análise hiperespectral, foram coletadas 6 folhas de cada indivíduo entre 30 e 40cm do ápice do ramo exposto ao sol, com características similares, utilizando os critérios para escolha das folhas: adultas, aspecto saudável e indivíduos de maior porte e volume de copa. Para

amostragem das folhas, foi empregada tesoura de poda aérea com haste telescópica (Marca Carpa). O horário de coleta ocorreu entre 09:00h e 11:00h em todas as áreas para padronização da informação. As folhas foram colocadas em sacos plásticos de cor preta, de modo que evitasse, assim, a degradação dos pigmentos fotossintéticos. As amostras foram identificadas por indivíduo de coleta e por parcela. Depois foram acondicionadas em caixa térmica com gelo para diminuição das atividades enzimáticas e perda do teor de água da folha, onde permaneceram até as 14:00h, quando se iniciou a captura da resposta espectral.

A reflectância foliar foi medida utilizando-se um espectrorradiômetro ASD FieldSpec® 3 JR (*Analytical Spectral Devices, Inc., EUA*). O intervalo de medição desse equipamento é de 350 a 2500nm, com uma resolução espectral de 1nm. Uma luz de halogênio de 50W foi usada como fonte de luz para essas medições internas. Cada amostra de reflectância foi medida com base em duas camadas de folhas de mangue, que foram empilhadas voltadas para cima em uma placa preta 30x30cm. O sensor *Plant Probe* foi montado acima da placa a uma distância de 30cm, com ângulo de visada de 25 graus. Para cada folha (amostra), foram obtidas três capturas (replicas). A cada quinze minutos foi realizada a calibração do instrumento com uso da placa de referência branca (Spectralon). Posteriormente, foi utilizado o aplicativo computacional *ViewSpec* para obter a média das curvas espectrais para cada árvore.

A análise Derivativa pelo método de extrapolação linear considera a posição do ponto de inflexão na região da borda vermelha (680 a 760 nm) da assinatura espectral, denominada de posição da borda vermelha (REP - *Red Edge Position*). Este comprimento de onda é afetado por parâmetros bioquímicos e biofísicos, que têm sido usados como um meio para estimar o teor foliar de clorofila ou nitrogênio (Cho; Skidmore, 2006).

O método utilizado para definição da borda do vermelho foi o da máxima primeira derivada do espectro de reflectância (Dawson; Curran, 1998). A Equação 1 usada para o cálculo da máxima primeira derivada do espectro de reflectância (FDR) é apresentada a seguir:

$$FDR_{(\lambda i)} = \frac{(R_{\lambda(j+1)} - R_{\lambda(j)})}{\Delta\lambda} \quad (1)$$

Onde,

FDR é a primeira derivada do espectro de reflectância para um comprimento de onda i ,

j e $j + 1$ é ponto médio entre as bandas,

$R_{\lambda(j)}$ é a reflectância do comprimento de onda j ,

$R_{\lambda(j+1)}$ é a reflectância no comprimento de onda $j + 1$,

e $\Delta\lambda$ é a diferença nos comprimentos de onda entre j e $j + 1$.

A Análise de Variância (ANOVA) é um teste de hipóteses de médias de duas ou mais amostras, e visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. Realizou-se ANOVA *one way* com os dados das variáveis ambientais (clorofila a, b e total) para detectar diferenças entre espécies (*R. mangle* e *L. racemosa*), e entre as quatro áreas de estudo.

Foi utilizada a técnica regressão linear simples para obtenção de modelos preditores do teor de clorofila a, b e total. Para isso foram realizadas análises de correlação uma a uma entre as variáveis dependentes (clorofila a, b e total) e as variáveis independentes (bandas individuais estreitas; 350 a 2500 nm, índice espectral de bandas estreitas $(\lambda_1 + \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2)$ e máxima reflectância da primeira derivada da borda do vermelho).

Resultados e discussão

As condições ambientais e fitossociológicas do manguezal estão diretamente relacionadas ao conteúdo do pigmento (clorofila a, b e total). Em relação às diferenças entre as espécies coletadas no manguezal da Baía de Vitória, as folhas de *L. racemosa* apresentaram um conteúdo global de clorofila ligeiramente maior em relação à *R. mangle* (Tabela 1). A espécie *L. racemosa* apresentou teores de clorofila total entre 53.98 mg/m² a 85.82 mg/m² com média geral de 68.80 mg/m², enquanto que a espécie *R. mangle* apresentou entre 54.14 mg/m² a 73.16 mg/m² e média geral de 65.44 mg/m². Embora, o teor de clorofila tenha variado entre as espécies, eles não apresentaram diferenças significativas ($p > 0.05$).

Tabela 1. Índices de clorofila (Chla, Clhb e Chl total) das espécies *R. mangle* e *L. racemosa*

Estação	Espécie	Clh a (mg/m ²)	Clh b (mg/m ²)	Clh total (mg/m ²)
Areia Branca	<i>L. racemosa</i>	42,91	21,23	64,02
Areia Branca	<i>R. mangle</i>	44	24,23	68,24
Porto Santana	<i>L. racemosa</i>	45,05	22,22	67,01
Porto Santana	<i>R. mangle</i>	44,47	20,3	64,78
Porto Novo	<i>L. racemosa</i>	47,14	25,5	72,64
Porto Novo	<i>R. mangle</i>	44,82	19,53	64,35
Santa Maria	<i>R. mangle</i>	42,9	22,27	65,17

As folhas de mangue exibem a curva de vegetação típica, com alta refletância no infravermelho próximo (NIR) e baixa refletância na região do visível e no comprimento de onda do infravermelho de onda curta (SWIR). A refletância na região visível é menor do que no NIR devido à absorção de clorofila e à dispersão da parede celular foliar, enquanto que a menor refletância nas regiões SWIR pode refletir mudanças no conteúdo de água das folhas (Zhang et al., 2012).

A Figura 2 apresenta a média do comportamento espectral de duas espécies de mangue, identificadas em quatro estações na Baía de Vitória. A espécie *R. mangle* apresentou maior refletância no comprimento de onda do infravermelho médio e maior absorção na região do vermelho, quando comparada à espécie *L. racemosa*.

Segundo Kuenzer et al. (2011), o sinal de resposta espectral também depende da estrutura interna da folha, composta principalmente de parênquima paliçádico e mesófilo esponjoso, assim como o número de camadas celulares,

espaços intercelulares, interfaces ar-água e tamanho das células.

Zhang et al. (2014), ao analisarem a resposta espectral do manguezal de Mazatlán (México), verificaram que as folhas de *R. mangle* possuem uma cor verde escura e, consequentemente, têm menor refletância na região verde do espectro. As folhas de *L. racemosa* possuem tipicamente uma cor verde brilhante e, por isso, maior refletância no espectro verde. Entre as duas espécies analisadas, a *R. mangle* apresentou valores consideravelmente mais altos na região de comprimento de onda NIR. Diferenças no valor de refletância na região do NIR se devem em parte à estrutura foliar interna (Lucena et al., 2011).

Silva (2012) analisou a resposta espectral das espécies *R. mangle*, *L. racemosa* e *A. schaueriana* no manguezal do estuário de Pernambuco (BR), e verificou que a espécie *R. mangle* apresentava valores de refletância no NIR entre 0,8 a 0,9, *A. schaueriana* teve sua média entre 0,78 e 0,85 enquanto que *L. racemosa* teve seus valores em média de 0,82. Na região do verde o comportamento das três espécies foi semelhante.

Figura 2. Reflectância média de duas espécies de mangue identificadas na Baía de Vitória. Fonte: elaborado pela autora.

Foram analisadas as curvas espectrais de *R. mangle* para as quatro estações (Figura 3), e, como pode ser observado, a absorbância na região do espectro azul e vermelho pelos constituintes

químicos e pigmentos fotossintetizantes são praticamente iguais. Na região do NIR, as curvas espectrais apresentam diferenças no valor de reflectância.

Figura 3. Reflectância média de *R. mangle* nas estações de Areia Branca (A_Branca), Porto Novo (P_Novo), Porto Santana (P_Santana) e Santa Maria (Sta_Maria). Fonte: elaborado pela autora.

A Figura 4 apresenta o gráfico das curvas espectrais da espécie *L. racemosa* de três estações. Na região do visível, o comprimento de onda do azul e vermelho é praticamente igual, com leve diferença no comprimento do verde. Na região do infravermelho próximo e médio as curvas

espectrais apresentaram diferenças, com destaque para a estação de Porto Novo. Na região do infravermelho médio a reflectância foliar pode sofrer interferências de outros componentes, como sal, açúcar, água, proteína, óleo, lignina, amido e celulose (Vaiphasa et al., 2005).

Figura 4. Reflectância média de *L. racemosa* nas estações de Areia Branca (A_Branca), Porto Novo (P_Novo) e Porto Santana (P_Santana). Fonte: elaborado pela autora.

Segundo Barton (2011), no comprimento de onda em torno de 531nm ocorre uma mudança sutil de reflectância como resultado do funcionamento do ciclo da xantofila. Ao incidir luz em uma folha, parte dessa energia pode ser usada no processo de fotossíntese, e outra parte dissipada para evitar danos ao aparelho fotossintético.

Outra região do espectro que pode apresentar diferentes respostas espectrais em decorrência de alterações dos pigmentos é a região denominada de borda do vermelho. Esta região representa uma mudança abrupta na reflectância foliar entre 680 e 780nm, causada pelos efeitos combinados da forte absorção de radiação por parte dos pigmentos de clorofila (Gates et al., 1965; Horler et al., 1983). Aumentos na quantidade de clorofila, por exemplo, resultam em alterações das principais características de absorção de clorofila centrada no comprimento de onda de 680nm (Buschmann e Nagel, 1993; Dawson e Curran, 1998).

A resposta espectral referente ao comprimento de onda 950nm (NIR) é controlada principalmente pelas paredes das células mesófilas

esponjosas, com folhas mais saudáveis, tendendo a ter uma maior reflectância no NIR, uma vez que refletem uma quantidade excessiva de energia de entrada nesta região do espectro eletromagnético. Em contraste, as folhas estressadas terão menor reflectância devido às mudanças na estrutura celular. O teor de água foliar é o principal determinante da reflectância na região SWIR (Zhang et al., 2012). Para a espécie *L. racemosa* houve alterações nas respostas espectrais nesse comprimento de onda (950nm). A estação de Porto Novo apresentou os menores valores de reflectância nos comprimentos de onda nas regiões NIR e SWIR.

A análise derivativa (Figura 5) destaca as maiores variações dos espectros de reflectância, e pode ser um bom método de diferenciação das espécies de mangue. As regiões do espectro eletromagnético com maiores variações na curva espectral estão relacionadas aos comprimentos de onda: 520nm (azul esverdeado), 710nm (borda do vermelho) e 950nm (NIR). Este resultado difere de outros trabalhos, como Wang e Souza (2009) e Flores-de-Santiago et al. (2012).

Figura 5. Primeira derivada da curva média de reflectância para duas espécies de mangue; *R. mangle* e *L. racemosa*. Fonte: elaborado pela autora.

Foi realizada uma análise de correlação linear uma a uma das variáveis dependentes (índices de clorofila a, b e total) versus variáveis independentes (bandas estreitas individuais; 350 a 2500 nm). Na figura 6a é possível observar que em relação à espécie *R. mangle*, o maior coeficiente de correlação positivo para clorofila a está centrado na banda 761nm ($r = 0,45$ $P < 0,05$ $r^2 = 0,19$). Os valores máximos dos coeficientes de correlação

foram negativos na região da borda do vermelho centrado em 716nm para a variável clorofila b ($r = 0,4$ $P < 0,05$ $r^2 = 0,14$). Em relação à espécie *L. racemosa* (Figura 6b) apresentou coeficiente negativo de correlação ($r = 0,7$ $P < 0,05$ $r^2 = 0,49$) na região do azul, centrado na banda 350nm para a variável clorofila a. Para a clorofila b, o coeficiente máximo de correlação também foi negativo na banda 713 nm ($r = 0,65$ $P < 0,05$ $r^2 = 0,42$).

Figura 6. Coeficientes de correlação (r) entre clorofila (a, b e total) versus reflectância da banda estreita individual (350nm a 2500nm) para as espécies *R. mangle* (Figura 6a) e *L. racemosa* (Figura 6b). Fonte: elaborado pela autora.

Foi obtida a reflectância máxima da primeira derivada na região da borda do vermelho (660 e 780nm) para a espécie *R. mangle* e para *L. racemosa*. Os valores de reflectância obtidos foram correlacionados com os valores de clorofila (a, b e total). Para a espécie *R. mangle*, as variáveis dependentes; Clorofila a, b e total foram correlacionadas uma a uma com a variável independente (reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho). Somente a correlação clorofila b versus reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho foi significativa e apresentou coeficiente de determinação de 0,2. Para a espécie *L. racemosa*, as variáveis dependentes Clorofilas a, b e total foram também correlacionadas uma a uma com a variável independente (reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho). A correlação clorofila b versus reflectância da máxima primeira derivada da borda do vermelho

foi significativa e apresentou coeficiente de determinação de 0,43.

Wu et al., (2018) sugeriram que os índices de vegetação podem ser úteis para extrair informação sobre pigmentos. Foi calculado o índice espectral de diferença normalizada ($\lambda_1 + \lambda_2 / \lambda_1 - \lambda_2$) utilizando bandas estreitas λ_1 (350nm a 2500 nm) e λ_2 (350nm a 2500nm). Os índices criados a partir das combinações das 2500 bandas foram correlacionados um a um às variáveis dependentes (clorofila a, b e total).

As bandas estreitas (λ_1 e λ_2) utilizadas no cálculo do índice de diferença normalizada, e que apresentaram o maior coeficiente de determinação quando correlacionadas com as variáveis biofísicas da espécie *L. racemosa* estão apresentadas na Figura 7. Os índices espectrais elaborados por meio das bandas 736nm e 821nm quando correlacionados com a clorofila b apresentaram os coeficientes de determinação 0,77 (Figura 7 b).

Figura 7. Gráfico de correlação linear entre clorofila a (*L. racemosa*) versus índice de vegetação (bandas 391nm e 396nm), à esquerda. Gráfico de correlação entre clorofila b (*L. racemosa*) versus índice de vegetação (bandas 736 e 821nm), à direita. Fonte: elaborado pela autora.

Não foi possível identificar para a espécie *R. mangle* uma banda altamente correlacionada com os valores de clorofila a, b e total. Isso sugere que os comprimentos de onda que possuem maior poder preditivo para explicar a variável clorofila estão sendo influenciados por condicionantes ambientais ou antrópicas que precisam ser melhor avaliadas. Uma destas interferências antrópicas podem estar relacionada ao material particulado, principalmente ferro particulado, proveniente de uma usina de mineração situada próxima ao manguezal.

Segundo Ong et al. (2003), o pó de minério causa uma forte interferência espectral nas folhas verdes. Portanto, podem ocorrer diferenças entre folhas limpas e empoeiradas. O óxido de ferro é caracterizado espectralmente por uma absorção ampla no comprimento de onda de 860nm.

As espécies de *R. mangle*, em sua maioria, estão localizadas na borda ou franja do mangue, seguindo um perfil transversal à linha de costa. Estas espécies formam um cinturão, enquanto a espécie *L. racemosa* está localizada no interior da floresta (mangue de bacia). Outro ponto foi o período da coleta, no mês de maio de 2016, em que os valores de precipitação média mensal (12mm) ficaram muito abaixo da média histórica para esse período (INMET, 2018). Os valores baixos de precipitação contribuíram para que as folhas estivessem empoeiradas.

A espessura da folha, o estresse hídrico e o excesso de níveis de salinidade são exemplos de interferências ambientais nos resultados. A variação sazonal do pigmento, especialmente nos manguezais antropizados, pode influenciar a

variabilidade das amostras e as propriedades ópticas das folhas (Flores-de-Santiago et al., 2013).

Conclusões

Foi examinada a relação entre o conteúdo de clorofila (a, b e total) e a reflectância espectral de duas espécies de mangue; *R. mangle* e *L. racemosa* em quatro estações no manguezal da Baía de Vitória. Na análise de regressão linear utilizaram-se os dados hiperespectrais, como a posição de borda vermelha, bandas espectrais estreitas e índices espectrais ($(\lambda_1 + \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2)$).

Foi possível obter modelos empíricos para estimativa do teor de clorofila a e b para a espécie de *L. racemosa* utilizando diferença normalizada das bandas estreitas. Nesta pesquisa os índices espectrais de diferença normalizada aumentaram a capacidade de predição.

As bandas 736 e 821nm compreendem a região da borda do vermelho (*red edge*) e Infravermelho-próximo respectivamente, e apresentaram uma capacidade ligeiramente mais forte de prever o teor de clorofila b.

Os resultados apontam para a necessidade de caracterizar mais detalhadamente as condições ambientais de cada área, principalmente em relação à espécie *R. mangle*, bem como as condições biofísicas do bosque para obtenção de modelos de regressão com melhor poder preditivo.

Para aplicação desse modelo empírico utilizando imagens de satélite é importante considerar outros fatores, como a característica do material de fundo (*background*), estrutura da copa, distribuição do ângulo da folha, tamanho da folha, formato da copa, altura do dossel, fechamento do dossel entre outros.

Agradecimentos

Financiamento: Esta pesquisa foi parcialmente financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil - Finance Code 001. A professora Mônica Tognella foi financiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), orçamento de pesquisa 385, subvenções nº 60127627/2012 e 263/2016).

Referências

Abraha, M.G., Savage, M.J., 2008. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations. *Agricultural and Forest Meteorology* 148, 401-416.

Assis, F.N., Mendez, M.E., 1989. Relação entre a radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 24, 797-800.

Baldochi, D.D., Valentini, R., Running, S., Oechels, W., Dahlman, R., 1996. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. *Global Change Biology* 2, 159-168.

Bat-Oyun, T., Shinoda, M., Tsubo, M., 2012. Effects of cloud, atmospheric water vapor, and dust on photosynthetically active radiation and total solar radiation in a Mongolian grassland. *Journal of Arid Land* 4, 349-356.

Castelletti, C.H.M., Silva, J.M.C., Tabarelli, M., Santos, A.M.M., 2004. Quanto ainda resta da Caatinga? uma estimativa preliminar. In: Silva, J.M.C., Tabarelli, M., Fonseca, M.T., Lins, L.V. (Orgs.), *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp. 91-100.

CPTEC. Centro de Previsões de Tempo e Estudos Climáticos, 2012. Disponível: <http://www.cptec.inpe.br>. Acesso: 03 set. 2014.

Cunha, A.P.M.do.A., Alvalá, R.C.dos.S., Oliveira, G.S., 2013. Impactos das mudanças de cobertura vegetal nos processos de superfície na região semiárida do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 28, 139-152.

EMBRAPA SEMIÁRIDO, 2013. Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido. Médias anuais da Estação Agrometeorológica de Bebedouro. Petrolina. Disponível: <http://www.cpatas.embrapa.br:8080/servicos/dados/met/ceb-anual.html>. Acesso: 17 ago. 2014.

Fontana, D.C., Alves, G.M., Roberti, D., Moraes, O. L.L., Gerhardt, A., 2012. Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela cultura da soja através de dados do sensor Modis. *Revista Bragantia* 71, 563-571.

Giambelluca, T.W., Scholz, F.O.G., Bucci, S.J., Meinzer, F.C., Goldstein, G., Hoffmann, W.A., Franco, A.C., Buchert, M.P., 2009. Evapotranspiration and energy balance of

- Brazilian savannas with contrasting tree density. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1365-1376.
- Gower, S.T., Kucharik, C.J., Norman, J.C., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, f PAR, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70, 29-51.
- Gutiérrez, A.P.A., Engle, N.L., Nys, E.D., Molejón, C., Martins, E.S., 2014. Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes* 3, 95-106.
- Jacovides, C.P., Tymvios, F.S., Asimakopoulou, K.L., Theofilou, K.M., Pashiardes, S., 2003. Global photosynthetically active radiation and its relationship with global solar radiation in the Eastern Mediterranean basin. *Theoretical and Applied Climatology* 74, 227-233.
- Kato, T., Tang, Y., Gub, S., Cui, X., Hirota, M., Du, M., Li, Y., Zhao, X., Oikawa, T., 2004. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 121-134.
- Krishnan, P., Meyers, T.P., Scott, R.L., Kennedy, L., Heur, M., 2012. Energy exchange and evapotranspiration over two temperate semi-arid grasslands in North America. *Agricultural and Forest Meteorology* 152, 31-44.
- Moura, M.S.B., Galvêncio, J.D., Brito, L.T.de., Souza, L.S.B.de., Sá, I.I.S., Silva, T.G.F.da., 2007. Clima e água de chuva no Semi-Árido. In: BRITO, L.T.L., Moura, M.S.B., Gama, G.F.B. (Orgs.). *Potencialidades da Água de Chuva no Semi-Árido Brasileiro*. 1 ed. Embrapa Semi-Árido, Petrolina, pp. 37-59.
- Müller, A.G., Bergamaschi, H., 2005. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 13, 27-33.
- Nobre, P., Melo, A.B.C., 2001. Variabilidade climática intrasazonal sobre o Nordeste do Brasil em 1998-2000. *Revista Climanalise*. Disponível: http://www6.cptec.inpe.br/revclima/revista/pdf/artigo_variabilidade_dez01.pdf. Acesso: 20 ago. 2014.
- Novick, K.A., Stoy, P.C., Katul, G.G., Ellsworth, D.S., Siqueira, M.S.B., Juang, J., Oren, R., 2004. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. *Oecologia* 138, 259-274.
- Oliveira, M.B.L., Santos, A.J.B., Manzi, A.O., Alvalá, R.C.S., Correia, M.F., Moura, M.S.B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21, 166-174.
- Paiva, C.M., 2005. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.C., 2002. *Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas*. Agropecuária, Guaíba.
- Querino, C.A.S., Moura, M.A.L., Querino, J.K.A.S.Q., Von Randow, C., Marques Filho, A.O., 2011. Estudo da radiação solar global e índice de transmissividade (kt) externo e interno, em uma floresta de mangue em alagoas – Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 26, 204-294.
- Radin, B., Bergamaschi, H., Junior, C.R., Barni, N.A., Matzenauer, R., Didoné, I.A., 2003. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38, 1017-1023.
- Rotenberg, E., Yakir, D., 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* 327, 451-454.
- Santos, S.de.A., Correia, M.de.F., Aragão, M.R.da.S., Silva, P.K.de.O., 2012. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de Caatinga. *Revista Brasileira de Geografia Física* 4, 761-773.
- Silva, B.B.da., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Determinação do albedo de áreas irrigadas com bas em imagens LANDSAT 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 13, 11-21.
- Silva, T.G.F.da., Moura, M.S.B., Zolnier, S., Soares, J. M., Souza, L.S.B.de., Brandão, E.O., 2011. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)* 15, 139-147.
- Silva, T.G.F., Zolnier, S., Moura, M.S.B., Souza, L.S.B., 2013. Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 621-634.
- Souza, P.J.deO.P.de., Rocha, E.J.P.da., Ribeiro, A., Souza, E.B.de., 2010. Radiation balance in a soybean ecosystem in the Amazon. *Revista Ciência Agronômica* 41, 582-592.
- Souza, A.P., Escobedo, J.F., 2013. Estimativas da radiação global incidente em superfícies

- inclinadas com base na razão de insolação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 8, 483-491.
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, N.D., Moura, M.S.B.de., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127.
- Varejão-Silva, M.A., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Versão digital, 2. ed. Recife.
- Wang, H., Jia, G., Fu, C., Feng, J., Zhao, T., Ma, Z., 2010. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment* 114, 2248-2258.
- Wang, H., Prentice, I.C., Davis, T.W., 2014. Biophysical constraints on gross primary production by the terrestrial biosphere. *Bogosciences* 11, 5987-6001.
- Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J.M., Chen, J., Davis, K., Desai, A.R.; Goldstein, A.H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A.E., Verma, S.B., 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* 114, 1416–1431.
- Zhang, X., Gu, S., Zhao, X., Cui, X., Zhao, L., Xu, S., Du, M., Jiang, S., Gao, Y., Ma, C., Tang, Y., 2010. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research* 115.