

Bathymetry mapping using VNREDSAT-1 image: A case study in Ninh Hai coast, Ninh Thuan province of Vietnam

Lau Va Khin^{*}, Tong Phuoc Hoang Son, Nguyen Huu Huan, Pham Ba Trung

Institute of Oceanography, VAST, Vietnam

*E-mail: khinlau@yahoo.com

Received: 30 July 2019; Accepted: 6 October 2019

©2019 Vietnam Academy of Science and Technology (VAST)

Abstract

Bathymetry mapping of coastal zones is one of the minimum requirements to serve related activities as marine management, transportation, construction and scientific application. However, the traditional method of direct measurement in the fields meets problems of time consuming, manpower and money. Applying remote sensing techniques to establish bathymetry in shallow water is an effective method to overcome the traditional problems. The objective of this study is to use VNREDSAT-1 data to map the bathymetry in a coastal region of Vietnam and Ninh Hai coast was selected as a case study in this research. The image was acquired on September 4th, 2013 and preprocessed through atmospheric correction using 6S model and sun glint removal by Hedley method. A total of 3,642 collected data points were divided into two parts, the first part of 2,810 points used to build up the model and the rest of 832 points for validation. The model used is based on multiple regression methods with four independent variables as four bands and a dependent variable as water depth. The results show that the models got high accuracy at the water depth from 10 m to 19 m with root mean square error of 1.03 m to 1.99 m and correlation coefficients of 0.72 to 0.74. This study demonstrates the capacity of VNREDSAT-1 in bathymetry mapping, and it would be an efficient tool for precisely mapping crude bathymetry in Vietnam.

Keywords: VNREDSAT-1, bathymetry mapping, multiple regression, Ninh Hai coast.

Ứng dụng ảnh VNREDSAT-1 để giải đoán phân bố độ sâu vùng nước nông cho vùng ven bờ Ninh Hải, tỉnh Ninh Thuận

Làu Và Khìn*, Tống Phước Hoàng Sơn, Nguyễn Hữu Huân, Phạm Bá Trung

Viện Hải dương học, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Việt Nam

*E-mail: khinlau@yahoo.com

Nhận bài: 30-7-2019; Chấp nhận đăng: 6-10-2019

Tóm tắt

Xây dựng bản đồ độ sâu vùng ven bờ là một trong những yêu cầu tối thiểu để phục vụ cho các hoạt động có liên quan trong khu vực như: quản lý, giao thông, xây dựng, nghiên cứu khoa học... Tuy nhiên, phương pháp truyền thống đo trực tiếp ở hiện trường thường rất tốn kém về thời gian, nhân lực và tài lực. Ứng dụng công nghệ viễn thám giải đoán phân bố độ sâu vùng nước nông là phương pháp hiệu quả để giảm thiểu tối đa các mặt hạn chế của phương pháp truyền thống. Mục tiêu của nghiên cứu này là sử dụng ảnh VNREDSAT-1 để giải đoán độ sâu vùng nước nông ven bờ Việt Nam, áp dụng cho vùng biển Ninh Hải, tỉnh Ninh Thuận. Ảnh VNREDSAT-1 mức 2A thu ngày 4 tháng 9 năm 2013 được hiệu chỉnh khí quyển bằng mô hình 6S và loại bỏ phản chiếu do mặt trời (sun glint) bằng phương pháp của Hedley. Dữ liệu đo sâu được thu thập vào tháng 4 năm 2015, gồm 3.642 điểm độ sâu. Bộ số liệu này được chia làm 2 phần độc lập, phần 1 gồm 2.810 điểm dùng xây dựng mô hình giải đoán. Phần còn lại gồm 832 điểm dùng để đánh giá độ chính xác. Mô hình giải đoán dựa trên phương pháp hồi qui đa biến, với 4 băng ảnh là biến độc lập và biến phụ thuộc là biến độ sâu. Kết quả nghiên cứu chỉ ra trong khoảng độ sâu từ 10 m đến 19 m có sai số trung bình bình phương (RMSE) thấp (từ 1,03 m đến 1,99 m) và hệ số tương quan (R^2) cao và ổn định (ở mức 0,73–0,74). Từ kết quả nghiên cứu cho thấy khả năng ứng dụng ảnh VNREDSAT-1 giải đoán độ sâu vùng nước nông là hiệu quả và hiện đại.

Từ khóa: VNREDSAT-1, hồi qui đa biến, độ sâu vùng nước nông, đo sâu, Ninh Hải.

MỞ ĐẦU

Trong các lãnh vực liên quan tới biển như giao thông hàng hải, xây dựng các công trình biển, nuôi trồng thủy sản, quản lý vùng bờ, trong nghiên cứu hải dương học, ... hầu hết đều cần bản đồ độ sâu phục vụ cho mục đích của mình. Tùy thuộc mức độ ứng dụng cần các sản phẩm bản đồ có tỉ lệ chi tiết khác nhau, trong giao thông hàng hải, xây dựng công trình cần các bản đồ có độ chi tiết và chính xác cao, trong khi đối với việc quản lý vùng bờ hay trong các nghiên cứu hải dương học có thể chỉ yêu cầu mức vừa phải hoặc thô. Trong bất kỳ trường hợp nào việc thành lập các bản đồ độ

sâu đều rất tốn thời gian và nhân lực. Vì theo phương pháp truyền thống, để xây dựng bản đồ độ sâu, người ta thường sử dụng các thiết bị đo sâu đo trực tiếp ở hiện trường. Tùy thuộc vào tỉ lệ bản đồ cần thành lập, về mặt lý thuyết, khoảng cách các điểm đo sâu phải nhỏ hơn đơn vị thực tế của tỉ lệ bản đồ đó. Ví dụ, để thành lập bản đồ địa hình tỉ lệ 1:50.000, thì khoảng cách giữa hai tuyến đo sâu liền kề ngoài thực địa không được lớn hơn 500 m (tương ứng 1 cm trên bản đồ), thậm chí, đối với vùng địa hình phức tạp thì mật độ tuyến đo sâu có thể tăng đến 2 lần. Điều này cho thấy công việc đo ngoài thực địa là rất lớn và cần rất

hiều kinh phí. Do đó, phương pháp đo ngoài hiện trường tuy có mang lại độ chính xác cao nhưng rất tốn kém, nhất là ở những vùng nước nông - nơi các tàu thuyền khó đi lại và yêu cầu thành lập bản đồ ở tỉ lệ lớn.

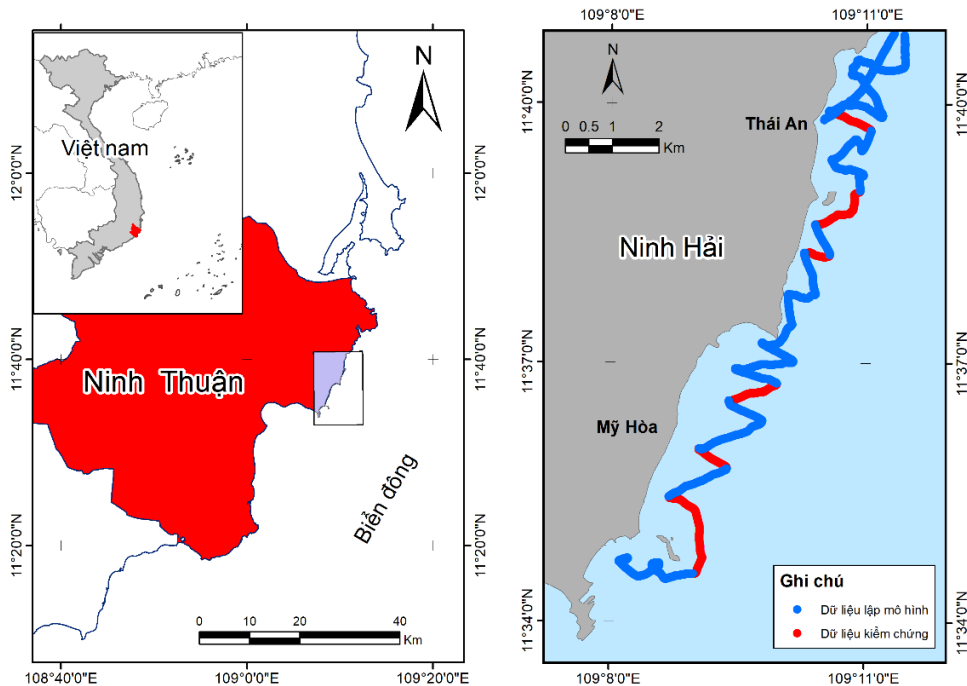
Từ lâu, việc ứng dụng ảnh viễn thám để thành lập bản đồ độ sâu vùng nước nông đã được quan tâm, Lyzenga năm 1978 đã đưa ra phương pháp giải đoán độ sâu dựa trên tính chất hấp thụ ánh sáng của từng bước sóng theo độ sâu và tính trên từng nền đáy khác nhau [1]. Sau đó năm 2006, cũng Lyzenga et al., tiếp tục cải tiến phương pháp bằng kỹ thuật loại phản chiếu do mặt trời (sun glint) với sai số trung bình bình phương (RMSE) là 2,3 m [2]. Gholamalifard et al., (2013) giải đoán độ sâu bằng ảnh Landsat 5. Các tác giả này sau khi thử nghiệm một số phương pháp khác nhau theo chỉ tiêu hệ số tương quan ($r = 0,94$), đã đưa ra đề nghị sử dụng phương pháp mạng Neural nhân tạo để giải đoán độ sâu [3]. Gần đây nhất, Pacheco et al., (2015) sử dụng phương pháp hồi qui tuyến tính trên tập dữ liệu độ sâu LiDAR (Light Detection and Ranging) và ảnh Landsat 8 và cho kết ở độ sâu 12 m với RMSE = 0,89 m [4]. Điều này cho thấy khả năng ứng dụng công

nghệ viễn thám cho công tác thành lập bản đồ độ sâu vùng nước nông là khả quan.

Hiện nay, với nhiều nguồn ảnh viễn thám có độ phân giải phổ rộng và độ phân giải không gian cao, sử dụng ảnh viễn thám để giải đoán phân bố độ sâu vùng nước nông là một phương pháp hiệu quả để giảm thiểu tối đa về thời gian, nhân lực và tài lực so với phương pháp truyền thống. Tháng 5 năm 2013, Việt Nam phóng thành công vệ tinh quan trắc trái đất đầu tiên mang tên VNREDSAT-1 với độ phân giải không gian 10 m cho 4 băng đa phổ và 2,5 m cho băng toàn sắc. Đây là nguồn tư liệu ảnh viễn thám hữu ích cho các ứng dụng thành lập bản đồ chuyên đề ở Việt Nam. Đặc biệt, ảnh VNREDSAT-1 với 4 băng đa phổ thì có 3 băng trong dải sóng nhìn thấy và 1 băng cận hồng ngoại, phù hợp cho các ứng dụng ven bờ. Vì vậy, mục tiêu của nghiên cứu này là sử dụng ảnh VNREDSAT-1 để giải đoán độ sâu vùng nước nông, áp dụng cho vùng biển Ninh Hải, tỉnh Ninh Thuận.

KHU VỰC VÀ TÀI LIỆU NGHIÊN CỨU

Khu vực nghiên cứu



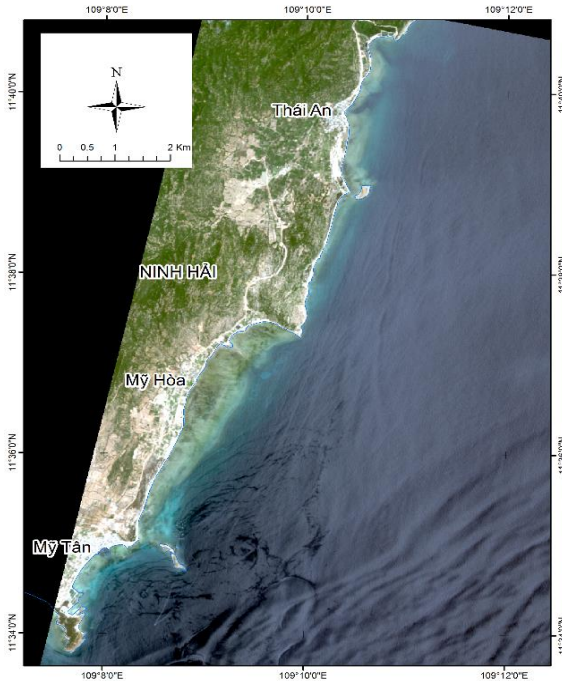
Hình 1. Vùng nghiên cứu và vị trí các điểm đo độ sâu (các điểm màu xanh dùng lập mô hình giải đoán độ sâu, các điểm màu đỏ dùng kiểm chứng mô hình độc lập)

Khu vực nghiên cứu là vùng biển huyện Ninh Hải có chiều dài khoảng 16 km, thuộc Vườn Quốc gia Núi Chúa tỉnh Ninh Thuận (hình 1). Đặc điểm địa hình khu vực này tương đối phức tạp với độ dốc cao. Tuy nhiên đây là vùng biển có độ trong suốt cao, phù hợp điều kiện áp dụng giải đoán phân bố độ sâu từ ảnh.

Tài liệu nghiên cứu

Tư liệu ảnh

Ảnh VNREDSAT-1, mức 2A chụp ngày 4 tháng 9 năm 2013 ở vùng ven biển Ninh Hải (hình 2). Ảnh gồm 4 băng, xanh lam (450–520 nm), xanh lá (530–600 nm), đỏ (620–690 nm) và băng cận hồng ngoại (760–890 nm) với độ phân giải không gian là 10 m (1 điểm ảnh = 10×10 m). Ảnh đã được hiệu chỉnh hình học trùng với thực tế ở hệ tọa độ UTM múi 49.



Hình 2. Ảnh VNREDSAT-1 tổ hợp màu Red, Green và Blue (RGB) mức 2 chụp ngày 4 tháng 9 năm 2013

Số liệu độ sâu

Tập số liệu đo sâu được thu thập vào tháng 4 năm 2015 bằng máy đo sâu hồi âm Lwance VP 1000. Số liệu sau khi xử lý gồm 3.642 điểm độ sâu ở hệ tọa độ UTM múi 49, phân bố ven bờ vùng biển Ninh Hải (hình 1), có độ sâu cực

đại là 38 m. Bộ số liệu này được chia làm 2 bộ số liệu độc lập, Bộ thứ nhất gồm 2.810 điểm dùng xây dựng mô hình bằng phương pháp hồi qui đa biến. Bộ còn lại gồm 832 điểm dùng để đánh giá độ chính xác của mô hình.

PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Ảnh VNREDSAT-1, mức 2A thực hiện tiền xử lý qua các bước sau: Đầu tiên ta đánh dấu vùng không tính (masking) tất cả những vùng không liên quan đến việc tìm độ sâu (như vùng đất liền, vùng có độ sâu nhỏ hơn 2 m). Sau đó chuyển đổi giá trị số (Digital Number) từ ảnh sang giá trị bức xạ (Radiance). Tiếp theo là thực hiện hiệu chỉnh khí quyển bằng mô hình 6S [5, 6]. Và bước cuối cùng thực hiện loại phản chiếu do mặt trời (sun glint) bằng phương pháp của Hedley [7].

Sau bước tiền xử lý ảnh, bước tiếp là xây dựng mô hình giải đoán độ sâu. Bộ số liệu 2.810 điểm dùng xây dựng mô hình được dùng để trích thông tin từ ảnh đã qua xử lý (4 băng). Bộ số liệu này được sắp xếp theo độ sâu. Việc xây dựng mô hình sẽ được thực hiện ở từng độ sâu khác nhau, tức là nếu ta có giá trị sâu nhất của bộ số liệu là 38 m, ta sẽ xây dựng mô hình trên các lớp độ sâu như sau: Lớp 1 từ 2 m đến 39 m, lớp 2 từ 2 m đến 38 m, lớp 3 từ 2 m đến 37 m, ... lớp cuối từ 2 m đến 5 m. Tương ứng ở mỗi mô hình của từng lớp sẽ được áp dụng và đánh giá độ tin cậy dựa trên sai số trung bình bình phương và hệ số tương quan trên bộ số liệu kiểm chứng độc lập.

Giải đoán độ sâu bằng viễn thám sẽ dựa trên cơ sở của mức độ suy giảm ánh sáng khác nhau của các bước sóng khi đi qua môi trường nước. Khi ánh sáng đi vào môi trường nước sẽ xảy ra hiện tượng khúc xạ theo định luật Snell, và cường độ ánh sáng sẽ bị chi phối bởi cột nước. Khi đó, cường độ ánh sáng ở độ sâu d (I_d) sẽ là $I_d = I_o \cdot e^{-pk}$, với I_o là cường độ ánh sáng tại bề mặt nước; p là độ dài ánh sáng đã đi trong nước và k là hệ số hấp thụ. Ánh sáng bước sóng dài số có hệ số hấp thụ lớn hơn ánh sáng ở bước sóng ngắn [8]. Như vậy, ở các bước sóng nhìn thấy đều có chứa thông tin độ sâu, tương ứng băng 1 (xanh lục), 2 (xanh lam) và 3 (đỏ) trong ảnh VNREDSAT-1. Băng 1 có thông tin sâu hơn băng 2 và 3. Với băng cận hồng ngoại (băng 4) chỉ chứa thông tin ở vùng

nước rất nông. Nên do đó, độ sâu sẽ được giải đoán bằng các dùng 4 băng làm 4 biến độc lập trong mô hình hồi qui đa biến với độ sâu là biến phụ thuộc.

Chuyển đổi giá trị DN sang giá trị bức xạ

Giá trị DN được chuyển sang giá trị bức xạ L ($W.sr^{-1}m^{-2} \mu m^{-1}$) theo công thức sau:

$$L_{\lambda} = \frac{DN_{\lambda}}{GAIN_{\lambda}} + BIAS_{\lambda} \quad (1)$$

Với: L : Bức xạ ($W.sr^{-1}m^{-2} \mu m^{-1}$) của băng trên ảnh VNREDSAT-1; DN : Giá trị số của của băng trên ảnh VNREDSAT-1; $GAIN$: Được cung cấp trong file metadata của ảnh VNREDSAT-1 (bảng 1); $BIAS$: Được cung cấp trong file metadata của ảnh VNREDSAT-1 (bảng 1).

Giá trị của $GAIN$ và $BIAS$ cho từng băng được lấy trong file metadata như sau:

Bảng 1. $GAIN$ và $BIAS$ cho từng băng ảnh VNREDSAT-1A mức 2 thu ngày 4/9/2013

Band name	$GAIN$	$BIAS$
Band 1 (485 nm)	1,6382548072236700e + 00	0,0
Band 2 (565 nm)	1,6213056650501201e + 00	0,0
Band 3 (655 nm)	1,8478962570830899e + 00	0,0
Band 4 (825 nm)	2,5112173640667201e + 00	0,0

Hiệu chỉnh khí quyển

Hiệu chỉnh khí quyển áp dụng mô hình 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum radiative transfer model) qua phương trình:

$$\rho_{\lambda} = \frac{y_{\lambda}}{1 + xc_{\lambda} * y_{\lambda}} \quad (2)$$

Với:

$$y_{\lambda} = xa_{\lambda} * L_{\lambda} - xb_{\lambda} \quad (3)$$

Trong đó: ρ_{λ} là phản xạ bề mặt đã được hiệu chỉnh khí quyển; L là bức xạ của băng thu được từ phương trình (1); xa_{λ} , xb_{λ} : Các hệ số lấy trong mô hình 6S với băng tương ứng.

Loại bỏ phản chiếu do mặt trời (sun glint)

Phương pháp loại bỏ phản chiếu do mặt trời được phát triển bởi Hochberg [9, 10] và sau đó được cải tiến bởi Hedley [7]. Phương pháp này giả định rằng băng cận hồng ngoại, ở bước sóng dài, nhanh chóng bị nước hấp thụ, nên có thể xem không bị ảnh hưởng bởi phản chiếu mặt trời. Trên cơ sở đó, để loại bỏ phản chiếu mặt trời ở các băng nhìn thấy sẽ được thực hiện qua công thức:

$$R'_{\lambda} = \rho_{\lambda} - b_{\lambda} (\rho_{nir} - Min_{nir}) \quad (4)$$

Với: R'_{λ} là phản xạ bề mặt đã loại bỏ phản chiếu do mặt trời; ρ_{λ} là phản xạ bề mặt từ phương trình (2); b_{λ} là hệ số góc giữa băng với băng hồng ngoại gần (NIR); ρ_{nir} là phản xạ bề mặt của băng hồng ngoại gần; Min_{nir} là giá trị phản xạ nhỏ nhất băng NIR vùng ít bị ảnh hưởng sự phản chiếu mặt trời.

Xây dựng mô hình hồi qui đa biến

Giả sử ta có hàm hồi qui bốn biến:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 \quad (5)$$

Với: y là biến độ sâu; x_1, x_2, x_3, x_4 là biến số tương ứng với băng 1, 2, 3 và 4 của ảnh VNREDSAT-1; a_0 : Hằng số điều chỉnh mô hình; a_1, a_2, a_3, a_4 là các hệ số điều chỉnh tương ứng của các băng 1, 2, 3 và 4.

Theo phương trình (5), để tìm độ sâu bất kỳ, ta cần phải có các hệ số điều chỉnh: a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 phù hợp. Vì ta đã có một số điểm độ sâu, để tìm 5 hệ số: a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ta cần ít nhất 6 phương trình, điều đó có nghĩa chỉ cần 6 điểm độ sâu để giải được bài toán này. Ở đây ta có 2.810 điểm độ sâu, như vậy hệ phương trình có tổng cộng là 2.810 phương trình. Giải hệ phương trình này bằng phương pháp bình phương tối thiểu ta sẽ có được các hệ số: a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 .

Sau khi có các hệ số: a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 , ta có thể áp dụng phương trình (5) lên ảnh để được bản đồ độ sâu. Từ bản đồ này, ta sẽ dùng bộ dữ liệu kiểm chứng để trích thông tin độ sâu được giải đoán và tính sai số bình phương tối thiểu và hệ số tương quan giữa độ sâu đo hiện trường và độ sâu giải đoán được.

KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả các bước tiền xử lý

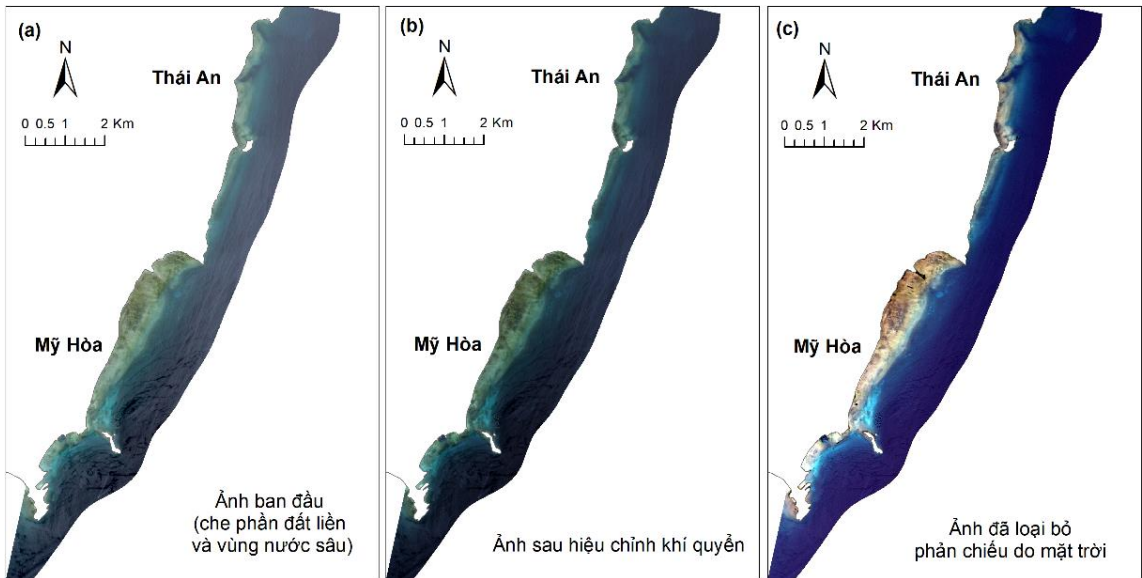
Ảnh VNREDSAT-1A level 2 sau khi mask vùng đất liền và vùng có độ sâu lớn hơn 50 m dựa vào bản đồ độ sâu tỉ lệ 1:100.000. Ảnh được xử lý chuyển thành giá trị bức xạ bằng phương trình (1) với các hệ số *GAIN* và *BIAS* trong bảng 1. Được hiệu chỉnh khí quyển bằng cách áp dụng phương trình (2) với các hệ số dùng hiệu chỉnh khí quyển lấy từ mô hình 6S chạy trên phiên bản web tại địa chỉ

<http://6s.ltdri.org/pages/run6SV.html> với các tham số đầu vào là: month = 9; day = 4; solar zenith angle = 17,91°; solar azimuthal angle = 100,58°; view zenith angle = 0,20°; azimuthal angle = 79,00°; dùng mô hình: Maritime aerosol model of Tropical atmospheric profile và optical depth tại bước sóng 550 nm thickness (AOT) = 0,235. Các hệ số thu được được liệt kê trong bảng 2. Kết quả hiệu chỉnh khí quyển thể hiện ở hình 3b.

Bằng cách chọn 11.742 điểm vùng ít ảnh bởi phản chiếu bởi mặt trời và sử dụng phương pháp hồi qui tìm được các hệ số góc giữa các băng xanh lam (băng 1), xanh lá (băng 2), đỏ (băng 3) với băng cận hồng ngoại (băng 4) là $b_1 = 0,7582$; $b_2 = 0,6707$; và $b_3 = 0,6099$ tương ứng cho băng 1, 2 và 3. Áp dụng phương trình (4) thu được kết quả thể hiện ở hình 3c.

Bảng 2. Kết các hệ số từ mô hình 6S dùng hiệu chỉnh khí quyển ảnh VNREDSAT-1

Tên băng	xa	xb	xc
Band 1 (485 nm)	0,00215	0,10154	0,17139
Band 2 (565 nm)	0,00224	0,05960	0,12319
Band 3 (0,655 nm)	0,00248	0,03896	0,09485
Band 4 (0,825 nm)	0,00367	0,02510	0,07064



Hình 3. Các kết quả tiền xử lý; a) Ảnh ban đầu; b) Kết quả sau hiệu chỉnh khí quyển; c) Kết quả sau loại bỏ phản chiếu do mặt trời

So sánh giữa hình 3a và hình 3b ta thấy có sự khác biệt là những bóng trắng mờ từ ảnh ban

đầu do ảnh hưởng khí quyển phần nào được loại bỏ. Hình 3b ta vẫn thấy những vết phản

chiếu do mặt trời ở khu vực Mỹ Tân - Mỹ Hòa (vòng tròn đỏ). Trong hình 3c, kết quả sau khi loại bỏ các phản chiếu, nền đáy được thể hiện rõ hơn. Những phản chiếu do sóng ở hình 3b hầu hết được loại bỏ. Tuy nhiên một số vẫn tồn tại khu vực Mỹ Tân - Mỹ Hòa. Điều này ảnh hưởng nhiều đến kết quả giải đoán độ sâu vì nó dựa trên giá trị phản chiếu bề mặt từ ảnh, mà những phản chiếu này thường rất nhỏ.

Kết quả mô hình

Kết quả mô hình từng lớp độ sâu được trình bày trong bảng 3. Ta thấy, tương ứng độ sâu càng lớn thì sai số trung bình phương (RMSE) càng lớn, tương ứng ở lớp độ sâu 38 m có RMSE = 6,04 m, lớp độ sâu 3 m có RMSE = 0,33. Tức là, nếu kết quả giải đoán ở độ sâu lớn

có sai số lớn hơn đối với các vùng có độ sâu nhỏ. Còn về hệ số tương quan (R^2) giữa kết quả giải đoán và số liệu thực đo có chút khác biệt, ở độ sâu từ 19 m đến 38 m thì R^2 giảm dần từ 0,73 xuống 0,62. Trong khi đó, từ độ sâu 10 m đến 19 m hệ số này tương đối ổn định ở mức 0,73; 0,74. Lớp độ sâu từ 3 m đến 10 m, ở độ sâu càng nông, thì chỉ số RMSE càng nhỏ, tuy nhiên R^2 đồng thời cũng giảm. Điều này có nghĩa là, ở độ sâu nhỏ, RMSE chủ yếu do số trị nhỏ tạo thành. Kết quả độ tương quan nhỏ ở độ sâu nhỏ là không nằm ngoài dự đoán, bởi vì ở độ sâu nông thường ảnh hưởng bởi loại nền đáy. Ví dụ ở độ sâu 10 m nền cát có thể tương đương với độ sâu 2 m nền rạn. Do đó mà nghiên cứu này không xét đến độ sâu nhỏ hơn 2 m.

Bảng 3. Kết quả mô hình của từng lớp độ sâu gồm các hệ số mô hình, hệ số tương quan, sai số chuẩn và số mẫu, các chỉ số kiểm chứng mô hình gồm sai số trung bình bình phương, hệ số tương quan và số mẫu dùng kiểm chứng

Tầng sâu (m)	Mô hình						Kiểm chứng					
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2	Std. err (m)	n	RMSE (m)	R^2	n	
38	29,65	-1,07	63,87	-67,01	7,39	0,62	3,41	2.790	6,04	0,62	817	
37	28,96	-1,07	63,92	-67,35	7,32	0,62	3,38	2.789	5,63	0,62	807	
36	28,97	-1,07	63,57	-66,76	7,23	0,63	3,34	2.787	5,33	0,63	799	
35	29,59	-1,07	63,19	-65,94	7,20	0,63	3,32	2.786	5,07	0,63	792	
34	28,48	-1,07	63,27	-66,47	7,10	0,63	3,28	2.784	4,48	0,63	777	
33	27,42	-1,07	63,34	-66,97	6,99	0,64	3,25	2.782	4,22	0,64	769	
32	26,80	-1,07	63,40	-67,29	6,94	0,64	3,23	2.781	4,06	0,64	764	
31	26,36	-1,07	63,38	-67,43	6,88	0,64	3,22	2.780	3,90	0,64	759	
30	25,01	-1,07	63,52	-68,15	6,77	0,64	3,20	2.778	3,76	0,64	754	
29	20,74	-1,07	63,45	-69,62	6,26	0,64	3,12	2.768	3,64	0,64	748	
28	18,69	-1,03	62,89	-69,94	6,11	0,65	3,01	2.756	3,52	0,65	742	
27	15,86	-1,01	63,05	-71,58	6,01	0,66	2,94	2.748	3,39	0,66	735	
26	6,86	-0,94	63,05	-75,75	5,42	0,67	2,73	2.720	2,90	0,67	715	
25	7,72	-0,86	60,38	-72,16	5,34	0,68	2,54	2.691	2,83	0,68	711	
24	4,05	-0,79	59,21	-72,57	5,09	0,70	2,34	2.663	2,73	0,70	707	
23	0,11	-0,75	58,59	-73,65	4,80	0,71	2,22	2.641	2,61	0,71	700	
22	-3,43	-0,66	58,18	-74,84	4,40	0,71	2,13	2.622	2,37	0,71	686	
21	-4,66	-0,62	57,20	-74,26	4,28	0,72	2,03	2.601	2,21	0,72	677	
20	-6,13	-0,61	56,88	-74,43	4,10	0,72	1,99	2.590	2,01	0,72	668	
19	-5,85	-0,57	55,72	-72,94	4,07	0,73	1,91	2.568	1,99	0,73	666	
18	-6,76	-0,55	55,22	-72,71	3,96	0,73	1,87	2.551	1,95	0,73	663	
17	-7,70	-0,54	54,86	-72,71	3,87	0,73	1,85	2.535	1,91	0,73	659	
16	-8,54	-0,51	54,14	-72,24	3,78	0,73	1,81	2.502	1,89	0,73	651	
15	-18,40	-0,47	52,75	-74,20	2,57	0,73	1,67	2.371	1,67	0,73	620	
14	-19,42	-0,42	50,45	-71,59	2,23	0,73	1,57	2.262	1,52	0,73	565	
13	-26,28	-0,35	48,14	-71,67	1,52	0,74	1,42	2.068	1,38	0,74	519	
12	-34,05	-0,27	47,04	-74,07	1,07	0,74	1,30	1.898	1,26	0,74	475	
11	-39,33	-0,19	45,28	-74,54	0,73	0,73	1,20	1.713	1,16	0,73	425	
10	-43,72	-0,13	42,99	-73,90	0,42	0,74	1,04	1.470	1,03	0,74	381	
9	-43,46	-0,03	39,58	-69,96	0,40	0,72	0,93	1.233	0,91	0,72	353	
8	-41,48	0,11	34,88	-64,10	0,64	0,71	0,80	1.002	0,74	0,71	321	
7	-37,65	0,17	31,02	-57,63	0,64	0,69	0,74	791	0,69	0,69	288	
6	-33,63	0,14	26,45	-49,27	0,25	0,63	0,69	522	0,59	0,63	218	
5	-28,93	0,13	19,59	-37,95	-0,09	0,51	0,61	298	0,47	0,51	126	

Sai số chuẩn (Std. err) của mô hình tương tự giống xu thế của sai số trung bình bình phương. Tất cả các hệ số tương quan đều có chỉ số p (p value) nhỏ hơn 0,05. Do đó ta có thể khẳng định các hệ số tương quan có ý nghĩa thống kê.

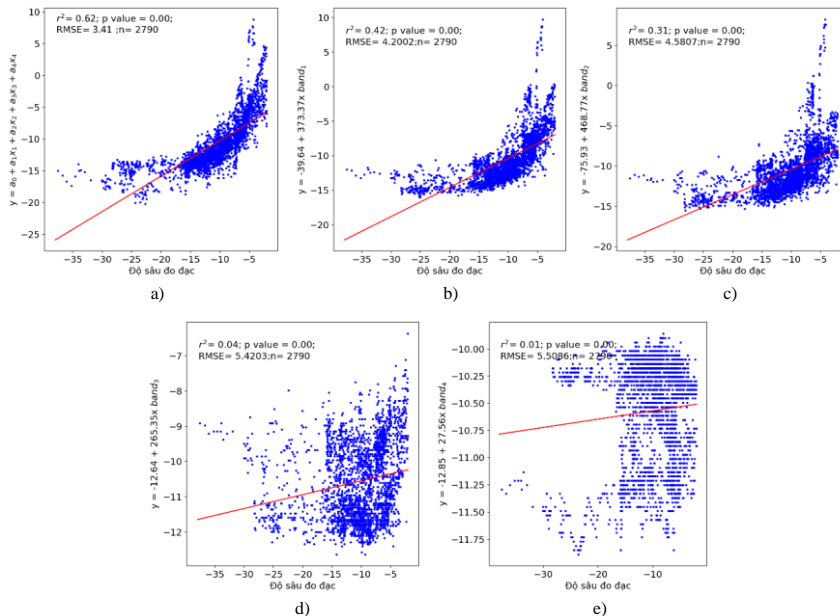
Căn cứ vào bảng 3 và các phân tích ở trên ta có thể thấy rằng, ảnh VNREDSAT-1 giải đoán cho kết quả tốt nhất ở độ sâu từ 10 m đến 19 m với hệ số tương quan từ 0,73 đến 0,74, sai số trung bình bình phương trong khoảng 1,03 đến 1,99.

Để xét mức độ đóng góp của từng băng trong mô hình bốn biến, chúng tôi tiến hành thực hiện mô hình đơn biến cho từng băng. Kết quả thể hiện ở bảng 4 cho thấy, băng 1 có mức độ tương quan với độ sâu là cao nhất với

hệ số tương quan là 0,42 và RMSE là 4,2 m, sau đó đến các băng 2, 3 và 4 với hệ số tương quan giảm dần từ 0,31 đến 0,02. Ngược lại, RMSE tăng dần từ 4,58; 5,4 và 5,5 m. Căn cứ trên tương quan giữa độ sâu giải đoán và độ sâu đo đạc ở hình 4b và hình 4c cho thấy, nếu chỉ dùng từng băng 1 hoặc 2 giải đoán, thì độ sâu tối đa có thể giải được khoảng 16 m. Đối với băng 3 và 4 ở hình 4d, hình 4e cho mức độ tương quan với độ sâu là rất thấp và không thể dùng đơn băng giải đoán độ sâu. Tuy nhiên, ở hình 4a, là kết quả sử dụng mô hình hồi qui trên 4 băng cho thấy khả năng giải đoán đến độ sâu khoảng 20 m và như thể hiện ở bảng 3, xét mức sai số bình phương tối thiểu là 2 m thì khả năng giải đoán của tốt ở những vùng có độ sâu khoảng 19 m.

Bảng 4. Kết quả mô hình sử dụng mô hình đơn biến cho từng băng ảnh và hệ số tương quan, sai số trung bình bình phương và số mẫu từ bộ dữ liệu lập mô hình hồi qui và từ bộ số liệu kiểm chứng

	Mô hình hồi qui	Mô hình			Kiểm chứng		
		R ²	RMSE	n	R ²	RMSE	n
Băng 1	Y = 39,64 – 373,37*X	0,42	4,2	2.790	0,35	7,5	817
Băng 2	Y = 75,93 – 468,77*X	0,31	4,5	2.790	0,27	7,7	817
Băng 3	Y = 12,64 – 265,35*X	0,04	5,42	2.790	0,01	9,17	817
Băng 4	Y = 12,85 – 27,56*X	0,01	5,51	2.790	0,1	8,84	817

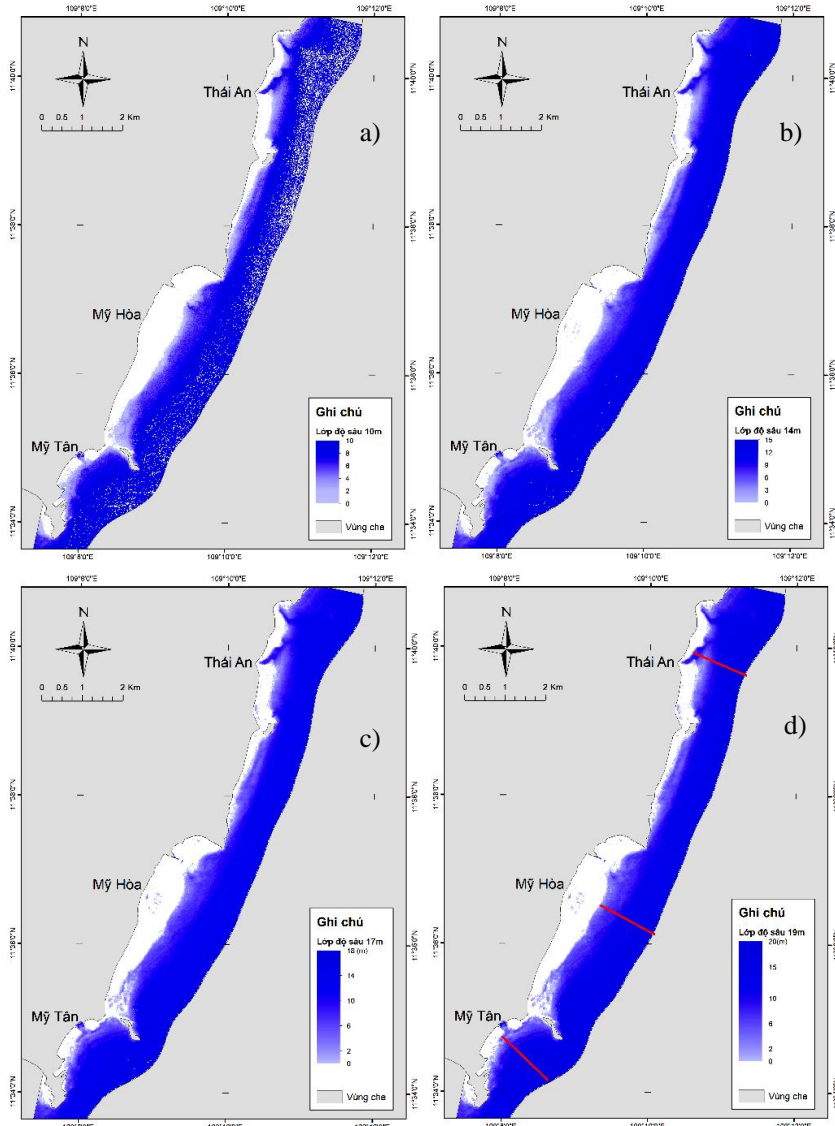


Hình 4. Tương quan giữa độ sâu đo đạc thực tế và độ sâu giải đoán từ ảnh VNREDSAT-1; a) Kết quả từ phương pháp hồi qui bốn băng của ảnh; b) Kết quả từ phương pháp hồi qui tuyến tính với băng 1; c) Kết quả từ phương pháp hồi qui tuyến tính với băng 2; d) Kết quả từ phương pháp hồi qui tuyến tính với băng 3; e) Kết quả từ phương pháp hồi qui tuyến tính với băng 4

Kết quả giải đoán

Từ các kết quả cho thấy, ở hình 5a là kết quả giải đoán của mô hình sử dụng bộ dữ liệu điểm độ sâu từ 2 m đến 10 m có RMSE = 1,03 và $R^2 = 0,74$. Điều này có nghĩa nếu thực tế ở khu vực này chỉ sâu ở mức 10 m thì sẽ cho kết quả khá tốt. Tuy nhiên, trên thực tế ở khu vực Thái An có độ sâu đến 38 m. Do đó nhiều vùng được giải đoán thấp hơn với thực tế. Tương tự ở hình 5b–5d là kết quả giải đoán sử dụng các

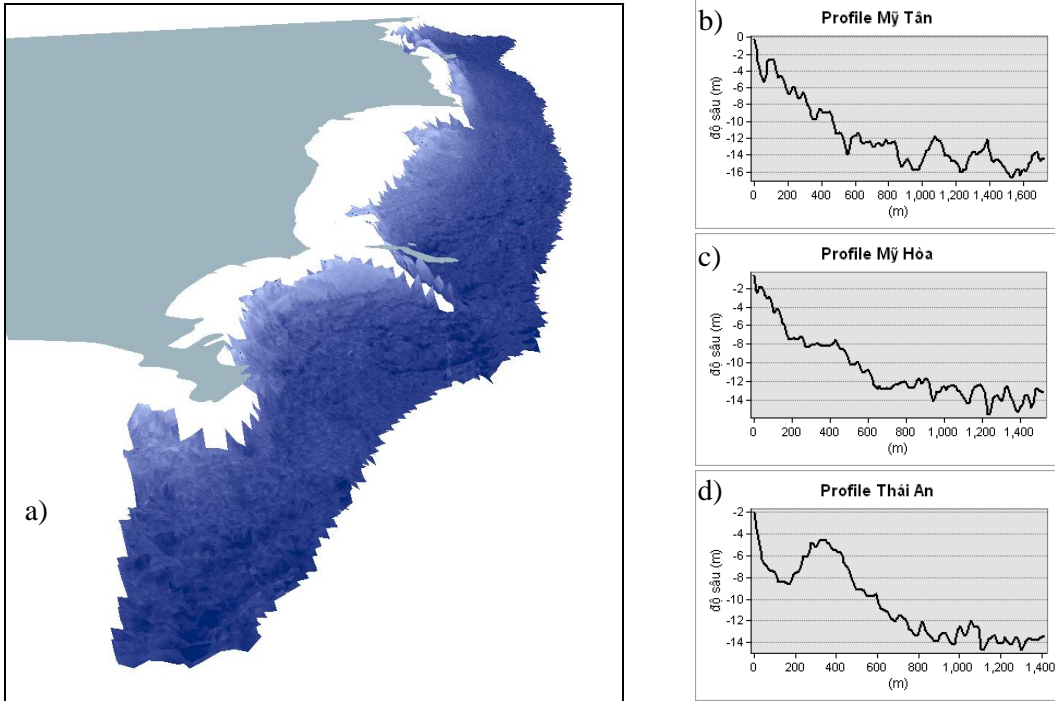
bộ dữ liệu điểm khảo sát có độ sâu giới hạn lần lượt là 14 m, 17 m và 19 m với RMSE nhỏ hơn 1,99 m và R^2 là 0,73 từ bộ dữ liệu điểm kiểm chứng độc lập. Ngoài ra, ở hình 4a ta thấy, một số vùng ở nước nông có giá trị giải đoán dương. Điều này có thể lý giải do ảnh hưởng bởi các xáo trộn khu vực ven bờ. Vấn đề này có thể được giải quyết bằng phương pháp lọc giá trị giải đoán và gán các giá trị này bằng độ sâu thấp nhất.



Hình 5. Một số kết quả giải đoán độ sâu vùng Thái An; a) Kết quả độ sâu dùng các điểm có độ sâu từ 2 m đến 10 m; b) Kết quả độ sâu dùng các điểm có độ sâu từ 2 m đến 14 m; c) Kết quả độ sâu dùng các điểm có độ sâu từ 2 m đến 17 m; d) Kết quả độ sâu dùng các điểm có độ sâu từ 2 m đến 19 m và phân bố các mặt cắt ngang

Đặc điểm địa hình vùng này dựa trên kết quả giải đoán có thể phân ra 3 khu vực. Khu vực Mỹ Tân, hình 6b, có độ dốc khá lớn, tính từ trong ra khoảng 600 độ sâu đạt độ sâu khoảng 12 m và tiếp tục sâu dần ra phía ngoài. Khu vực Mỹ Hòa, hình 6c, phía trong là bãi san hô và thảm cỏ biển có độ sâu dưới 2 m. Khu

vực này có cấu trúc dạng bậc thang, với mỗi bậc khoảng 6 m và thêm khoảng 400 m. Khu vực Thái An, hình 6d, ven bờ là các bãi rạn, san hô và thảm cỏ biển, phía ngoài 300–400 m có cồn nhô lên dài khoảng 200 m có độ sâu –5 m đến –6 m.



Hình 6. a) Kết quả lớp độ sâu 19 m dưới dạng phối cảnh 3D; b) Mặt cắt sâu khu vực Mỹ Tân; c) Mặt cắt sâu khu vực Mỹ Hòa; d) Mặt cắt sâu khu vực Thái An

KẾT LUẬN

Ảnh VNREDSAT-1 có thể ứng dụng tốt giải đoán độ sâu vùng nước nông bằng phương pháp hồi qui đa biến vùng ven bờ huyện Ninh Hải, tỉnh Ninh Thuận ở khoảng độ sâu từ 10 m đến 19 m với sai số trung bình bình phương từ 1,03 m đến 1,99 m và hệ số tương quan cao từ 0,73 và 0,74. Ảnh VNREDSAT-1 cần qua bước tiền xử lý trước khi xây dựng mô hình giải đoán. Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển có thể sử dụng mô hình 6S và loại bỏ chói do mặt trời bằng phương pháp của Hedley.

Kết quả giải đoán độ sâu vùng nước nông từ ảnh VNREDSAT-1 có phục vụ tốt cho các mục đích nghiên cứu, lập kế hoạch. Tuy nhiên vẫn chưa đáp ứng được những yêu cầu độ chính xác cao hơn như xây dựng công trình

biển, dẫn đường,... do sự hạn chế của độ phân giải không gian của ảnh chỉ là 10 m.

Lời cảm ơn: Chúng tôi xin gửi lời cảm ơn đến Ban chủ nhiệm chương trình KHCN vũ trụ giai đoạn 2012–2015, Ban chủ nhiệm đề tài cấp nhà nước “Xây dựng cơ sở dữ liệu số các yếu tố hải dương từ nguồn ảnh VNREDSat-1 và các ảnh viễn thám khác cho khu vực ven biển Ninh Thuận - Bình Thuận phục vụ phát triển kinh tế biển bền vững, mã số: VT/UD-07/14–15” đã hỗ trợ ảnh, số liệu thực địa cho nghiên cứu này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Lyzenga, D. R., 1978. Passive remote sensing techniques for mapping water

- depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379–383.
- [2] Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., and Tanis, F. J., 2006. Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251–2259.
- [3] Gholamalifard, M., Kutser, T., Esmaili-Sari, A., Abkar, A., and Naimi, B., 2013. Remotely sensed empirical modeling of bathymetry in the Southeastern Caspian Sea. *Remote sensing*, 5(6), 2746–2762.
- [4] Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., and Ferreira, Ó., 2015. Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159, 102–116.
- [5] Vermote, E. F., Tanré, D., Deuze, J. L., Herman, M., and Morcette, J. J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(3), 675–686.
- [6] Wilson, R. T., 2013. Py6S: A Python interface to the 6S radiative transfer model. *Computers and Geosciences*, 51, 166–171.
- [7] Hedley, J. D., Harborne, A. R., and Mumby, P. J., 2005. Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107–2112.
- [8] Green, E., Mumby, P., Edwards, A., and Clark, C., 2000. Remote sensing: handbook for tropical coastal management. *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*.
- [9] Hochberg, E. J., Andréfouët, S., and Tyler, M. R., 2003. Sea surface correction of high spatial resolution Ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7), 1724–1729.
- [10] Hochberg, E. J., Atkinson, M. J., and Andréfouët, S., 2003. Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 85(2), 159–173.