

DÁNH GIÁ TIỀM NĂNG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP VIỄN THÁM TRONG NGHIÊN CỨU THÀNH LẬP BẢN ĐỒ RẠN SAN HỒ

ASSESSMENT OF POTENTIALS FOR USING REMOTE SENSING METHOD IN CORAL REEF MAPPING RESEARCH

Hoàng Minh Thiện¹, Nguyễn Văn Khánh^{1*}, Kiều Thị Kính¹, Dương Công Vinh², Nguyễn Đức Minh¹

¹Trường Đại học Sư phạm - Đại học Đà Nẵng

²Trường Đại học Nông Lâm Hồ Chí Minh - Phân hiệu tại Gia Lai

*Tác giả liên hệ: nvkhanh@ued.udn.vn

(Nhận bài: 24/9/2021; Chấp nhận đăng: 8/3/2022)

Tóm tắt - Nghiên cứu này dựa vào tổng quan tài liệu hệ thống để đánh giá hiện trạng và tiềm năng sử dụng viễn thám xây dựng bản đồ rạn san hô (RSH) tại Việt Nam. Kết quả cho thấy, các nghiên cứu ứng dụng viễn thám chủ yếu là xây dựng bản đồ phân bố với độ chi tiết khác nhau. Tuy nhiên, các nghiên cứu còn hạn chế về quy mô và việc ứng dụng giám sát không liên tục nên gây khó khăn trong việc thành lập bản đồ chi tiết các RSH. Do đó, các ảnh vệ tinh độ phân giải trung bình với nguồn dữ liệu miễn phí (Landsat, Sentinel2) nên được sử dụng đánh giá phân bố ở quy mô lớn và theo dõi sự biến động dài hạn các RSH. Trong khi đó, các dữ liệu ảnh thương mại độ phân giải cao nên được sử dụng trong các nghiên cứu quy mô nhỏ với độ chi tiết cao để cung cấp dữ liệu tin cậy cho công tác quản lý.

Từ khóa - Rạn san hô; viễn thám; thành lập bản đồ

1. Đặt vấn đề

Các RSH được xem là rừng mưa nhiệt đới của đại dương [1], [2], bởi vì, đây là hệ sinh thái dưới nước có tính đa dạng và năng suất sinh học cao nhất trên thế giới [3]. Theo ước tính, diện tích các RSH toàn cầu khoảng 284.300 km², chiếm 1,2% diện tích thềm lục địa và chỉ chiếm 0,09% tổng diện tích đại dương của thế giới, nhưng các RSH cung cấp nhiều giá trị quan trọng cho xã hội và môi trường [4]. Hiện nay, gần một phần ba các loài cá biển được tìm thấy tại các RSH và đây cũng là nơi cư trú, nơi kiếm sống, bãi đẻ cho nhiều loài động thực vật nhiệt đới... [5], [6]. Bên cạnh những giá trị quan trọng về mặt sinh thái học, chúng còn mang lại nhiều lợi ích về phát triển kinh tế biển. Ước tính mỗi năm RSH đem lại khoảng 375 tỷ USD và duy trì sinh kế cho 500 triệu người là cộng đồng người dân vùng ven biển, trong đó có đến 30 triệu người kiếm sống trực tiếp từ nghề biển [4], [7]. Ngoài ra, các RSH cũng hỗ trợ trong việc bảo vệ bờ biển bằng việc tạo các rào chắn, giảm thiểu rủi ro thiên tai, chống xói lở vùng ven và duy trì năng suất đánh bắt thủy hải sản tại hệ sinh thái rừng ngập mặn, đất ngập nước [8].

Các RSH mang lại nhiều lợi ích đối với con người và tự nhiên nhưng diện tích và chất lượng các RSH đã suy giảm trầm trọng trên toàn cầu trong những thập kỉ gần đây do hoạt động của con người và tự nhiên [8], [9]. Đặc biệt các tác động từ con người trong việc khai thác quá mức, sử dụng các ngư cụ đánh bắt hủy diệt và phát thải nguồn nước ô nhiễm đã gây nguy hại trực tiếp cho hơn 60% hệ sinh thái RSH trên toàn cầu [6]. Theo báo cáo định kỳ của Viện

Abstract - The authors conducted a systematic review to assess the current status and potential of using remote sensing for coral reef mapping in Vietnam. The results showed that, the researchers used remote sensing data in coral reef mapping which mainly focused on building the distribution maps with different details. However, these studies still have limitations in terms of scale and the application of intermittent monitoring, which makes it difficult to establish detailed maps of coral reefs. Therefore, the medium resolution satellite images with free data sources (Landsat, Sentinel 2) should be used to assess the large-scale distribution and monitor the long-term variability of coral reefs. Meanwhile, high-resolution commercial satellite image data should be used in small-scale studies with high detail to provide reliable data for management.

Key words - Coral reefs; remote sensing; mapping

Khoa học Biển Úc (AIMS), đến năm 2011, ước tính 19-20% diện tích RSH đã bị phá hủy hoàn toàn; 5% rạn san hô đang trong tình trạng suy thoái nghiêm trọng và sẽ mất đi trong vòng 10-20 năm tới; và 24% diện tích các RSH đang bị đe dọa nghiêm trọng [11].

Suy thoái các RSH đã thúc đẩy các hoạt động giám sát thông qua việc nghiên cứu sự phân bố, thành lập các bản đồ RSH, đánh giá sự thay đổi đặc điểm RSH... xác định các yếu tố ảnh hưởng hay theo dõi khả năng phục hồi qua các thời kì khác nhau, từ đó có những giải pháp bảo vệ các RSH phù hợp. Hiện nay, có nhiều phương pháp giám sát các RSH, trong đó, phương pháp tiếp cận dựa trên công nghệ viễn thám đã được chứng minh là có tính ưu việt để lập bản đồ và giám sát hệ sinh thái RSH. Mặc dù, công nghệ viễn thám không thể cung cấp mức độ chi tiết và chính xác tại một điểm cụ thể của RSH so với khảo sát thực địa nhưng chúng thường có chi phí thấp và dễ dàng thực hiện ở một khu vực rộng lớn [12]. Do đó, đây là công cụ hỗ trợ đắc lực cho trong việc quản lý tài nguyên và bảo tồn hệ sinh thái RSH. Tại Việt Nam, ứng dụng ảnh viễn thám vào các nghiên cứu RSH bước đầu mang lại những thành tựu nhất định, tuy nhiên, việc ứng dụng không liên tục, hạn chế về quy mô và kinh phí nghiên cứu gây ra khó khăn trong việc giám sát một cách có hệ thống các RSH tại Việt Nam [13].

Vì vậy, bài báo này sẽ trình bày tổng quát các nghiên cứu thành lập bản đồ RSH bằng công nghệ viễn thám đã được thực hiện ở trên thế giới và Việt Nam. Một số ưu điểm và hạn chế của các nghiên cứu này cũng được phân tích

¹ The University of Danang - University of Science and Education (Hoang Minh Thien, Nguyen Van Khanh, Kieu Thi Kinh, Nguyen Duc Minh)

² Nong Lam university – Gia Lai campus (Duong Cong Vinh)

nhằm đề xuất các hướng nghiên cứu cần được phát triển trong tương lai với cách tiếp cận hiệu quả về độ chính xác, kinh phí và phù hợp với điều kiện tự nhiên ở Việt Nam trong việc thành lập bản đồ phân bố và tổ chức giám sát các RSH một cách hiệu quả.

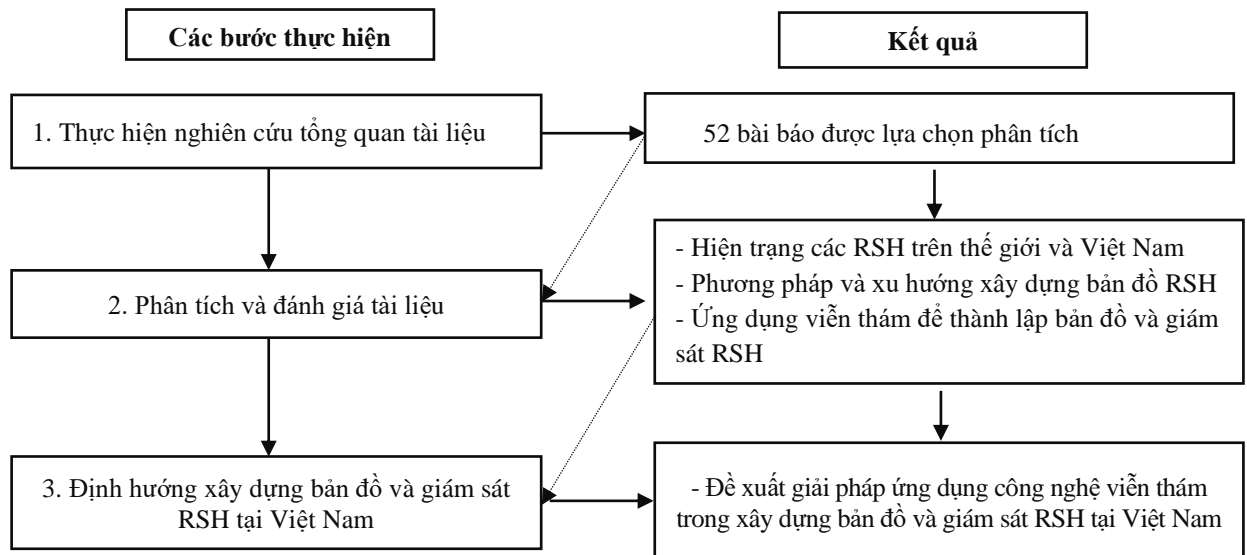
2. Phương pháp nghiên cứu

Trong phạm vi đánh giá, bài báo thu thập các tài liệu có chủ đề liên quan về việc ứng dụng ảnh viễn thám trong thành lập bản đồ và giám sát các rạn san hô trên thế giới và Việt Nam. Các cơ sở dữ liệu được thu thập từ hai nguồn dữ liệu chính là ScienceDirect (www.sciencedirect.com) và ResearchGate (www.researchgate.net) vào tháng 2 năm 2021, ngôn ngữ tìm kiếm bao gồm tiếng Anh và tiếng Việt. Các từ khóa đã được sử dụng để tìm kiếm các tài liệu liên quan như sau: “Coral reef*” OR “Coral reef mapping*” OR “Historical methods of coral reef mapping*” OR “Application remote sensing in coral reef*” OR “Remote sensing*” OR “Xây dựng bản đồ RSH*” OR “Ứng dụng

Viễn thám trong RSH*” OR “Giám sát RSH*”...

Kết quả tìm kiếm thu thập được 221 bài báo, các tài liệu thu thập được sẽ tiến hành tìm hiểu, phân tích chi tiết nội dung dựa trên tiêu đề và tóm tắt bài báo. Sau kết quả sàng lọc lại các tài liệu tìm hiểu, bài báo đã lựa chọn tổng cộng 52 công trình nghiên cứu để phân tích bản toàn văn, trong đó số lượng bài quốc tế là 40 bài (năm công bố 1956-2016) và 12 bài trong nước (năm công bố 2005-2019) được sử dụng trong nghiên cứu này. Ngoài ra, yêu cầu nguồn dữ liệu thu thập phải là các tài liệu tham khảo được công bố trên các tạp chí, hội thảo uy tín của quốc tế (ISI, Scopus...) hay của Việt Nam. Các tiêu chí lựa chọn bao gồm:

- Tài nguyên và hiện trạng các RSH (10 bài);
- Phương pháp và xu hướng xây dựng bản đồ RSH (9 bài);
- Tổng quan nghiên cứu viễn thám đối với RSH (6 bài);
- Ứng dụng viễn thám để thành lập bản đồ và giám sát RSH (27 bài).



Hình 1. Quy trình nghiên cứu

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Xu hướng tiếp cận thành lập bản đồ rạn san hô trên thế giới

Lập bản đồ RSH là nền tảng cơ bản cung cấp các thông tin về tình trạng, diễn biến thay đổi qua các thời kỳ của các RSH nhằm giúp các nhà quản lý hiểu quy trình về sự hình thành hệ sinh thái rạn san hô và có những chính sách quản lý, bảo tồn tài nguyên một cách hiệu quả. Với sự tiến bộ về khoa học-kỹ thuật, qua các thời gian khác nhau, phương pháp tiếp cận trong thành lập bản đồ RSH được cải tiến nhằm mang lại độ chính xác cao, tiết kiệm chi phí... Có nhiều cách tiếp cận khác nhau trong việc thành lập bản đồ, bao gồm các phương pháp phác thảo bằng ống ngắm kỹ thuật, phương pháp hệ thống thông tin địa lý (GIS) kết hợp với sử dụng phương pháp viễn thám quang học thủ động hay chủ động. Hầu hết các cách tiếp cận đều cần có sự liên kết với dữ liệu khảo sát thực địa để đảm bảo độ tin cậy của việc lập bản đồ. Những năm gần đây, phương pháp ứng dụng công nghệ viễn thám trong việc thành lập bản đồ RSH ngày càng được sử dụng rộng rãi trên thới giới cũng như tại Việt Nam.

3.1.1. Phương pháp phác thảo bản đồ

Đầu thế kỷ XX, các nhà khoa học đã sử dụng thiết bị ống ngắm kỹ thuật để quan sát và miêu tả RSH trên một bản vẽ phác thảo [14]. Bản đồ rạn san hô tại quần đảo Great Barrier Reef (Úc) được ghi nhận là bản đồ phác thảo hoàn thiện các RSH đầu tiên trên thế giới vào năm 1937. Sau đó, độ chính xác của các phương pháp này dần được cải thiện và tốc độ khảo sát tương đối nhanh chóng nhờ các thiết bị hỗ trợ như: máy kính vĩ và la bàn [15]. Nhờ vậy, mở ra cơ hội tìm hiểu và khám phá các vùng rạn san hô khác trên thế giới.

Tuy nhiên, với công cụ khảo sát còn hạn chế về mặt kỹ thuật, địa hình khảo sát khó khăn và chưa có phương pháp thu mẫu hiệu quả nên kết quả các bản đồ RSH chỉ xây dựng trên phạm vi nhỏ, những khu vực RSH ở độ sâu lớn không thể ghi nhận trên bản đồ. Bên cạnh đó, phương pháp tiến hành thu mẫu chủ yếu dựa vào thực địa nên mất nhiều thời gian nghiên cứu và tốn kém về mặt chi phí.

3.1.2. Phương pháp sử dụng công nghệ ảnh viễn thám quang học thụ động

Sự phát triển nhanh chóng của ngành công nghệ với các

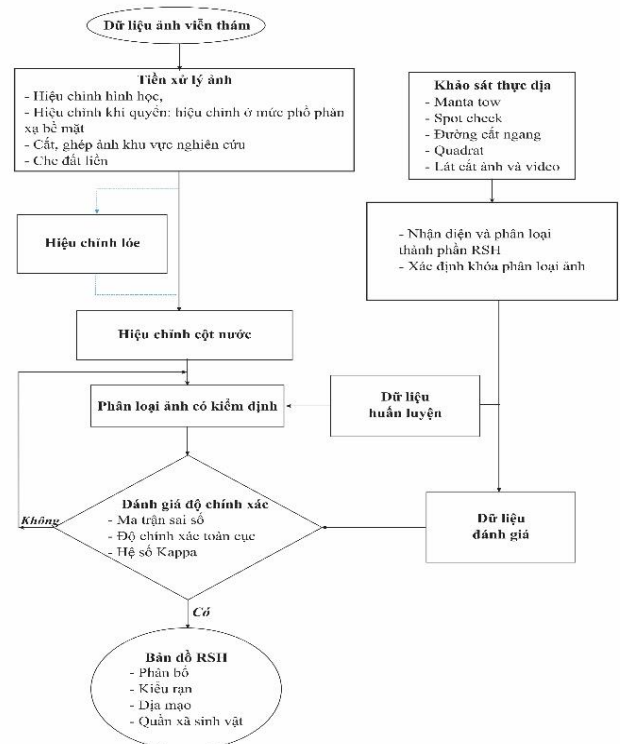
trang thiết bị hiện đại, việc nghiên cứu các đặc điểm về RSH dần được cải thiện. Một công cụ mới được ra đời, đó là công nghệ viễn thám đang được ứng dụng rộng rãi trong rất nhiều lĩnh vực, bao gồm các nghiên cứu hệ sinh thái biển [13]. Vệ tinh viễn thám quang học thụ động thu nhận các thông tin phản xạ của năng lượng bức xạ mặt trời và lưu trữ thông tin dạng ảnh, từ đó, các nhà nghiên cứu tiến hành giải đoán để xác định đối tượng. Dữ liệu ảnh viễn thám này rất đa dạng về chủng loại và độ phân giải không gian, bao gồm các ảnh được cung cấp miễn phí như Landsat, Sentinel 2 với độ phân giải không gian trung bình hay có độ phân giải không gian cao nhưng được thương mại hóa như IKONOS, Quickbird [12].

Các RSH trên thế giới có diện tích hàng chục đến hàng trăm km² nên việc thành lập bản đồ RSH bằng công nghệ viễn thám được xem là hiệu quả nhất về chi phí nhờ các vệ tinh có độ phân giải vừa phải (kích thước pixel 10m đến 30 m) [16]. Sự ra đời của các chương trình Landsat từ năm 1972 đã tạo nên dữ liệu lịch sử lâu dài cho các nghiên cứu biến động các rạn san hô. Kể từ đó, nhiều nghiên cứu về thành lập RSH bằng ảnh viễn thám quang học thụ động được thực hiện và không ngừng phát triển cho đến nay [17]. Với lợi thế cơ sở dữ liệu lưu trữ ảnh viễn thám trong chuỗi thời gian dài, ảnh Landsat được sử dụng rộng rãi nhất để theo dõi sự thay đổi RSH qua các thời kỳ trên quy mô lớn hơn (khu vực và toàn cầu). Điển hình là chương trình giám sát và lập bản đồ rạn san hô (GRCMN) được triển khai 1998-2008 và đã kiểm tra hơn 1600 khu vực (Landsat 7 ETM, 30 m x 30 m) trên toàn thế giới với tần suất thực hiện định kỳ hai năm một lần [3], [9]. Chương trình này đã mở ra tiềm năng mới cho các nghiên cứu tương lai bằng cách sử dụng hình ảnh vệ tinh. Gần đây, dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 2 với độ phân giải trung bình (10 m) được cung cấp miễn phí. Cũng giống như Landsat, nó có giá trị trong nghiên cứu RSH ở quy mô lớn, chẳng hạn Hedley đã thành công thành lập bản đồ phân bố RSH toàn cầu [18]. Tuy nhiên, hầu hết các giám sát ở quy mô lớn bằng công nghệ viễn thám chủ yếu tập trung vào thay đổi về diện tích rạn hay độ rộng của rạn, chưa nhận diện đặc điểm nền đáy của rạn do đó, khó có thể đánh giá chất lượng và đặc điểm sinh học RSH.

Những chương trình giám sát ở quy mô khu vực và địa phương đã xây dựng được bản đồ phân loại cấu trúc rạn như bản đồ phân bố, bản đồ địa mạo hay bản đồ về quần xã sinh vật đáy (Hình 2) [19]. Các ảnh độ phân giải trung bình như Landsat, ASTER bị giới hạn độ chi tiết của phân loại lớp phủ san hô đặc biệt tại các RSH nên chỉ chính xác trong việc lập bản đồ với khoảng từ 3-5 lớp môi trường sống RSH (Ví dụ: San hô, tảo, cát và vụn vỡ) [12], [20]. Sự tiến bộ mới trong ảnh vệ tinh, độ phân giải của bản đồ được tạo ra từ hình ảnh viễn thám đã từng bước tăng lên khi công nghệ cảm biến đã phát triển, các thế hệ vệ tinh có độ phân giải không gian cao như IKONOS, Quickbird, Worldview 2 và 3, PlanetScope đã cho thấy khả năng thành lập bản đồ chi tiết các RSH so với các loại ảnh độ phân giải không gian thấp [21], [22]. Nghiên cứu của Capolsimi đã chỉ ra IKONOS có thể phân loại 7-9 lớp cấu trúc RSH với độ chính xác cao, các ảnh vệ tinh Planet Dove, Worldview-2, Quickbird được sử dụng để thành lập bản đồ chi tiết cấu trúc RSH từ 9-13 lớp môi trường sống [20], [23], [24], [25]. Các ảnh vệ tinh độ phân giải cao có độ bao phủ nhỏ nên hầu hết được sử dụng cho các nghiên

cứu chi tiết RSH ở quy mô nhỏ (quy mô địa phương). Bên cạnh đó, chi phí đắt đỏ cũng đã hạn chế việc sử dụng các ảnh vệ tinh này ở quy mô không gian lớn hơn cũng như là ứng dụng rộng rãi tại các nước đang phát triển, với kinh phí nghiên cứu hạn chế [26], [27].

Các dữ liệu ảnh viễn thám quang học thụ động đa dạng về độ phân giải không gian, thời gian và độ phân giải phổ, dẫn đến có thể có sự khác nhau giữa kỹ thuật xử lý, phân loại ảnh cũng như phương pháp khảo sát thực địa. Nhưng có thể khái quát thành các bước quan trọng: Khảo sát thực địa, tiền xử lý ảnh, hiệu chỉnh lóe, hiệu chỉnh cột nước, phân loại ảnh và đánh giá độ chính xác (Hình 2).



Hình 2. Khái quát quy trình thành lập bản đồ RSH bằng ảnh viễn thám

Các phương pháp khảo sát thực địa đối với việc thành lập bản đồ RSH rất đa dạng, phụ thuộc vào độ chi tiết bản đồ thành lập, độ phân giải ảnh viễn thám, chi phí thực hiện cũng như các phương tiện kỹ thuật hiện có [28]. Các phương pháp khảo sát đa dạng như: Manta tow; Kiểm tra điểm ngẫu nhiên tại chỗ (spot check); Mật cắt điểm; Theo đường cắt ngang (line transect); Khảo sát quadrat, lát cắt ảnh và video [29]. Trong đó, phương pháp spot check, mật cắt điểm và khảo sát theo đường cắt ngang rất phổ biến trong các nghiên cứu thành lập bản đồ RSH kết hợp việc ghi nhận tọa độ khảo sát bằng hệ thống định vị toàn cầu (GPS). Quá trình tiền xử lý ảnh viễn thám là bước đầu tiên quan trọng trong việc thành lập bản đồ RSH, tùy mức độ xử lý ảnh của nhà cung cấp mà mức độ xử lý khác nhau, mức độ hiệu chỉnh phổ phản xạ nên ở mức phản xạ bề mặt [30].

Trong nghiên cứu RSH cũng như các hệ sinh thái dưới nước, phương pháp loại bỏ các ảnh hưởng do bức xạ mặt trời và các ảnh hưởng từ cột nước có vai trò đặc biệt quan trọng, bao gồm việc loại bỏ lóe và hiệu chỉnh cột nước. Trong đó, hiệu chỉnh lóe thường được sử dụng cho các

nghiên cứu RSH bằng dữ liệu ảnh vệ tinh có độ phân giải cao, với phương pháp phổ biến và đơn giản của Hedley và cs. dựa trên việc sử dụng kênh cận hồng ngoại (NIR) để giảm ảnh hưởng của hiện tượng phản xạ bề mặt nước gây sai số cho việc phân loại RSH [31]. Các phương pháp hiệu chỉnh cột nước cũng rất đa dạng, trong đó phải kể đến phương pháp hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga (1981) hay phương pháp được phát triển bởi Tassan và cs. Phương pháp hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga được thực hiện bởi việc tính chỉ số bất biến độ sâu bất (Depth - Invariant Index: DII) từ các kênh phổ khả kiến (xanh lam, xanh lục và đỏ) theo một loại nền đáy đồng nhất, thường áp dụng đối với chất lượng nước tốt [32], [33], [34]. Trong khi đó, phương pháp Tassan được hiệu chỉnh từ phương pháp của Lyzenga để ứng dụng cho nước có độ chênh lệch độ đục giữa vùng nước nông và nước sâu bằng việc tính các chỉ số phản xạ nền đáy (Bottom Reflectance Index: BRI).

Thực tế độ chính xác phân loại ảnh phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm việc lựa chọn các phương pháp phân loại ảnh. Các phương pháp phân loại có kiểm định được ứng dụng rộng rãi hơn so với phương pháp phân loại không kiểm định [32], [35]. Các phương pháp phân loại dựa trên pixel phổ biến gồm phân loại xác suất cực đại (Maximum Likelihood); phân loại khoảng cách Mahalanobis Mahalanobis Distance); phân loại khoảng cách nhỏ nhất (Minimum Distance). Bên cạnh đó, một số nghiên cứu gần đây hướng đến việc sử dụng phương pháp phân loại định hướng đối tượng (Object-based image analysis) cho việc phân loại ảnh có độ phân giải cao [1], [19], [36].

3.1.3. Phương pháp sử dụng ảnh vệ tinh viễn thám chủ động

Các ảnh viễn thám quang học thụ động được ứng dụng rộng rãi trong các nghiên cứu RSH. Tuy nhiên, chúng thường bị hạn chế trong việc lập các bản đồ ở môi trường nước đục cũng như các RSH ở độ sâu >30 m. Bởi vậy, các hệ thống viễn thám chủ động được phát triển để hạn chế ảnh hưởng của độ đục của nước cũng như có khả năng xuyên qua cột nước ở độ sâu lớn hơn [12]. Viễn thám chủ động sử dụng thiết bị tự phát năng lượng bức xạ và thu nhận năng lượng trở lại, máy bay (Aircraft), thuyền (Boat), hoặc máy bay không người lái (Drone) được sử dụng để mang các thiết bị phát năng lượng và cảm biến thu nhận bức xạ trở lại [37], [38]. Ảnh đa phổ CASI (độ phân giải không gian 1 m) rất phổ biến trong các nghiên cứu RSH trước đây, với hệ thống siêu phổ đã thành lập chi tiết với 9 lớp sinh vật đáy [21]. Tuy nhiên, viễn thám chủ động thường bị giới hạn về không gian thu nhận ảnh, thời gian khảo sát ngắn vì phụ thuộc vào pin, phụ thuộc vào thời tiết cũng như là rất đắt đỏ để nghiên cứu ở phạm vi lớn và đa thời gian [38], [39]. Ngoài ra, nhược điểm của phương pháp này là chúng chỉ thu thập hình ảnh ở một phạm vi hạn chế so với hình ảnh vệ tinh.

Như vậy, nhờ vào sự phát triển về công nghệ đã giúp các nhà khoa học có nhiều phương pháp tiếp cận trong nghiên cứu thành lập bản đồ RSH với độ chính xác cao và hiệu quả về chi phí nghiên cứu. Trong đó, việc ứng dụng công nghệ viễn thám đối với xây dựng bản đồ RSH được áp dụng rộng rãi, bởi vì, chúng tăng hiệu quả về khảo sát thực địa, hiệu quả xử lý thông tin, chất lượng của các bản đồ và chi phí cao hơn so với các phương pháp khác, do chất

lượng ảnh viễn thám đang ngày được nâng cao và phạm vi giải đoán ở trên diện rộng lớn hơn. Một số thành tựu đáng chú ý của việc giám sát RSH bằng công nghệ viễn thám mà đến nay trên thế giới đã thực hiện như: (1) Thành lập bản đồ phân bố RSH và hệ sinh thái liên quan; (2) Hồi cứu sự thay đổi RSH và có thể dự đoán sự thay đổi cho tương lai; (3) Xây dựng bản đồ theo mật độ phủ san hô; (4) Xây dựng hệ thống giám sát RSH.

3.2. Xu hướng tiếp cận thành lập bản đồ rạn san hô Việt Nam

Cuối thế kỉ XX, những nghiên cứu cơ bản về RSH ở Việt Nam bắt đầu được các nhà khoa học quan tâm nghiên cứu, dưới sự hỗ trợ kinh phí của Nhà nước hay các tổ chức nước ngoài như: WWF, DANIDA, NUFU... điều đó, đã giúp các nhà khoa học Việt Nam có cơ hội nghiên cứu và có nhiều công trình nghiên cứu tiêu biểu. Đặc biệt, lập bản đồ môi trường sống sinh vật nhận nhiều sự chú ý [40]. Tuy nhiên, các nghiên cứu thường đơn thuần sử dụng phương pháp khảo sát tại chỗ (in-situ) truyền thống sau đó, tiến hành xây dựng bản đồ trên vị trí RSH được khảo sát. Do đó, phương pháp này tốn thời gian, cần nhiều nhân lực và độ chính xác của kết quả chưa được giới nhà khoa học đánh giá cao [41]. Vì vậy, việc ứng dụng công nghệ viễn thám để đánh giá hiện trạng và theo dõi sự thay đổi các RSH là cần thiết. Qua đó, trong tương lai sẽ trở thành công cụ đắc lực để hỗ trợ các nhà quy hoạch đưa ra những giải pháp, chính sách phù hợp cho việc bảo vệ RSH ở Việt Nam.

Dưới sự hỗ trợ của chương trình bảo vệ môi trường Liên hợp quốc (UNEP) và mạng lưới giám sát RSH toàn cầu (ICRAN), Tổng Phước Hoàng Sơn và cộng sự (2004) thuộc Viện Hải dương học Nha Trang, sau hai năm đã thử nghiệm áp dụng phương pháp viễn thám và GIS trong xây dựng bản đồ phân bố các thành phần của RSH ở vùng ven bờ tỉnh Ninh Thuận dựa trên các ảnh Landsat 4, Landsat 7, ASTER với những kết quả khả quan [31]. Từ đó, đã tạo tiền đề ứng dụng hiệu quả phương pháp này vào xây dựng bản đồ phân bố RSH ở vùng ven bờ biển Đà Nẵng, Ninh Thuận, Phú Quốc và Côn đảo. Đến năm 2011, kết quả của dự án JAXA sử dụng ảnh AVNIR2, SPOT4-5, Formosat2, Landsat ETM⁺ đã được xây dựng bản đồ phân bố RSH ở một số khu vực tại Việt Nam với tổng diện tích khoảng 6982ha: Đảo Cô Tô (256 ha); Bạch Long Vĩ (133 ha), Côn Cò (72 ha); Vùng ven biển Đà Nẵng (104 ha); Cù Lao Chàm (165 ha); Vùng ven biển Quảng Nam (95 ha); Vùng nước ven biển của tỉnh Phú Yên (303 ha); Vùng nước ven biển tỉnh Khánh Hòa (3266 ha); Vùng nước ven biển tỉnh Ninh Thuận (1000 ha); Côn Đảo (743 ha); Quần đảo An Thới và Phú Quốc (469 ha); Quần đảo Nam Du (242 ha) và Thổ Chu (134 ha) [42].

Kết quả thống kê việc ứng dụng viễn thám vào RSH tại Việt Nam cho thấy (Bảng 1), mục đích của hầu hết các nghiên cứu này chủ yếu là thành lập bản đồ phân bố và xác định diện tích các RSH, điển hình nghiên cứu của Nguyễn Văn Long tại Đà Nẵng (2007) và Cù Lao Chàm (2017) thành lập bản đồ phân bố theo độ rộng của RSH bằng việc kết hợp dữ liệu ảnh landsat 7 ETM+, ASTER, và Sentinel 2 [43], [50]. Gần đây, nghiên cứu của Đỗ Huy Cường (2019) tại đảo Nam Yết đã sử dụng viễn thám độ phân giải không gian cao VNRedsat-1 và QuickBird để xây dựng bản đồ RSH nhưng thể hiện mức chi tiết phân bố các RSH theo

độ phù với 06 mức độ: (1) Khu vực san hô phát triển tốt, phân bố ở độ sâu lớn; (2) Khu vực san hô phát triển tốt phân bố ở độ sâu nhỏ; (3) Khu vực san hô phát triển tốt chịu tác động mạnh của sóng và dòng chảy; (4) Khu vực san hô phát triển kém; (5) Khu vực san hô chết; (6) Khu vực cát, san, sỏi cuội san hô phong hóa. Bên cạnh việc thành lập bản đồ phân bố RSH, một số nghiên cứu gần đây đã hướng đến

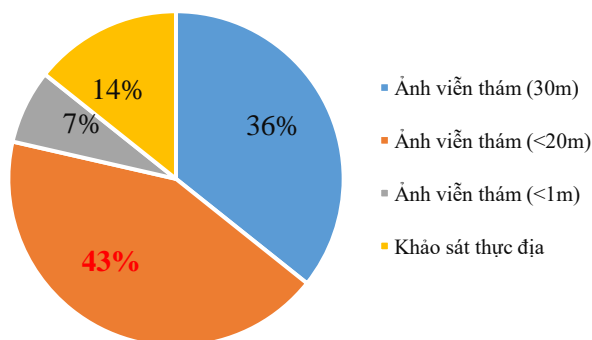
việc đánh giá sự thay đổi diện tích RSH. Nghiên cứu của Nguyễn Văn Long và cs. tại vịnh Nha Trang đã đánh giá sự biến động diện tích RSH đã suy giảm 82 ha trong giai đoạn 2002-2005 [39]. Nghiên cứu của Phan Kiều Diễm và cs. đã đánh giá sự thay đổi diện tích san hô từ 1999 đến 2010 tại Núi Thành (Quảng Nam) với các độ phù khác nhau bằng dữ liệu ảnh viễn thám Landsat và Quickbird [36].

Bảng 1. Ứng dụng viễn thám vào RSH tại Việt Nam

Khu vực nghiên cứu	Tác giả	Thời gian	Dữ liệu ảnh	Kết quả	Phương pháp sử dụng
Hòn Cháo và Sơn Trà, TP. Đà Nẵng	Nguyễn Văn Long & cs. [43]	2007	Landsat 7 ETM+ (30m) ASTER (15m)	- Bản đồ phân bố RSH	- Khảo sát thực địa: Mặt cắt điểm, Manta tow - Phương pháp phân loại hình hộp
Tỉnh Khánh Hòa	Tổng Phước Hoàng Sơn & cs. [44]	2008	ALOS-AVNIR2 (10m)	- Bản đồ quần xã đáy RSH	- Khảo sát thực địa: Mặt cắt điểm, mặt cắt ngang, Manta tow - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại theo khoảng cách Mahalanobis
Các quần đảo và vùng ven biển Việt Nam	Tổng Phước Hoàng Sơn & cs [32]	2011	AVNIR2 (10m), SPOT4-5 (10-20m), Formosat2 (8), Landsat ETM+ (30m)	- Bản đồ đặc điểm nền đáy RSH	- Khảo sát thực địa: Mặt cắt điểm - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại theo khoảng cách Mahalanobis
Đảo Tam Hải, tỉnh Quảng Nam	Phan Kiều Diễm & cs. [46]	2012	Landsat, Quickbird (61cm)	- Bản đồ biến động độ phủ RSH	- Khảo sát thực địa: Theo đường cắt ngang và quadrat - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại Maximum Likelihood
Ninh Hải, tỉnh Ninh Thuận	Lâu Và Khin & cs. [41]	2014	Landsat 8 OLI (30m)	- Bản đồ quần xã đáy RSH	- Khảo sát thực địa: Các điểm ngẫu nhiên - Hiệu chỉnh lóe theo phương pháp Hedley (2005) - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại Maximum Likelihood
Đảo Lý Sơn, tỉnh Quảng Ngãi	Nguyễn Quang Hào & cs. [48]	2015	Landsat 8 OLI (30m)	- Bản đồ quần xã đáy RSH	- Khảo sát thực địa: Theo đường cắt ngang - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại có kiểm định (không trình bày cụ thể)
Vịnh Nha Trang	Nguyễn Văn Long & cs. [49]	2016	Landsat 8 (30m) SPOT5 (10m) ALOS-AVNIR2 (10m) Orbview 3 (4m)	- Bản đồ phân bố và so sánh biến động RSH	- Khảo sát thực địa: Theo mặt cắt điểm - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại có kiểm định (không trình bày cụ thể)
Cù Lao Chàm, tỉnh Quảng Nam	Nguyễn Văn Long & cs. [50]	2017	Sentinel (10m)	- Bản đồ phân bố RSH	- Khảo sát thực địa: Theo mặt cắt điểm - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại Maximum Likelihood
Đảo Nam Yết, quần đảo Trường Sa	Đỗ Huy Cường & cs. [51]	2019	VNRedsat-1 và QuickBird	- Bản đồ phân bố RSH theo độ phủ	- Khảo sát thực địa theo đường cắt ngang - Hiệu chỉnh cột nước theo Lyzenga - Phân loại không kiểm định ISO- Data

Hầu hết các nghiên cứu lập bản đồ RSH từ hình ảnh vệ tinh đã được thực hiện cho kết quả cụ thể ở phạm vi rộng so với phương pháp khảo sát thực địa [12]. Tuy nhiên, độ phân giải của ảnh viễn thám chất lượng cao sẽ góp phần giúp việc giải đoán và xây dựng bản đồ RSH một cách chính xác hơn. Hiện nay, các nghiên cứu ở Việt Nam sử dụng ảnh viễn thám ở độ phân giải trong phạm vi từ 10m đến 30m để giải đoán. Trong đó, ảnh viễn thám có độ phân giải <20 m được sử dụng nhiều nhất (43%), tiếp đến là ảnh viễn thám 30 m với 36%.

Kể từ năm 2004 đến nay, Việt Nam đã có những thành tựu nhất định về nghiên cứu thành lập các bản đồ RSH, những kết quả nghiên cứu đã giúp các nhà quản lý, nhà bảo tồn có một bức tranh tổng quát về hiện trạng RSH



Hình 3. Tỷ lệ hình ảnh viễn thám và phương pháp sử dụng thành lập bản đồ RSH

hiện nay ở Việt Nam. Tuy nhiên, mức độ ứng dụng ảnh viễn thám trong việc giám sát RSH ở Việt Nam vẫn còn ở mức hạn chế, việc thành lập các bản đồ phân bố RSH chủ yếu chỉ thể hiện thực trạng tại thời điểm nghiên cứu, ít có tính liên kết theo chuỗi dài quan sát thường xuyên. Kết quả là, các chính sách và hành động cho phát triển bền vững và bảo tồn các hệ sinh thái RSH khó thực hiện.

3.3. Định hướng tương lai trong xây dựng bản đồ và giám sát RSH tại Việt Nam

Hai nghiên cứu gần đây của Nguyễn Văn Long [49] và Đỗ Huy Cường [51], bước đầu đã mở ra tiềm năng mới cho các nhà nghiên cứu RSH khác bằng cách sử dụng ảnh viễn thám để hồi cứu sự biến động các RSH hay lập bản đồ phân bố chi tiết nhất theo độ phủ san hô. Hai tiềm năng này, đã được các quốc gia trên thế giới vận dụng vào việc quản lý và phục hồi các RSH [13]. Hiện nay, các phương pháp khảo sát thực địa để xây dựng dữ liệu nhằm phục vụ cho việc giải đoán ảnh viễn thám của nghiên cứu ở Việt Nam như: Manta tow, khảo sát theo mặt cắt hay các theo các điểm tại chỗ (điểm chia khóa)... là phù hợp với việc xây dựng bản đồ RSH. Tuy nhiên, những dữ liệu khảo sát thực địa nhằm phục vụ cho việc giải đoán ảnh viễn thám theo hai tiềm năng trên, yêu cầu phải đảm bảo tất cả môi trường xung quanh RSH thể hiện đầy đủ và đối tượng chính (RSH) cần được thể hiện chi tiết. Do đó, phương pháp thu mẫu cần áp dụng theo phương pháp ngẫu nhiên phân tầng để đa dạng hóa lượng mẫu và thể hiện phạm vi rộng lớn, độ chính xác cao hơn [13]. Hạn chế lớn nhất của phương pháp này là thời gian và chi phí khảo sát thực tế. Từ năm 2011 đến nay, tại Cù Lao Chàm, hằng năm Khu bảo tồn biển Cù Lao Chàm (Cham MPA) đã tổ chức chương trình giám sát RSH trong khu bảo tồn, trong đó, có công việc xác định độ phủ rạn san hô. Với cơ sở dữ liệu nền liên tục qua các năm, thì trong tương lai, để việc quản lý hệ sinh thái RSH một cách bền vững và có hiệu quả thì việc ứng dụng viễn thám theo dõi sự biến động các RSH là cấp thiết, phần nào giúp tiết kiệm được chi phí khảo sát thực địa và cho kết quả nhanh chóng.

Những khó khăn hiện nay của các nhà nghiên cứu ở Việt Nam, trong việc xử lý ảnh viễn thám là cấu trúc RSH riềm không điển hình, chiều rộng dưới 200 m, độ phủ RSH thưa thớt... do đó, rất khó để phân biệt, giải đoán giữa các thành phần đáy chi tiết với các ảnh độ phân giải trung bình như Landsat. Nghiên cứu của Trần Văn Diên [52] sử dụng ALOS AVNIR-2 với độ phân giải 10 m đã ghi nhận độ chính xác của bản đồ các hệ sinh thái ở khu vực nghiên cứu Nha Trang thấp hơn 50%. Bởi vì, địa mạo, viền RSH hẹp tại Nha Trang dẫn đến nhiều loại thành phần đáy khác thể hiện trong cùng một điểm ảnh nên dẫn đến việc sai số trong giải đoán cao. Do đó, độ chính xác của bản đồ RSH là tỷ lệ thuận với độ phân giải không gian [52]. Chính vì vậy, trong các nghiên cứu tiếp theo, các nhà khoa học nên sử dụng các ảnh viễn thám có độ phân giải cao trong việc nghiên cứu các RSH để đạt được được độ tin cậy tốt hơn. Ngoài ra, nên tận dụng nguồn dữ liệu miễn phí (Landsat hay Sentinel 2) cho các nghiên cứu ở quy mô lớn.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kết quả tổng hợp, xu hướng tiếp cận các phương pháp áp dụng thành lập bản đồ RSH từ đầu thế

ki XX đến nay trên thế giới, bao gồm: Phác thảo bản đồ, ảnh viễn thám thụ động, chủ động với độ chính xác ngày càng cải thiện nhờ sự phát triển nhanh chóng về khoa học và công nghệ. Trong đó, viễn thám đang được các quốc gia ứng dụng rộng rãi trong việc xây dựng bản đồ phân bố và giám sát RSH. Bởi vì, viễn thám cung cấp một cách tiếp cận hiệu quả so với phương pháp khảo sát thực địa trong việc xây dựng bản đồ và giám sát RSH một cách nhanh chóng. Mặc dù, việc ứng dụng ảnh viễn thám trong thành lập bản đồ RSH được ứng dụng tại nhiều khu vực tại Việt Nam nhưng vẫn còn sự hạn chế về việc ứng dụng giám sát không liên tục, hạn chế về qui mô và kinh phí nghiên cứu gây ra khó khăn trong việc giám sát một cách có hệ thống các RSH tại Việt Nam. Các giới hạn về dữ liệu viễn thám độ phân giải cao cũng gây khó khăn trong việc thành lập bản đồ chi tiết các rạn san hô. Do đó, việc áp dụng viễn thám vào các NC RSH tại Việt Nam nên theo hướng sử dụng các ảnh vệ tinh độ phân giải trung bình với nguồn dữ liệu miễn phí (Landsat, Sentinel 2) để đánh giá sự phân bố ở quy mô lớn (khu vực hoặc quốc gia), đánh giá các biến động dài hạn để nhận tạo nên lịch sử phát triển của RSH. Trong khi đó, các dữ liệu ảnh vệ tinh thương mại độ phân giải cao nên được sử dụng trong các nghiên cứu quy mô nhỏ với độ chi tiết cao để cung cấp dữ liệu tin cậy cho công tác quản lý ở cấp độ địa phương. Bên cạnh đó, cần xây dựng thống nhất các phương pháp, chương trình giám sát dài hạn RSH kết hợp giữa khảo sát thực địa và viễn thám để vừa đảm bảo độ chính xác, chi tiết cũng như vừa tạo dữ liệu ở quy mô không gian lớn.

Lời cảm ơn: Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ của Bộ giáo dục và Đào tạo qua thông đề tài: “*Ứng dụng viễn thám và GIS đánh giá hiện trạng phân bố và phân vùng bảo vệ rạn san hô ở Quảng Nam và Đà Nẵng*”, thuộc Chương trình KH&CN cấp Bộ, mã số B2019-DNA-04.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] P. J. Hedley, J. D., Roelfsema, C. M., Chollett, I., Harborne, A. R., Heron, S. F., Weeks, S.,... & Mumby, “No Title Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: a review”, *Remote Sensing*, 8(2), 118, 2016.
- [2] J. H. Connell and The, “Diversity in tropical rain forests and coral reefs”, *Ecosystems*, vol. 11, no. 6, pp. 1302–1310, 1978, doi: 10.2307/4081809.
- [3] D. R. B. T. P. Hughes, “Regional-Scale Assembly Rules and Biodiversity of Coral Reefs”, *Sci.* 292, 1532, 2001, doi: 10.1126/science.1058635.
- [4] C. R. Wilkinson, “Status of coral reefs of American Samoa and Micronesia: US-affiliated and freely associated islands of the Pacific”, *Status of Coral Reefs of the World: 2000*. pp. 199–217, 2000.
- [5] F. Moberg and C. Folke, “Ecological goods and services of coral reef ecosystems”, *Ecological Economics*, vol. 29, no. 2. pp. 215–233, 1999, doi: 10.1016/S0921-8009(99)00009-9.
- [6] L. Burke, K. Reytar, M. Spalding, and A. Perry, “*Reefs at Risk Revisited*”, World Resources Institute, 2011.
- [7] C. Costanza, R., & Folke, “*Valuing ecosystem services with efficiency, fairness and sustainability as goals*”, Island press, 1997.
- [8] M. Bryant, D., Burke, L., McManus, J.W., Spalding, “Reefs at risk: a map-based indicator of threats to the world’s coral reefs”, *In World Resources Institute.*, 1998. <https://www.worldfishcenter.org/>.
- [9] T. Pandolfi, J.M.; Bradbury, R.H.; Sala, E.; Hughes, “Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems”, *Sci.* 301, 2003.
- [10] L. Cesar, H, and Burke, L. and Pet-Soede, “*The Economics of Worldwide Coral Reef Degradation*”, International Coral Reef Action Network, 2003.

- [11] C. Wilkinson, "Status of Coral Reefs of the World", in *Global Coral Reef Monitoring Network and Reef and Rainforest Research Centre: Townsville, QLD, Australia*, 2008.
- [12] J. T. Mumby, P.J.; Skirving, W.; Strong, A.E.; Hardy, "Remote sensing of coral reefs and their physical environment", *Mar. Pollut. Bull.* 48, 2004.
- [13] P. J. M. Edmund P. Green and A. J. E. and C. D. Clark, *Remote sensing handbook for tropical coastal management*. UNESCO, 2002.
- [14] F. Debenham, "Map making", *Blackie*, 1956.
- [15] D. Stoddart, "Mapping reef and islands. Coral Reefs Research Methods. Monographs on Oceanographic Methodology", UNESCO, 1978.
- [16] C. M. R. and et. John D. Hedley, "Remote Sensing of Coral Reefs for Monitoring and Management: A Review", *Remote Sens.* 8, 118, 2016.
- [17] F. E. M.-K. and et. al Serge ANDRÉFOUËT, "Global assessment of modern coral reef extent and diversity for regional science and management applications: a view from space", Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium, 1732-1745, 2006.
- [18] John D.Hedley Hedley and et.al, "Coral reef applications of Sentinel-2: Coverage, characteristics, bathymetry and benthic mapping with comparison to Landsat 8", *Remote Sensing of Environment, Volume 216, page 598-614*, 2018.
- [19] S. Roelfsema, C., Phinn, S., Jupiter, S., Comley, J., & Albert, "Mapping coral reefs at reef to reef-system scales, 10s–1000s km2, using object-based image analysis", *Int. J. Remote sensing*, 34(18), 6367-6388, 2013.
- [20] C. Capolsini, P., Andréfouët, S., Rion, C., Payri, "A comparison of Landsat ETM+, SPOT HRV, Ikonos, ASTER, and airborne MASTER data for coral reef habitat mapping in South Pacific islands", *Can. J. Remote Sens.*, vol. 29, 187–20, 2003.
- [21] E. P. G. Mumby, P. J., C. D. Clark, "Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs", *Remote sensing, vol. 19, no. 1, 203±210*, 1998.
- [22] A. Bruckner, G. Rowlands and et.al, "Atlas of Saudi Arabian Red Sea Marine Habitats", Panoramic Press, Phoenix, AZ USA, 2012.
- [23] M. Nurlidiasari, "The Application of QuickBirdand Multi-temporal Landsat TM Data for Coral Reef Habitat Mapping CaseStudy:DerawanIsland, East Kalimantan, Indonesia", International Institute For Geo-Information Science And Earth Observation Enschede, The Netherlands, 2004.
- [24] J. A. T. Benfield, S. L., Guzman, H. M., Mair, J. M., & Young, "Mapping the distribution of coral reefs and associated sublittoral habitats in Pacific Panama: a comparison of optical satellite sensors and classification methodologies", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 28(22), 50, 2007.
- [25] P. Wicaksono, "Improving the accuracy of Multispectral-based benthic habitats mapping using image rotations: the application of Principle", *Eur. J. Remote Sens.*, vol. 49(1), 433, 2016.
- [26] S. Roelfsema, C., Phinn, S., Jupiter, S., Comley, J., & Albert, "Mapping coral reefs at reef to reef-system scales, 10s–1000s km2, using object-based image analysis", *Int. J. Remote Sens.*, vol. 34(18), 63, 2013.
- [27] C. D. C. Mumby P. J., E. P. Green, A. J. Edwards, "Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide?", *Mar. Biol.* 130 193-202, 1997.
- [28] K. E. Roelfsema, C. M., Phinn, S. R., & Joyce, "Evaluating benthic survey techniques for validating maps of coral reefs derived from remotely sensed images", *Proc 10th Int Coral Reef Symp*, Vol. 1, pp. 1771-1780, 2006.
- [29] S. R. Roelfsema, C. M., & Phinn, "Integrating field data with high spatial resolution multispectral satellite imagery for calibration and validation of coral reef benthic community maps", *J. Appl. Remote Sensing*, 4(1), 043527, 2010.
- [30] S. Contreras-Silva, A. I., López-Caloca, A. A., Tapia-Silva, F. O., & Cerdeira-Estrada, "Satellite remote sensing of coral reef habitats mapping in shallow waters at banco chinchorro reefs, México: a classification approach", *Remote Sensing—Applications; Escalante, B., Ed.; InTech Rijeka, Croat.* 331-354, 2012.
- [31] P. Hedley, J., Harborne, A., Mumby, "Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos", *Int. J. Remote Sens.* 26, 2107-2112, 2005.
- [32] C. Green, E., Mumby, P., Edwards, A., Clark, *Remote Sensing: Handbook for Tropical Coastal Management*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2000.
- [33] D. Lyzenga, "Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data", *Int. J. Remote Sens.* 2, 71-82, 1981.
- [34] L. Hang, N. T. T., Hoa, N. T., Son, T. P. H., & NGOC, "Vegetation Biomass of Sargassum Meadows in An Chan Coastal Waters, Phu Yen Province, Vietnam Derived from PlanetScope Image", *J. Environ. Sci. Eng.* 8, 81-92, 2019.
- [35] C. Dien, T. V., Phinn, S., & Rofffsema, "Coral Reef Mapping in Vietnam's Coastal Waters from High-spatial Resolution Satellite and Field Survey Data", *Asian J. Geoinformatics*, 12(2), 2012.
- [36] W. Wicaksono, P., & Lazuardi, "Assessment of PlanetScope images for benthic habitat and seagrass species mapping in a complex optically shallow water environment", *Int. J. Remote sensing*, 39(17), 5739-5765, 2018.
- [37] T. P. S. Grant, "Reef Aerial Photography from a Kite T.P.", *Coral Reefs (1982)1:67-69*, 1982.
- [38] A. C. and et. a. Elisa Casella, "Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques", *Coral Reefs*, 2016, doi: 10.1007/s00338-016-1522-0.
- [39] J. D. Hedley et al., "Remote sensing of coral reefs for monitoring and management: A review", *Remote Sensing*, vol. 8, no. 2. 2016, doi: 10.3390/rs8020118.
- [40] Võ Sĩ Tuấn và cs., *Giám sát rạn san hô vùng biển ven bờ Việt Nam*. Nhà xuất bản Nông nghiệp, 2008.
- [41] H.-S. T. P. Va-Khin Lau, Chi-Farn Chen, "Mapping seagrass beds and coral reefs in the coastal of Ninh Hai district, Ninh Thuan province of Vietnam using Landsat 8 OLI image", American Geophysical Union, Fall Meeting 2015.
- [42] Tong Phuoc Hoang Son, "Application of ALOS imageries for monitoring coral health in coastal waters of VietNam", Final Reports of the ALOS Research Announcement Programs 1&2, 2011, 2011.
- [43] Nguyễn Văn Long & cs., "Điều tra, nghiên cứu rạn san hô và các hệ sinh thái liên quan vùng biển từ Hòn Chảo đến Nam đảo Hải Vân và bán đảo Sơn Trà", Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2007.
- [44] Tống Phước Hoàng Sơn và cs., "Điều tra hiện trạng phân bố hệ sinh thái rạn san hô vùng biển ven bờ tỉnh Khánh Hòa làm cơ sở quy hoạch, bảo vệ, phục hồi và sử dụng bền vững", Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 2008.
- [45] Nguyễn Văn Hiếu, "Nghiên cứu thành phần loài, cấu trúc quần xã san hô cứng và hình thái rạn san hô ven đảo Phú Quý tỉnh Bình Thuận", Luận văn Thạc sĩ, Đại học Quốc gia Hà Nội, 2010.
- [46] Phan Kiều Diễm & cs., *Ứng dụng ảnh vệ tinh Quickbird xây dựng bản đồ phân bố rạn san hô nuam 2012 xã Tam Hải, Huyện Núi Thành, tỉnh Quảng Nam*. Hội nghị ứng dụng GIS toàn quốc 2012, 2012.
- [47] H. T. T. & P. K. H. Si Tuan Vo, Lyndon DeVantier, "Ninh Hai waters (south Vietnam): a hotspot of reef corals in the western South China Sea", *Raffles Bull. Zool.* 62 513–520, 2014.
- [48] Nguyễn Hào Quang và cs., "Nghiên cứu phân bố san hô ven đảo Lý Sơn bằng công nghệ GIS và Viễn thám", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*; Tập 15, Số 3; 2015 264-272, 2015, doi: 10.15625/1859-3097/15/3/7222.
- [49] Nguyễn Văn Long và Tống Phước Hoàng Sơn, "Hiện trạng và biến động diện tích các hệ sinh thái biển tiêu biểu trong vịnh Nha Trang", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*; Tập 17, Số 4; 2017 469-479, 2016, doi: 10.15625/1859-3097/17/4/8459.
- [50] Nguyễn Văn Long & cs., "Điều tra và đề xuất giải pháp quản lý, sử dụng bền vững đối với tài nguyên đa dạng sinh học ở Khu Dự trữ sinh quyển thế giới Cù Lao Chàm – Hội An", Ban quản lý khu dự trữ sinh quyển thế giới Cù lao chàm – Hội An, 2017.
- [51] Đỗ Huy Cường & cs., "Nghiên cứu môi trường biển và phân bố san hô khu vực đảo Nam Yết sử dụng ảnh VNRedsat-1 và QuickBird", *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Biển*, Tập 19, Số 3B; 2019 189–202, 2019, doi: doi.org/10.15625/1859-3097/19/3B/14525.
- [52] C. R. Van Dien TRAN, Stuart PHINN, "Coral Reef Mapping in Vietnam's Coastal Waters from ALOS AVNIR-2 Satellite Image and Field Survey Data", 31st Asian Conference on Remote Sensing 2010, ACRS 2010, Hanoi, Vietnam, 2010.