

**BỘ GIÁO DỤC VÀ
ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



LÊ VŨ HỒNG HẢI

**NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN
TỈNH BẾN TRE BẰNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM ĐA TẦNG,
ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN**

LUẬN ÁN TIẾN SỸ KHOA HỌC TRÁI ĐẤT

HÀ NỘI – 2026

**BỘ GIÁO DỤC VÀ
ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



LÊ VŨ HỒNG HẢI

**NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN
TỈNH BẾN TRE BẰNG CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM ĐA TẦNG,
ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN**

LUẬN ÁN TIẾN SỸ KHOA HỌC TRÁI ĐẤT

Ngành: Địa lý tài nguyên và môi trường

Mã số: 9 44 02 20

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

1. PGS.TS. Phạm Việt Hòa

2. TS. Hồ Đình Duẩn

HÀ NỘI - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: " Nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gia." là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

Hà Nội, ngày tháng năm 2026
Tác giả luận án

Lê Vũ Hồng Hải

LỜI CẢM ƠN

Luận án được hoàn thành tại Khoa Địa lý - Học viện Khoa học và Công nghệ - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS Phạm Việt Hòa và TS. Hồ Đình Duẩn (Viện Khoa học sự sống - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam).

Trong quá trình thực hiện luận án tại Khoa Địa lý, NCS luôn được sự động viên và hướng dẫn tận tình của các thầy, cô giáo trong Khoa Địa lý- Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Khoa học sự sống.

Nghiên cứu sinh bày tỏ lòng biết ơn chân thành đến Khoa Địa lý (Học viện Khoa học và Công nghệ), Ban chủ nhiệm Đề tài KHCN cấp nhà nước, mã số VT-UD.03/16-20.

Nghiên cứu sinh bày tỏ lòng biết ơn chân thành sự hướng dẫn tận tình của PGS.TS Phạm Việt Hòa và TS Hồ Đình Duẩn đã tạo điều kiện giúp đỡ nghiên cứu sinh trong suốt quá trình hoàn thành luận án. Xin chân thành cảm ơn đến các đồng nghiệp đã giúp đỡ nghiên cứu sinh trong quá trình làm luận án: TS. Trần Thị Vân, PGS.TS. Trịnh Lê Hùng, TS. Nguyễn Như Hùng và nnk.

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	II
MỤC LỤC	III
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT	VII
DANH MỤC HÌNH ẢNH	X
MỞ ĐẦU.....	1
1. Tính cấp thiết của luận án.....	1
2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu	2
2.1. Mục tiêu nghiên cứu	2
2.2. Nội dung nghiên cứu.....	2
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	3
4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn	4
4.1. Ý nghĩa khoa học	4
4.2. Ý nghĩa thực tiễn.....	4
5. Các luận điểm bảo vệ	4
6. Điểm mới của luận án.....	4
7. Cơ sở tài liệu, số liệu nghiên cứu của Luận án	5
7.1. Tài liệu tham khảo, cập nhật có nội dung liên quan đến luận án.....	5
7.2. Các đề tài nghiên cứu, công trình khoa học NCS tham gia thực hiện có liên quan đến luận án	5
7.3. Tài liệu, số liệu do luận án bổ sung, tính toán trực tiếp.....	5
8. Cấu trúc luận án	6
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM ĐA TẦNG, ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN TRONG NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN	7
1.1. Các nghiên cứu ứng dụng viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu nhiễm mặn trên thế giới.....	7
1.1.1. Phổ mặt đất.....	7
1.1.2. Viễn thám đa phổ	7
1.1.3. Viễn thám siêu phổ.....	12

1.1.4. Viễn thám Radar.....	13
1.2. Các nghiên cứu ứng dụng viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu nhiễm mặn trong nước.....	17
1.2.1. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian	17
1.2.2. Viễn thám trong nghiên cứu xâm nhập mặn và đất nhiễm mặn.	19
1.3. Cơ sở khoa học trong nghiên cứu nhiễm mặn	22
1.3.1. Nhiễm mặn và đất mặn	22
1.3.2. Cơ chế của nhiễm mặn và mặn hóa đất	23
1.3.3. Độ mặn của đất	26
1.3.4. Phân loại đất mặn.....	27
1.3.5. Các phương pháp truyền thống xác định nhiễm mặn bằng độ mặn của đất	30
CHƯƠNG 2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP LUẬN KẾT HỢP TƯ LIỆU VIỄN THÁM ĐA TẦNG, ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN TRONG NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN.....	33
2.1. Cơ sở khoa học ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu, đánh giá, phân vùng nhiễm mặn	33
2.1.1. Đặc trưng cơ bản của viễn thám quang học.....	33
2.1.2. Các dấu hiệu nhận biết đất nhiễm mặn từ ảnh viễn thám	34
2.1.3. Đặc điểm phổ phản xạ của đất trong nghiên cứu nhiễm mặn.....	37
2.1.4. Đặc điểm phản xạ phổ của thực vật trong nghiên cứu nhiễm mặn.....	41
2.1.5. Đặc điểm phản xạ của nước	42
2.1.6. Các chỉ số viễn thám trong nghiên cứu nhiễm mặn.....	44
2.1.7. Cơ sở khoa học ứng dụng viễn thám Radar trong nghiên cứu nhiễm mặn	48
2.2. Cơ sở khoa học một số thuật toán machine learning trong ứng dụng nghiên cứu nhiễm mặn.....	50
2.2.1. Neural Networks	50
2.2.2. Gaussian Process.....	51
2.2.3. Support Vector Regression	52
2.2.4. Random Forests	52
Kết luận	53
CHƯƠNG 3. ỨNG DỤNG VIỄN THÁM TRONG NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG ẢNH HƯỞNG NHIỄM MẶN TỈNH BẾN TRE	54
3.1. Khái quát về khu vực nghiên cứu	54
3.1.1. Khái quát về tỉnh Bến Tre.....	54
3.1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến xu thế nhiễm mặn tại tỉnh Bến Tre	62

3.1.3. Thực trạng nhiễm mặn ở tỉnh Bến Tre.....	65
3.2. Nghiên cứu ứng dụng đánh giá và phân vùng nhiễm mặn bằng tư liệu viễn thám radar - thí điểm ở Bến Tre.....	83
3.2.1. Quy trình phương pháp tiếp cận nghiên cứu đánh giá nhiễm mặn trên đất bằng tư liệu ảnh radar	83
3.2.2. Kết quả ứng dụng tư liệu viễn thám radar Sentinel-1 trong đánh giá, phân vùng nhiễm mặn tại Bến Tre.....	86
3.3. Nghiên cứu ứng dụng đánh giá và phân vùng nhiễm mặn bằng tư liệu viễn thám quang học - thí điểm ở Bến Tre.....	92
3.3.1. Dữ liệu ảnh viễn thám quang học trong nghiên cứu nhiễm mặn.....	92
3.3.2. Xử lý và đồng bộ dữ liệu thực địa	94
3.3.3. Quy trình tích hợp dữ liệu và phân vùng nhiễm mặn	96
3.3.4. Ứng dụng đánh giá phân vùng nhiễm mặn bằng ảnh Sentinel-2 khu vực Bến Tre	103
3.3.5. Ứng dụng đánh giá phân vùng nhiễm mặn bằng ảnh LANDSAT khu vực Bến Tre	107
3.4. Thành lập bản đồ phân vùng nhiễm mặn các thời kỳ.....	111
3.4.1. Phân vùng nhiễm mặn đất trồng lúa	112
3.4.2. Phân vùng nhiễm mặn toàn tỉnh Bến Tre	117
3.5. Đánh giá thực trạng và diễn biến nhiễm mặn.....	121
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.....	129
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ.....	132
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	133
PHỤ LỤC	1
Phụ lục 1. Bản đồ diễn biến xâm nhập mặn tại Bến Tre	1
Phụ lục 2: Các tham số của đất được phân tích trong phòng thí nghiệm.....	4
Phụ lục 3: Mô hình tương quan giữa EC với các chỉ số.....	11
Phụ lục 4: Diện tích đất mặn qua các năm (ha).....	22
Phụ lục 5: Bản đồ thổ nhưỡng tỉnh Bến Tre năm 2003	26
Phụ lục 6: Bản đồ phân vùng mặn và hiện trạng sử dụng đất tỉnh Bến Tre	27
Phụ lục 7: Dữ liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong luận án	28
Phụ lục 8: Code for LANDSAT.....	37

Phụ lục 9: Code for Sentinel-2.....44

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Thuyết minh
BDKH		Biến đổi khí hậu
BI	Brightness Index	Chỉ số độ sáng
CART	Classification and Regression Trees	Cây phân loại hồi quy
CSDL		Cơ sở dữ liệu
DEM	Digital Elevation Model	Mô hình số độ cao
ĐBSCL		Đồng bằng sông Cửu Long
EC	Electrical Conductivity	Độ dẫn điện
EM	Electromagnetic	Điện từ
EVI	Enhanced Vegetation Index	Chỉ số thực vật tăng cường
FAO		Tổ chức nông lương thế giới
GDVI	Greenness Difference Vegetation Index	Chỉ số thực vật xanh
GLCM	Grey Level Co-Occurrence Matrix	Ma trận đồng dạng cấp độ xám
GP	Gaussian Processes	Quy trình Gauss
LAI	Leaf Area Index	Chỉ số diện tích lá
MLP-NN	Multilayer Perceptron Neural Network	Mô hình Mạng nơ ron đa lớp
NDSI	Normalized Difference Salinity Index	Chỉ số khác biệt độ mặn
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Chỉ số thực vật chuẩn
NDWI	Normalized Difference Water Index	Chỉ số khác biệt hàm lượng nước
NIR	Near Infrared	Cận hồng ngoại
NN	Neural Network	Mạng nơ ron thần kinh
RBF-NN	Radial Basis Function Neural Network	Mô hình mạng nơ ron hướng tâm

RF	Random Forest	Mô hình phân loại rừng cây ngẫu nhiên
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Chỉ số thực vật hiệu chỉnh nền đất
SI	Salinity Index	Chỉ số độ mặn
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission	Thông tin nền địa hình thành lập từ ảnh vệ tinh Radar
SVR	Support Vector Regression	Mô hình phân tích hồi quy vector hỗ trợ
SWIR	Short Wave Infrared	Hồng ngoại sóng ngắn
TIR	Thermal Infrared	Hồng ngoại nhiệt
VI	Vegetation Index	Chỉ số thực vật
VIS	Visible	Vùng khả kiến (nhìn thấy)
XNM		Xâm nhập mặn

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2-1. Phân cấp độ mặn trong đất theo EC (dS/m)	27
Bảng 2-2. Phân cấp độ mặn nước tưới.....	27
Bảng 2-3. Phân loại một số loại đất mặn	28
Bảng 2-4. Phân chia cấp độ mặn ảnh hưởng tới cây trồng.....	28
Bảng 2-5. Phân cấp độ mặn theo FAO.....	29
Bảng 2-6. Phân cấp độ mặn theo hàm lượng 4 chỉ tiêu trong đất.....	29
Bảng 2-7. Một số chỉ số thực vật phổ biến sử dụng trong nghiên cứu xâm nhập mặn [60]	45
Bảng 2-8. Các kênh chỉ số muối có khả năng ứng dụng cho ảnh Sentinel2 và ảnh LANDSAT [77]	46
Bảng 2-9. Các chỉ số vật lý khác.....	47
Bảng 2-10. Bước sóng và tần số dùng trong viễn thám radar.....	48
Bảng 3-1. Giá trị mặn lớn nhất theo các năm các trạm khu vực tỉnh Bến Tre (g/l).....	72
Bảng 3-2: Kết quả mô hình thuật toán Multilayer Perceptron Neural Network.....	87
Bảng 3-3. Kết quả mô hình thuật toán Radial Bases Function Neural Network.....	88
Bảng 3-4. Bảng tổng hợp kết quả của 5 mô hình thuật toán machine learning ở khu vực nghiên cứu.....	89
Bảng 3-5. Các tham số của ảnh Sentinel-2 và LANDSAT.....	92
Bảng 3-6. Giá trị EC tổng quát hóa theo các loại lớp phủ trên ảnh Sentinel-2	95
Bảng 3-7. Giá trị EC tổng quát hóa theo các loại lớp phủ trên ảnh LANDSAT	96
Bảng 3-8. Các kênh chỉ số sử dụng trong nghiên cứu tại Bến Tre	98
Bảng 3-9. Số điểm dùng để phân tích hồi quy	102
Bảng 3-10. Số lượng điểm thực địa trên đất trồng lúa	103
Bảng 3-11. Hệ số tương quan giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Sentinel-2	103
Bảng 3-12. Mô hình hồi quy đa biến giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Sentinel-2	105
Bảng 3-13. Hệ số tương quan giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Landsat8.....	107
Bảng 3-14. Mô hình hồi quy đa biến giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Landsat8	109
Bảng 3-15. Phân cấp giá trị độ mặn	112

DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 2-1. Mối quan hệ giữa sự bốc hơi, đới rễ và đới mao quản.....	25
Hình 2-2. Đường cong phản xạ phổ của các loại khoáng vật muối.....	39
Hình 2-3. Đặc trưng phổ phản xạ của lá cây theo các trạng thái sinh trưởng	41
Hình 2-4. Phân cực trong viễn thám Radar	49
Hình 2-5. Các kiểu tán xạ trên các bề mặt khác nhau	49
Hình 3-1. Bản đồ tỉnh Bến Tre.....	54
Hình 3-2. Bản đồ cao độ tỉnh Bến Tre [78].....	55
Hình 3-3. Bản đồ vùng giáp nước tỉnh Bến Tre[79].	58
Hình 3-4. Bản đồ thổ nhưỡng tỉnh Bến Tre [82].	61
Hình 3-5. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Bình Đại.....	66
Hình 3-6. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm Bình Đại theo các năm.....	67
Hình 3-7. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Mỹ Tho.	68
Hình 3-8. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm Mỹ Tho theo các năm	68
Hình 3-9. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm An Thuận	69
Hình 3-10. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm An Thuận theo các năm.....	69
Hình 3-11. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Mỹ Hóa.....	70
Hình 3-12. Số ngày mặn lớn nhất vượt ngưỡng theo các năm tại trạm Mỹ Hóa.....	70
Hình 3-13. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Bến Trại	71
Hình 3-14. Số giờ mặn lớn nhất vượt ngưỡng theo các năm tại trạm Bến Trại.....	71
Hình 3-15. Mặn lớn nhất ngày tại các khu vực đo tỉnh Bến Tre năm 2015-2016 theo tháng	73
Hình 3-16. Số ngày mặn duy trì trên ngưỡng (Threshold) tại khu vực đo năm 2015-2016 theo tháng	74
Hình 3-17. Bản đồ phân bố mặn lớn nhất tháng 4/1998	75
Hình 3-18. Phân bố mặn lớn nhất 4-2005 trên địa bàn tỉnh Bến Tre.....	75
Hình 3-19. Phân bố mặn lớn nhất tháng 1- 2016 trên địa bàn tỉnh Bến Tre	76
Hình 3-20. Phân bố mặn lớn nhất tháng 4-2016 trên địa bàn tỉnh Bến Tre	76
Hình 3-21. Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất	80
Hình 3-22. Bản đồ độ mặn năm 2016[83].	81
Hình 3-23. Dự báo XNM năm 2025[83].	81
Hình 3-24. Dự báo XNM năm 2030[83].	82
Hình 3-25: Quy trình phân tích, thành lập bản đồ xâm nhập mặn trong đất bằng tư liệu ảnh radar Sentinel-1..	83
Hình 3-26. Hệ số tương quan (r) giữa EC đo đạc và EC tính toán sử dụng tập dữ liệu huấn luyện (training dataset)	90
Hình 3-27. Hệ số tương quan (r) giữa EC đo đạc và EC tính toán sử dụng tập dữ liệu kiểm định (validation dataset)	90
Hình 3-28. Bản đồ độ mặn đất tỉnh Bến Tre sử dụng mô hình Gaussian Processes (GP)	91
Hình 3-29. Ảnh tổ hợp màu khu vực nghiên cứu năm 2022	94
Hình 3-30. Bản đồ vị trí các điểm thực địa tỉnh Bến Tre năm 2018.....	95

Hình 3-31. Quy trình phân vùng nhiễm mặn từ dữ liệu viễn thám và thực địa.....	97
Hình 3-32. Tương quan giữa EC và các mô hình của ảnh Sentinel-2.....	106
Hình 3-33. Sự phân bố của EC tính từ ảnh Sentinel-2 năm 2018.....	107
Hình 3-34. Tương quan giữa EC với các mô hình của ảnh Landsat.....	110
Hình 3-35. Sự phân bố của EC tính từ ảnh Landsat năm 2018.....	111
Hình 3-36. Tương quan giữa EC trong phòng và các mô hình.....	112
Hình 3-37. Bản đồ phân bố đất lúa tỉnh Bến Tre.....	113
Hình 3-38. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2018.....	114
Hình 3-39. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2019.....	114
Hình 3-40. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2020.....	115
Hình 3-41. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2021.....	115
Hình 3-42. Bản đồ phân bố nhiễm mặn trên đất lúa tỉnh Bến Tre năm 2022.....	116
Hình 3-43. Bản đồ phân vùng nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2005.....	117
Hình 3-44. Bản đồ phân vùng xâm nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2010.....	118
Hình 3-45. Bản đồ phân vùng xâm nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2015.....	118
Hình 3-46. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2018.....	119
Hình 3-47. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2020.....	119
Hình 3-48. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2022.....	120
Hình 3-49. Sự thay đổi diện tích đất mặn tỉnh Bến Tre qua các năm.....	122
Hình 3-50. Bản đồ diễn biến nhiễm mặn tỉnh Bến Tre giai đoạn 2005-2022.....	123
Hình 3-51. Sự thay đổi diện tích đất mặn của các huyện qua các năm.....	125

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của luận án

Việt Nam là nước chịu ảnh hưởng nặng nề nhất của biến đổi khí hậu trong số các nước đang phát triển. Theo nghiên cứu của Ngân hàng Thế giới năm 2007 Việt Nam là nước chịu rủi ro do nước biển dâng đứng hàng thứ hai trên thế giới, hệ quả tất yếu là sự gia tăng về cường độ xâm nhập mặn trên diện rộng ở đồng bằng sông Cửu Long[1]. Xu hướng này gây ảnh hưởng tiêu cực đến sinh kế của hàng triệu người dân đang sống phụ thuộc vào nông nghiệp và nuôi trồng thủy sản. Nằm ở phía Đông của ĐBSCL, tiếp giáp với biển, Bến Tre chịu ảnh hưởng nhiều của BĐKH. Với đường bờ biển dài trên 65km, địa hình tương đối thấp và bằng phẳng, lại nằm giữa các cửa sông lớn, Bến Tre thường xuyên chịu tác động mạnh của hiện tượng xâm nhập mặn Diện tích đất nuôi trồng thủy sản đã mở rộng đáng kể về phía sâu vào trong đất liền cộng với vấn đề suy thoái rừng phòng hộ ven biển khiến nước mặn có thể xâm nhập vào sâu trong nội đồng, làm mặn hóa đất, thiếu nước sinh hoạt và suy giảm nghiêm trọng diện tích đất trồng lúa, ảnh hưởng đến sinh kế và an ninh lương thực.

Nghiên cứu hiện trạng, diễn biến và phân vùng nhiễm mặn là một phương pháp hiệu quả giúp các nhà quản lý theo dõi, đánh giá được mức độ ảnh hưởng của tình trạng xâm nhập mặn, đồng thời đề xuất được những biện pháp phù hợp ngăn ngừa và chống chịu với biến đổi khí hậu đang diễn ra ngày càng phức tạp và khó dự đoán ở ĐBSCL. Có nhiều cách xác định vùng đất nhiễm mặn, như quan trắc ngoài thực địa bằng thiết bị đo, dùng lỗ khoan, phân tích tính dẫn điện trên ảnh radar, hoặc giải đoán chỉ thị sinh thái qua ảnh viễn thám MODIS, LANDSAT, Sentinel, VNREDSat-1.

Do phải lượng hóa sự xâm nhập mặn dựa vào số liệu từ nhiều điểm đo phân bố rời rạc trên một vùng diện tích rộng lớn với nhiều loại hình sử dụng đất khác nhau nên các phương pháp giám sát mặn hóa truyền thống cho thấy có những nhược điểm nhất định. Sự phát triển của công nghệ viễn thám đã cung cấp nhiều loại dữ liệu khác nhau như phổ phản xạ mặt đất, ảnh máy bay, ảnh vệ tinh đa phổ, siêu phổ và radar. Viễn thám trở thành một phương pháp tiếp cận hỗ trợ nghiên cứu, đánh giá diễn biến và phân vùng nhiễm mặn trên diện rộng. Việc tích hợp các chỉ số từ tư liệu viễn thám với số liệu mặt

đất giúp các nhà quản lý xác định phạm vi, mức độ ảnh hưởng của nhiễm mặn, từ đó xây dựng các giải pháp phù hợp với điều kiện từng địa phương.

Luận án “ Nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian” đã xác lập được cơ sở khoa học nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn theo hướng tiếp cận viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian kết hợp với số liệu thực địa. Kết quả thử nghiệm, phân tích, đánh giá của luận án chứng minh tính hiệu quả của công nghệ trong việc xác định cơ chế, diễn biến và phân cấp các vùng ảnh hưởng xâm nhập mặn ở khu vực nghiên cứu bằng công nghệ viễn thám đã đề xuất. Vì vậy luận án “ Nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian” có tính cấp thiết, tính thời sự, có ý nghĩa khoa học và thực tiễn.

2. Mục tiêu và nội dung nghiên cứu

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

Xác lập cơ sở khoa học và phương pháp luận ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian nhằm nâng cao hiệu quả nghiên cứu diễn biến và phân vùng xâm nhập mặn nói chung và cho khu vực ven biển tỉnh Bến Tre nói riêng.

2.2. Nội dung nghiên cứu

Luận án “ Nghiên cứu diễn biến và phân vùng ảnh hưởng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian” cụ thể là đất sản xuất bị ảnh hưởng bởi mặn trên cơ sở khai thác công nghệ, dữ liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian. Sử dụng dữ liệu viễn thám đa phổ, đa thời gian kết hợp với số liệu thực địa cho phép ta theo dõi được xu thế biến động lớp phủ, theo dõi năng suất cây trồng, xác định các khu vực có phân bố cây chịu mặn, chịu lợ. Sự xuất hiện của các loại cây trồng hay thảm thực vật khác nhau cũng có những phản xạ riêng, đặc thù trên ảnh vệ tinh và các chỉ số tính toán được từ ảnh. Từ đó, tính toán được những ảnh chỉ số gián tiếp, giúp khoanh vùng ảnh hưởng và đánh giá được diễn thế của hiện tượng xâm nhập mặn hay sự mặn hóa của đất trên địa bàn nghiên cứu.

Nghiên cứu sử dụng nhiều loại tư liệu viễn thám khác nhau, với cách thức tiếp cận theo hướng thực nghiệm hướng đối tượng (bottom up). Dựa trên những nghiên cứu tổng quan và phương pháp khả thi trong xác định đất, nước nhiễm mặn từ tư liệu viễn

thám, các điểm khảo sát, đo đạc và số liệu thực địa, bay chụp có ý nghĩa quan trọng trong việc xác định các tập dữ liệu mẫu, ảnh máy bay, thư viện phổ phản xạ tham chiếu, sử dụng kết hợp ảnh vệ tinh ở các độ phân giải khác nhau.

Để thực hiện mục tiêu nghiên cứu NCS lựa chọn các nội dung sau

- + Xác lập cơ sở khoa học, mô hình nghiên cứu xâm nhập mặn bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian.
- + Đánh giá diễn thế và phân vùng ảnh hưởng xâm nhập mặn bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian.
- + Thử nghiệm đánh giá và phân vùng xâm nhập mặn trên cơ sở ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian khu vực tỉnh Bến Tre.

Cách thức tiếp cận vấn đề sử dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian kết hợp được ưu điểm của mỗi loại tư liệu viễn thám nhằm làm rõ bản chất của đối tượng xuất hiện trên ảnh thông qua các đặc trưng phản xạ phổ được chuẩn hóa, đồng bộ ở tất cả các cấp, làm tiền đề cho việc khai thác ứng dụng dữ liệu viễn thám trong nghiên cứu đánh giá xâm nhập mặn được chính xác, hiệu quả.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

3.1. Đối tượng nghiên cứu:

- Nghiên cứu hiện tượng xâm nhập mặn
- Nghiên cứu các loại dữ liệu thu thập bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian
- Nghiên cứu kết hợp dữ liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong giám sát diễn biến và phân vùng xâm nhập mặn

3.2. Phạm vi nghiên cứu:

- **Phạm vi không gian:** Bến Tre nằm từ 9o48' đến 10o20' Bắc, 106o48' đến 105o57' Đông, dạng rẻ quạt với nhiều kênh rạch. Phía Bắc giáp Tiền Giang (ranh giới: sông Tiền), phía Tây và Nam giáp Vĩnh Long, Trà Vinh (ranh giới: sông Cổ Chiên), phía Đông giáp Biển Đông (bờ biển 65 km). 4 sông lớn (Tiền Giang, Ba Lai, Hàm Luông, Cổ Chiên). [2]

- **Phạm vi khoa học:** Trong phạm vi của luận án, những vấn đề sau được giới hạn nghiên cứu, bao gồm:

- + Nghiên cứu các loại tư liệu viễn thám sử dụng nghiên cứu xâm nhập mặn
- + Diễn biến xâm nhập mặn, các số liệu quan trắc thu thập được từ 1998 cho đến 2022 tại các trạm quan trắc trên các sông thuộc tỉnh Bến Tre.

- + Đánh giá và dự tính tác động của xâm nhập mặn trên cơ sở sử dụng kịch bản biến đổi khí hậu và nước biển dâng năm 2020 cho Việt Nam do Bộ Nông nghiệp và Môi trường công bố.

- + Một số công cụ trí tuệ nhân tạo và các công cụ hệ thống thông tin địa lý sử dụng phân vùng nhiễm mặn cho các khu vực rộng lớn.

4. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn

4.1. Ý nghĩa khoa học

Kết quả nghiên cứu của luận án đã bổ sung các luận chứng khoa học và phương pháp luận về ứng dụng tư liệu viễn thám trong nghiên cứu xâm nhập mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu và nước biển dâng.

4.2. Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu ứng dụng để đánh giá sự biến động quá trình xâm nhập mặn theo không gian và thời gian và phân vùng nhiễm mặn của các tỉnh ven biển đồng bằng sông Cửu Long nói chung và tỉnh Bến Tre nói riêng.

5. Các luận điểm bảo vệ

Luận điểm 1 : Kết hợp dữ liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian tăng tính hiệu quả và độ chính xác trong nghiên cứu diễn biến xâm nhập mặn và phân vùng xâm nhập mặn

Luận điểm 2 : Công cụ trí tuệ nhân tạo và các công cụ phân tích GIS là mô hình tối ưu giúp thành lập bản đồ nhiễm mặn trên một khu vực rộng.

6. Điểm mới của luận án

Kết quả nghiên cứu đã xác định được hai điểm mới:

1. Đã xác lập được cơ sở khoa học và phương pháp luận kết hợp dữ liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian là giải pháp mới cho phép kết hợp

được tính ưu việt của nhiều nguồn, nhiều loại dữ nhằm bổ sung những khiếm khuyết và tăng tính hiệu quả, chính xác trong nghiên cứu diễn biến xâm nhập mặn và phân vùng xâm nhập mặn.

2. Đã sử dụng thuật toán học máy và hồi quy đa biến với tư liệu viễn thám cho độ chính xác tốt trong phân vùng nhiễm mặn.

7. Cơ sở tài liệu, số liệu nghiên cứu của Luận án

7.1. Tài liệu tham khảo, cập nhật có nội dung liên quan đến luận án

- Các báo cáo tình hình XNM tỉnh Bến Tre từ năm 2005 đến năm 2022
- Kịch bản BĐKH và NBD do Bộ Nông nghiệp và Môi trường công bố năm 2020.
- Chuỗi số liệu khí tượng, số liệu thủy văn, số liệu hải văn, tài liệu đo độ mặn tại khu vực Bến Tre từ năm 2004 tới 2022.
- Niên giám thông kê tỉnh Bến Tre từ năm 2017-2021.
- Báo cáo xây dựng bản đồ thổ nhưỡng tỉnh Bến Tre tỉ lệ 1: 50000 năm 2005
- Kịch bản BĐKH và NBD do Sở Tài nguyên và Môi Trường Bến Tre công bố năm 2021.

7.2. Các đề tài nghiên cứu, công trình khoa học NCS tham gia thực hiện có liên quan đến luận án

- NCS là thành viên chính và tham gia thực hiện các nội dung chính trong đề tài: “Nghiên cứu, đánh giá và phân vùng xâm nhập mặn trên cơ sở công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian – Ứng dụng thí điểm tại tỉnh Bến Tre”. Đề tài KHCN cấp quốc gia mã số VT-UD.03/16-20 do PGS. TS Phạm Việt Hòa làm chủ nhiệm đề tài.

7.3. Tài liệu, số liệu do luận án bổ sung, tính toán trực tiếp

Luận án tiến hành trực tiếp các công việc thu thập ảnh vệ tinh, thí nghiệm hiện trường, quan trắc, phân tích, đánh giá, để có được các kết quả tin cậy sử dụng cho việc đánh giá xâm nhập mặn và biến động sử dụng đất tại tỉnh Bến Tre. Từ đó đưa ra được các khuyến nghị cho các cơ quan có thẩm quyền để giảm thiểu tác hại của XNM.

Bảng số liệu

TT	Các nội dung thực hiện	Đơn vị tính	Khối lượng
1	Điều tra, khảo sát bổ sung	km ²	150
2	Xử lý ảnh vệ tinh	Ảnh	200
3	Đo độ dẫn điện trên thực địa	Điểm	1659

8. Cấu trúc luận án

Luận án được trình bày trong Ngoài phần mở đầu, kết luận, kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục, luận án gồm 3 chương:

Chương 1. Tổng quan về các công trình nghiên cứu công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn

Chương 2. Cơ sở khoa học và phương pháp luận kết hợp tư liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn

Chương 3. Ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu diễn biến và phân vùng ảnh hưởng nhiễm mặn ở Bến Tre

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ CÔNG NGHỆ VIỄN THÁM ĐA TẦNG, ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN TRONG NGHIÊN CỨU, ĐÁNH GIÁ VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN

1.1. Các nghiên cứu ứng dụng viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu nhiễm mặn trên thế giới

Viễn thám đã chứng minh được nhiều điểm mạnh trong việc cung cấp thông tin cho các nghiên cứu về đất, như tiết kiệm thời gian thu thập, độ phủ rộng và cho phép thu thập dữ liệu của cả chuỗi thời gian. Đồng thời, dữ liệu ảnh viễn thám với độ phân giải không gian từ thấp đến cao có thể đáp ứng được nhiều mục đích khác nhau. Trên thế giới, các loại tư liệu viễn thám được sử dụng trong nghiên cứu về đất nhiễm mặn rất đa dạng.

1.1.1. Phổ mặt đất

Ở tầng mặt đất, máy đo phổ cầm tay như GER3700 và ASD cho phép đo phản xạ phổ của đất trên các dải sóng liên tục từ 400 – 2500nm với độ phân giải phổ cao. Dữ liệu từ các thiết bị này được đưa vào thư viện phổ, làm căn cứ để phân loại ảnh vệ tinh và ảnh hàng không[3]. Đã có nhiều nghiên cứu sử dụng thiết bị đo phổ cầm tay để đánh giá độ phản xạ của bề mặt bị nhiễm mặn và các khoáng chất có trong đất trong phòng thí nghiệm cũng như ngoài thực địa [4]. Thông tin thu được từ máy đo phổ thường được sử dụng để thiết lập mối quan hệ giữa phản xạ phổ của đất bị nhiễm mặn với hàm lượng các khoáng chất có trong đất [5]. Nghiên cứu của Weindorf, của Swanhart đều sử dụng máy đo phổ cầm tay để tính độ nhiễm mặn và độ chua của đất, kết quả của 2 nghiên cứu này đã chứng minh mối tương quan cao giữa các giá trị phổ đo được với các giá trị phân tích đất trong phòng thí nghiệm [6].

1.1.2. Viễn thám đa phổ

Trong số các loại tư liệu viễn thám đa phổ phân giải thấp thì ảnh vệ tinh MODIS cho thấy có nhiều ưu điểm nổi trội về số lượng kênh phổ, độ che phủ, tính ổn định về chu kỳ và tính tức thời về dữ liệu. Rất nhiều ảnh chỉ số bao gồm cả chỉ số độ mặn và các chỉ số trạng thái sinh trưởng thực vật có thể ước tính từ các kênh ảnh vệ tinh MODIS [7].

Trong đề tài “Regional-Scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-Year MODIS EVI and NDVI”, D.B Lobell và các đồng nghiệp đã sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh trong khoảng thời gian 6 năm (2000-2006) để thiết lập mối quan hệ giữa năng suất nông nghiệp và độ nhiễm mặn của đất, đề tài sử dụng hai giá trị phổ biến về thực vật là chỉ số NDVI và EVI tính từ ảnh MODIS để nghiên cứu. Đề tài tiến hành lấy mẫu tại 3 điểm ở quận Kittson, Red River Valley của Bắc Dakota và Minnesota, là khu vực cần đánh giá độ mặn để bảo tồn tài nguyên thiên nhiên và cho thấy mối tương quan của 3 điểm mẫu này. Ảnh đa thời gian MODIS được sử dụng để giảm thiểu những ảnh hưởng của các yếu tố về thời tiết, sâu bệnh, dịch bệnh, ... Kết quả là thấy được tình trạng thảm thực vật vào mùa hè ở Red River Valley và chỉ ra rằng sử dụng ảnh đa thời gian để nghiên cứu đem lại độ chính xác cao hơn sử dụng ảnh của một thời điểm. Đề tài cho rằng chỉ số NDVI và EVI là hai chỉ số đáng tin cậy để xác định tình trạng thảm thực vật và độ mặn trong khu vực này. Cuối cùng đưa ra kết luận sự sụt giảm về năng suất do một số nguyên nhân chính gây ra, trong đó có xâm nhập mặn[8].

Năm 2000, Abbas, A. và S. Khan cũng đã sử dụng ảnh viễn thám đa thời gian (1992-1995) IRS-1B LISS-II có độ phân giải là 36.25m kết hợp với dữ liệu thực địa để nghiên cứu độ mặn của đất tại Pakistan. Khu vực nghiên cứu là huyện Faisalabad, gồm hai phần -I và S-II, nằm ở phía Tây Nam của Rechna Doab (khu vực nằm giữa hai con sông - Ravi và The Chenab). Phương pháp được thực hiện là dùng ảnh viễn thám để phân tích thành phần chính (PCA) và tính chỉ số độ mặn (SI). Trong sáu chỉ số độ mặn, tác giả cho rằng chỉ số độ mặn được tính bằng công thức Salinity Index = $(B_2 \times B_3)/B_1$ (trong đó B_1 , B_2 , B_3 là các kênh của ảnh vệ tinh IRS-1B LISS-II, trong giới hạn quang phổ B_1 (0.45- 0.52 mm), B_2 (0.52-0.59 mm) và B_3 (0.62- 0.68 mm)) là thích hợp để so sánh với giá trị thực địa. Tác giả đã tìm ra mối tương quan chặt chẽ giữa dữ liệu xâm nhập mặn khảo sát được với từng pixel trên ảnh bằng phương pháp hồi quy. Kết quả phân loại ảnh có giám sát Maximum likelihood thành 3 lớp: mặn ít, mặn vừa và rất mặn với độ chính xác toàn cục trên 90%. Diện tích đất mặn ở vùng nghiên cứu qua các năm có sự thay đổi không theo một xu hướng nhất định, cụ thể theo kết quả phân loại, độ mặn bao phủ 8,7% diện tích khu vực nghiên cứu vào năm 1991, vào năm 1994 và 1997 tương ứng là 14.2% và 6.6%. Dựa vào mối quan hệ giữa đất bị nhiễm mặn, đất ngập nước và chất lượng nước ngầm các tác giả chỉ ra rằng 60-70% các loại đất mặn hình

thành trong vùng nước nông trong vòng 200 cm từ mặt đất, nước ngầm trong khu vực nước muối cũng có tính độc hại, gây hạn chế tăng trưởng của thực vật, trừ các loại cây trồng có khả năng chịu mặn cao. Nghiên cứu này cũng cho thấy tiềm năng của việc sử dụng ảnh vệ tinh để giám sát các vùng đất bị suy thoái với độ mặn của đất[9].

Trong nghiên cứu về xâm nhập mặn của tác giả A. Azabdaftari và F. Sunarb tại Cukurova- Thổ Nhĩ Kỳ, đề tài sử dụng ảnh Landsat với độ phân giải 30 m trong 2 năm 2009 và 2010 để tính các chỉ số về thực vật chỉ số độ mặn, độ dẫn điện EC được tính ở năm 2009 và 2010 được sử dụng như dữ liệu thực địa để phân tích mối tương quan giữa giá trị các ảnh ban đầu và giá trị các ảnh chỉ số khác nhau. Bảy chỉ số liên quan đến độ mặn và phát hiện muối (NDSI, S₁, S₂, S₃, S₄, S₅, S₆) đều được kiểm tra với tất cả các ảnh sử dụng trong nghiên cứu. Chỉ số thực vật cũng được sử dụng trong phân tích độ mặn của đất bên cạnh các chỉ số độ mặn từ thực vật cây ưa mặn phát triển tự nhiên trong đất mặn và có thể được thích nghi với độ mặn của đất cao. Vì vậy, thảm thực vật đã được sử dụng như một chỉ số gián tiếp để dự đoán và bản đồ đất bị nhiễm mặn. Bốn chỉ số thực vật khác nhau đã được áp dụng và trong số đó hai chỉ số thực vật phổ biến nhất (NDVI và SAVI) cho thấy mối tương quan tốt hơn đã được đưa vào xem xét trong đề tài. Sau khi phân tích hồi quy đơn biến và đa biến, theo tương quan cao nhất thu được với giá trị tương quan là 78,40%, dữ liệu ngày 21 tháng 3 năm 2010 được chọn để thành lập các bản đồ đất bị nhiễm mặn trong khu vực. Độ mặn trong khu vực được chia thành 5 cấp: không mặn (0-2 ECe, dS/m), mặn thấp (2-4 ECe, dS/m), mặn trung bình (4-8 ECe, dS/m), mặn cao (8-16 ECe, dS/m) và mặn rất cao (> 16 ECe, dS/m). Đề tài đã khẳng định hiệu quả của công nghệ viễn thám trong thành lập bản đồ xâm nhập mặn.

Narmada K và cộng sự cũng sử dụng viễn thám đa thời gian (1997, 2000 và 2009) để tính các chỉ số về thực vật (NDVI, SAVI) và độ mặn (SI, NDSI) từ ảnh Landsat TM và ETM+. Khu vực nghiên cứu nằm ở vùng vịnh đại ven biển thuộc Cuddalore, Tamil Nadu, Ấn Độ. Chỉ số NDVI được tính để phân biệt khu vực có thảm thực vật giàu hay nghèo, thảm thực vật nghèo sẽ phản ánh được chất lượng đất làm ảnh hưởng đến sự sinh trưởng của thực vật, SAVI cũng được tính toán để biết được mức độ khỏe mạnh của thảm thực vật. Ngoài ra, để tăng cường sự khác biệt của vùng mặn, nhóm tác giả đã tính thêm chỉ số độ mặn SI và chỉ số chênh lệch độ mặn NDSI. Các phản xạ quang phổ của đất mặn và các loại đất khác trong khu vực nghiên cứu đã thu được từ băng hình ảnh

Landsat. Có thể suy ra rằng phản xạ phổ tăng khi lượng muối trên bề mặt địa hình tăng. Có sự tương phản phản ứng phổ giữa các kênh nhìn thấy và hồng ngoại, hồng ngoại và hồng ngoại giữa trong đất hiện có muối. Chỉ số NDVI qua các năm cho thấy sự suy giảm của thảm thực vật trong khu vực nghiên cứu, năm 1997 độ che phủ đạt 85%, năm 2000 gần 40% thảm thực vật bị mất và đến năm 2009, chỉ còn các mảnh vụn của thảm thực vật. Các ảnh giá trị NDSI và SI cho thấy có sự gia tăng độ mặn trong khu vực nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy có sự suy giảm rõ rệt về thảm thực vật, tăng sự tích tụ độ mặn và giảm diện tích đất ẩm tại khu vực nghiên cứu, độ mặn đã tăng lên trong khu vực nghiên cứu, tăng với tốc độ mạnh mẽ trong 30 năm qua[10].

Năm 2014, Weicheng Wu và cộng sự cũng sử dụng chuỗi dữ liệu viễn thám đa thời gian để loại bỏ sai số do các yếu tố như sự chuyển đổi mục đích sử dụng đất, ví dụ từ đất trống sang đất canh tác, hoặc các yếu tố khác như phân bón, dịch bệnh trong 3 giai đoạn (1988–1993), (1998–2002), (2009–2012) ở miền Trung Iraq. Bộ dữ liệu đa thời gian chủ yếu bao gồm ảnh vệ tinh Landsat TM (Thematic Mapper) và ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) và một cảnh ảnh SPOT. Thực hiện tính toán các chỉ số thực vật (VIs) hữu ích cho việc đánh giá xâm nhập mặn như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index), SARVI (Soil-Adjusted and Atmospherically Resistant Vegetation Index) và một chỉ số thực vật mới để phân tích độ mặn đó là Generalized Difference Vegetation Index (GDVI) $GDVI = (SR^n - 1) / (SR^n + 1) = (P^{n_{NIR}} - P^{n_R}) / (P^{n_{NIR}} + P^{n_R})$, trong đó SR là chỉ số tỉ lệ đơn giản, $P^{n_{NIR}}$ và P^{n_R} tương ứng là phản xạ của tia hồng ngoại gần (NIR) và dải màu đỏ (R), n là số điện mang giá trị từ 1 đến n, khi n=1 thì GDVI = NDVI. Sau đó, sử dụng giá trị lớn nhất của các chỉ số thực vật, chỉ số xâm nhập mặn và các chỉ số khác tính từ ảnh viễn thám để thiết lập mối quan hệ với giá trị EC đo ngoài thực địa[11].

Với các loại tư liệu có độ phân giải trung bình, thì dữ liệu ảnh LANDSAT, SPOT, LISS được sử dụng khá phổ biến trong nghiên cứu xâm nhập mặn. Ảnh đa phổ cho phép phân biệt được đất nhiễm mặn và đất không bị nhiễm mặn [12] và nhận diện được đất nhiễm mặn ở mức độ nặng tốt [13, 14]. Dữ liệu viễn thám đa phổ thường được dùng kết hợp với các lớp chuyên đề khác như địa hình, địa chất, thủy văn, thổ nhưỡng, chất lượng nước, bản đồ sử dụng đất để nâng cao độ chính xác. Dữ liệu ảnh đa phổ thường

bao gồm cả dải sóng hồng ngoại nhiệt (chẳng hạn như LANDSAT), đây là dải sóng mà sự hấp thụ, phản xạ của đất chịu ảnh hưởng mạnh của các thành phần hóa học như sun phat, phốt phat, clorit [15]. Thông tin từ các kênh nhiệt có thể được sử dụng để tách các loại đất tương tự nhau về phổ phản xạ trên dải sóng nhìn thấy. Ngoài ra, một số nghiên cứu đã cho thấy độ dẫn điện của đất nhiễm mặn có tương quan rất tốt với phản xạ phổ trên các kênh cận hồng ngoại, hồng ngoại trung và hồng ngoại nhiệt. Các kênh nhiệt được sử dụng nghiên cứu về xâm nhập mặn ở khu vực đất trồng hoặc cây bụi. Weicheng Wu và đồng nghiệp đã kết luận rằng có thể coi nhiệt độ bề mặt đất là chỉ thị cho quá trình nhiễm mặn tại các khu vực đất trồng vì độ dẫn nhiệt của đất có liên quan đến độ dẫn điện [11]. Tác giả Abu-Hamdeh và Reeder đã tính toán mối tương quan giữa độ dẫn nhiệt và độ nhiễm mặn, đồng thời phát hiện ra rằng ở một độ ẩm nhất định, độ dẫn nhiệt giảm khi hàm lượng muối trong đất tăng [16]. Jingwei Wu đã chứng minh được kênh nhiệt của LANDSAT có thể phân biệt được đất nhiễm mặn ở mức độ nhẹ với các cồn cát, đây là điều mà các ảnh vệ tinh đa phổ khác không làm được [17].

Trong nghiên cứu nhiễm mặn, các ảnh viễn thám đa phổ độ phân giải cao như IKONOS, Quickbird và WorldView-2 cũng được sử dụng nhưng không nhiều, chủ yếu do giá thành cao. Elhaddad và Garcia đã dùng ảnh IKONOS và dữ liệu đo phổ phản xạ mặt đất để phân biệt các mức độ xâm nhập mặn và ảnh hưởng của nó tới năng suất nông nghiệp ở lưu vực sông Arkansas, Hoa Kỳ [18]. Trong khi đó, nhóm nghiên cứu của Dwivedi đã dùng đồng thời ảnh IKONOS và ảnh đa phổ LISS-III để xây dựng bản đồ đất nhiễm mặn [13]. Kết quả phân loại từ ảnh IKONOS cao hơn đến 10% so với kết quả từ ảnh LISS-III. Ngoài ra, Setia đã sử dụng ảnh Quickbird để nghiên cứu nhiễm mặn trong nông nghiệp ở phía Nam nước Úc, và đạt được độ chính xác cao [19]. Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng để kiểm định và đánh giá mức độ tin cậy của phương pháp này trên quy mô vùng là tốn kém và mất thời gian.

Có nhiều mô hình đã được sử dụng để xây dựng mối quan hệ giữa độ nhiễm mặn của đất với các kênh ảnh hưởng tới khả năng phân biệt và đánh giá nhiễm mặn chính xác hơn như Ordinary Least Squares (OLS), spatial autoregressive (SAR), và spatial lag (SLAG) [20]. Mô hình SAR sử dụng giá trị NDVI, kênh hồng ngoại và kết hợp giữa kênh hồng ngoại/ kênh đỏ là phương pháp cho độ chính xác cao nhất. Ngoài ra, ảnh vệ tinh độ phân giải cao còn thường được sử dụng kết hợp với các dữ liệu viễn

thám đa phổ phân giải trung bình như LANDSAT và phân giải thấp như MODIS để tận dụng các thông tin về phổ, tính chu kỳ, liên tục trong thời gian dài trong các nghiên cứu về đất nhiễm mặn trên cơ sở phân tách được các diện tích đất nông nghiệp, theo dõi tình trạng sinh trưởng và năng suất cây trồng. Trong số các loại tư liệu viễn thám đa phổ phân giải thấp thì ảnh vệ tinh MODIS cho thấy có nhiều ưu điểm nổi trội về số lượng kênh phổ, độ che phủ, tính ổn định về chu kỳ và tính tức thời về dữ liệu. Rất nhiều ảnh chỉ số bao gồm cả chỉ số độ mặn và các chỉ số trạng thái sinh trưởng thực vật có thể ước tính từ các kênh ảnh vệ tinh MODIS [7].

1.1.3. Viễn thám siêu phổ

Ảnh siêu phổ cung cấp một lượng lớn các kênh phổ với độ phân giải phổ cao cho phép phân biệt các loài cây chịu mặn với cây không chịu mặn, cũng như cho phép nhận diện các đặc tính của đất nhiễm mặn chi tiết hơn so với ảnh đa phổ [21]. Các thiết bị đo phổ gắn trên máy bay như AVIRIS; DAIS-7915; HYMAP đã từng được thiết kế như là nguyên mẫu của các hệ thống thu ảnh trên vệ tinh. Về cơ bản, bộ cảm gắn trên máy bay cung cấp ảnh có độ phân giải không gian và độ phân giải phổ cao, các thiết bị này thu thập thông tin trên các dải sóng liên tục (400-2500 nm) với độ phân giải phổ khoảng 10 nm [22].

Đã có một số nghiên cứu chứng tỏ khả năng ứng dụng của loại dữ liệu siêu phổ trong nghiên cứu nhiễm mặn. Các nghiên cứu này đều kết luận rằng, thành phần hữu cơ của đất, độ ẩm đất và khu vực đất bị nhiễm mặn có thể phân biệt được nếu sử dụng kết hợp dữ liệu từ các bộ cảm gắn trên máy bay với dữ liệu thực địa. Cụ thể, năm 1990, Hick và Russel đã sử dụng bộ cảm siêu phổ Geoscan gồm 24 kênh trong nghiên cứu của mình và chứng minh được rằng sự phản xạ của thực vật trên dải cận hồng ngoại là chỉ thị tốt nhất cho ảnh hưởng của quá trình xâm nhập mặn [23]. Năm 2000, Dehaan và Taylor đã sử dụng dữ liệu từ bộ cảm HYMAP, 128 kênh phổ trên dải sóng 450-2500nm, phân giải 5m kết hợp với các phép đo ngoài thực địa để xây dựng bản đồ bản đồ đất nhiễm mặn với các loại và mức độ nhiễm mặn khác nhau dựa vào các đặc tính của bề mặt đất nhiễm mặn và các loài cây chịu mặn [24]. Farifteh và cộng sự lại sử dụng dữ liệu siêu phổ HYMAP và phương pháp hồi quy PLSR kết hợp với mạng Neuron nhân tạo ANN cùng các phép đo thực địa và thực nghiệm để ước tính hàm lượng muối trong đất [25]. Nhóm tác giả này kết luận rằng 2 phương pháp PLSR và ANN rất hữu ích trong

việc xây dựng bản đồ nhiễm mặn. Năm 2010, ở Thổ Nhĩ Kỳ, Satir và các cộng sự đã sử dụng ảnh siêu phổ CHRIS PROBA để đánh giá mức độ nhiễm mặn của đất kết hợp với số liệu phân tích đất và đo phổ ngoài thực địa [26]. Kết quả cho thấy mối tương quan mạnh mẽ giữa thông tin phổ của dữ liệu CHRIS PROBA và độ phản xạ của cây bông và lúa mì trong việc nhận diện đất nhiễm mặn. Điều này chỉ ra rằng, bông và lúa mì có thể được áp dụng như dấu hiệu gián tiếp để phân biệt đất nhiễm mặn.

So với các nghiên cứu sử dụng bộ cảm siêu phổ đặt trên máy bay, các nghiên cứu dùng ảnh vệ tinh siêu phổ trong xâm nhập mặn còn hạn chế do ít có khả năng tiếp cận dữ liệu. Sau hệ thống chụp ảnh vệ tinh siêu phổ Hyperion thu được 242 kênh, trải trên dải sóng 400-2500nm, độ phân giải không gian 30m đi vào hoạt động, năm 2006, Dutkiewicz đã sử dụng dữ liệu siêu phổ Hyperion từ vệ tinh EO-1 để thành lập bản đồ đất nhiễm mặn cho vùng phía Nam nước Úc [21]. Ông kết luận rằng loài cây chịu mặn ở đây không có tác dụng trong việc phát hiện đất nhiễm mặn mức độ nhẹ và trung bình, nhưng đất nhiễm mặn nặng và rất nặng thì có thể nhận biết được. Năm 2012, nghiên cứu của Hamzeh và đồng nghiệp tại Iran, đã sử dụng ảnh Hyperion và các phương pháp phân loại khác nhau như Support Vector Machine (SVM), Spectral Angle Mapper (SAM), Minimum Distance (MD) và Maximum Like-lihood (ML) trên các tổ hợp kênh khác nhau để phân loại khu vực nghiên cứu thành 3 loại đất: nhiễm mặn ở mức độ nhẹ, trung bình, và nặng [27]. Nhóm tác giả kết luận rằng phương pháp SVM sử dụng trên tất cả các kênh phổ cho độ chính xác cao nhất, trên 78%.

1.1.4. Viễn thám Radar

Ứng dụng của viễn thám radar trong lĩnh vực xâm nhập mặn cho đến nay còn ít so với viễn thám quang học. Nguyên nhân một phần do sự phức tạp của dữ liệu, một phần do khả năng tiếp cận, thu thập tư liệu viễn thám radar còn hạn chế. Nhìn chung, đối với lĩnh vực này, các nhà nghiên cứu cho rằng kênh C, P là đặc biệt là kênh L có khả năng nhận diện được đất nhiễm mặn [28]. Phương pháp áp dụng ảnh radar thường dựa trên cơ sở là mức độ nhạy cảm của đất nhiễm mặn với hằng số điện môi và độ sáng trên các kênh của ảnh radar [29]. So với viễn thám đa phổ, thì viễn thám radar thể hiện điểm mạnh trong nghiên cứu đất với các điều kiện đặc biệt do không phụ thuộc vào các điều kiện thời tiết, khí quyển [30].

Trên thế giới, việc nghiên cứu xâm nhập mặn sử dụng các tư liệu ảnh vệ tinh radar có thể kể đến những nghiên cứu tiêu biểu dưới đây:

- Nghiên cứu của Metternicht và Taylor đã sử dụng ảnh radar để thành lập bản đồ đất nhiễm mặn, bao gồm phân chia các mức độ nhiễm mặn dựa trên các đặc điểm về độ gồ ghề bề mặt và loại thực vật liên quan đến xâm nhập mặn, sau đó sử dụng những thông tin này như lớp dữ liệu hỗ trợ để đánh giá mức độ xâm nhập mặn quy mô vùng. Trong khi Metternicht sử dụng kỹ thuật phân loại mờ thì Taylor sử dụng phương pháp đảo ngược tán xạ radar ngược [24, 31].

- Nghiên cứu của Kaighin A. McColl đã sử dụng mối quan hệ giữa nhiệt độ độ sáng trên kênh L và mức độ nhiễm mặn của đất, tính từ các thí nghiệm, để nhận diện đất nhiễm mặn ở mức độ nặng. Tuy nhiên, cũng theo tác giả nghiên cứu, ảnh hưởng của độ mặn không được kiểm tra một cách kỹ lưỡng. Ngoài ra, các mô hình nghiên cứu hiện tại mới chỉ được thực hiện trong phòng thí nghiệm. Việc kiểm định mô hình trên thực địa sẽ góp phần tăng cường độ chính xác của mô hình lý thuyết [32]

- Trong nghiên cứu của Bell, D., Menges, A. C. and W. V. Z. J (2001) [33]:

Trong nghiên cứu này sử dụng ảnh xa bằng phân cực máy bay để đo độ mặn của đất lập bản đồ đánh giá xâm nhập mặn. Ba thuật toán hồi điện môi, các nhiễu xạ nhỏ, vật lý quang học, và các mô hình Dubois đã được thực hiện, và kết quả của chúng được kết hợp với nhau để lấy một ước tính cải thiện về độ lớn phân ảo của hằng số điện môi phức tạp cho sự phân biệt độ mặn của đất. Một quá trình lựa chọn dữ liệu hiệu quả được sử dụng để cho phép áp dụng các mô hình trong môi trường tự nhiên này. Thảm thực vật điều chỉnh đến sự thay đổi nhỏ và các mô hình quang học vật lý trước khi kết hợp với mô hình Dubois cải thiện độ chính xác phân loại trong các khu vực bán thảm thực vật.

Nghiên cứu này sử dụng ảnh xa bằng phân cực máy bay (AirSAR) để xác định độ mặn của đất, lập bản đồ, một thông số sinh học quan trọng được dùng để theo dõi, quản lý và kiểm tra những thay đổi môi trường trong ARR. Radar được biết đến là nhạy cảm với một số thông số bề mặt tự nhiên như thảm thực vật, độ nhám bề mặt và hằng số điện môi (ϵ) [14]. Bề mặt chất điện môi là một hằng số điện môi phụ thuộc nhiều vào độ ẩm của đất do sự khác biệt lớn trong hằng số điện môi giữa đất khô và nước [15]. Hằng số điện môi bao gồm phần thực $R(\epsilon)$ và phần ảo. Khi so sánh các hằng số điện

môi phức tạp của nước tinh khiết với nước muối (nước biển) (49.69 mS/cm) [34], phần thực có sự khác biệt tối thiểu, nhưng phần ảo lại có sự khác biệt đáng kể tại tần số thấp hơn 7GHz được quan sát [35]. Hơn nữa Radar cũng không bị ảnh hưởng bởi mây, khả năng quét có thể đạt được trong điều kiện độ ẩm cao. Theo như nghiên cứu của Taylor, độ ẩm đất cao là thuộc tính được yêu cầu biến đổi trong các hằng số điện môi của nước mặn. Điều này làm cho việc sử dụng SAR (Hệ Radar độ mở tổng hợp) là lý tưởng cho việc áp dụng xác định độ mặn trong đất.

- Trong nghiên cứu của Spies, 2005 nghiên cứu để lập bản đồ và giám sát độ mặn trong nông nghiệp được thực hiện cho chính phủ Úc. Sử dụng ảnh vệ tinh Landsat kết hợp với việc xử lý mặt đất. Điều này đã thể hiện rất rõ việc sử dụng viễn thám vệ tinh để xác định hiện tượng xâm nhập mặn và theo dõi qua thời gian[36].

Tư liệu viễn thám radar sử dụng trong các nghiên cứu về đất điển hình là về độ ẩm đất. Đối với việc nghiên cứu đất nhiễm mặn, tư liệu viễn thám radar có một số hạn chế như:

- (1) sóng radar chỉ có thể xuyên qua đất được khoảng vài cm;
- (2) tùy thuộc vào bước sóng sử dụng mà sóng radar mới có thể đâm xuyên qua vùng tán cây dày đặc;
- (3) trên ảnh radar để phát hiện được đất mặn thì ảnh phải được chụp lúc đất ẩm (ví dụ như sau cơn mưa)
- (4) tín hiệu sóng radar thường bị nhiễu nên đòi hỏi nhiều thuật toán xử lý phức tạp để giảm nhiễu và biến dạng địa hình.

- Trong nghiên cứu của William J. Winson đã sử dụng kênh L/S thụ động (PALS) để đo độ mặn của nước biển và độ ẩm của đất. Vì nhiệt độ độ sáng của băng L gắn với sự thay đổi độ mặn nhỏ nên cần phải xây dựng một hệ thống rất nhạy và ổn định. Thiết bị mới này có thiết bị đo phóng xạ phân cực kép, hai cực và cảm biến Radar Ăng ten là một thiết bị hình nón, dụng cụ PALS được lắp đặt trên máy bay NC – AR C – 130. Việc đo độ mặn được thực hiện vào ngày 17 – 19 tháng 7 năm 1999, phía đông nam Norfolk, VA qua Gulf Stream. Các phép đo chỉ ra độ mặn trong suốt ba ngày, điều này phù hợp với dữ liệu độ mặn đo được từ tàu Cape Hatteras[37].

Hệ thống PALS có thể đo lường sự thay đổi rất nhỏ về độ mặn. Việc sử dụng sóng Radar để đo độ mặn trong nước biển đã có thấy rằng dữ liệu Radar có sự thay đổi tương đối nhỏ về sự biến dạng do gió, và hiệu ứng biến dạng này đã được thể hiện trong dữ liệu phóng xạ. Mục đích việc xây dựng công cụ này để thực hiện các phép đo từ xa chính xác cho việc phát triển các thuật toán được cải tiến và phát triển để đo độ ẩm của đất và độ mặn của đại dương. Công cụ này cũng giúp cho việc đo nhiệt độ độ sáng đại dương và phát triển các mô hình cho việc thu hồi muối biển.

- Nghiên cứu của G.I. Metternicht trong việc sử dụng SAR JERS trong việc thành lập bản đồ phân bố đất mặn cũng đã chỉ ra việc sử dụng viễn thám trong việc đánh giá, lập bản đồ khu vực xâm nhập mặn dựa trên thảm thực vật tại khu vực đó. Tuy nhiên, loại thảm thực vật này dễ gây ra sự nhầm lẫn quang học giữa các lớp mặn và kiềm khi làm việc với ảnh viễn thám quang học như Landsat TM hay Spot. Theo đó nghiên cứu này đánh giá khả năng của viễn thám Radar để lập bản đồ các vùng nước muối và kiềm. Bộ mờ được sử dụng để mô hình các lớp thông tin và một bộ cảm được thực hiện để thực hiện phân loại ảnh vệ tinh radar JERS – 1. Nghiên cứu cho thấy phân loại mờ dữ liệu SAR của JERS – 1 cung cấp những dữ liệu đáng tin cậy của các khu vực bị suy thoái bởi quy trình kiềm, muối. Những vấn đề chính là do tương tác giữa bề mặt đất và sự phản xạ của Radar, điều này đã xác định sự phân bố sai lệch của các vùng kiềm và muối kiềm xuống các khu vực bị ảnh hưởng[31].

Sự mặn hóa của đất là một dạng suy thoái môi trường nghiêm trọng ở các vùng nông nghiệp, nơi cần có thông tin về mức độ nghiêm trọng của độ mặn đất để lập kế hoạch tốt hơn và thực hiện các biện pháp cải tạo đất có hiệu quả. Viễn thám hồng ngoại và viễn thám Radar đã được sử dụng rộng rãi trong việc xác định các khu vực bị ảnh hưởng bởi muối [38]. Tương tự lợi ích của việc sử dụng dải sóng quang phổ để thành lập bản đồ, quản lý tài nguyên đã được tiến hành trong nhiều năm gần đây. Hệ thống Radar khẩu độ tổng hợp (SAR) là một cảm biến hoạt động có khả năng truyền và nhận sóng Radar phân cực trên nhiều dải tần. Năng lượng quay trở lại Anten được coi là thiết bị tùy vào: (a) Các yếu tố hình học liên quan đến thuộc tính và kết cấu của bề mặt và bất kỳ lớp phủ thực vật nào, liên quan đến bước sóng và góc lệch của cảm biến; (b) các yếu tố điện được xác định bởi các hằng số điện môi tương đối của đất và thực vật ở một bước sóng nhất định. Sau khi đưa Radar khẩu độ không gian vào

những năm 1990 [25] nhiều nghiên cứu đã được tiến hành để phát hiện và đánh giá các yếu tố liên quan đến rừng [26] vùng đất ngập nước vùng đất dốc và lập bản đồ đô thị. Tuy nhiên, có rất ít nghiên cứu trong việc thử nghiệm khả năng sử dụng dữ liệu Radar để lập bản đồ các khu vực bị suy thoái bởi độ mặn [27]. Việc phân loại thành công các vùng nước muối và kiềm bằng cách sử dụng tư liệu viễn thám cũng đòi hỏi độ chính xác của các lớp thông tin. Các phương pháp tiếp cận được áp dụng bởi nhiều nhà khoa học về đất dựa trên các ranh giới rõ rệt, sắp xếp các vùng nước muối, kiềm không bị ảnh hưởng được thực hiện theo hướng dẫn phòng chống xâm nhập mặn [28]. Trong xây dựng các hệ thống phân loại này khó để hạn chế ranh giới của lớp đối với từng vùng trong không gian

1.2. Các nghiên cứu ứng dụng viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu nhiễm mặn trong nước

1.2.1. Nghiên cứu ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian

Tư liệu ảnh vệ tinh được nghiên cứu, ứng dụng ở Việt Nam từ những năm 1980. Các ảnh vệ tinh được sử dụng trong thời gian này phần lớn là ảnh LANDSAT của Mỹ và một số ảnh viễn thám của Nga có độ phân giải tương đối thấp. Cuối những năm 1990, đầu những năm 2000 khi những cơ quan chuyên môn về viễn thám, công nghệ vũ trụ được thành lập thì những nghiên cứu viễn thám mới thực sự phát triển và ứng dụng rộng rãi trong các ngành như địa chất, lâm nghiệp, nông nghiệp, môi trường. Các loại tư liệu ảnh viễn thám đa phổ, đa độ phân giải được sử dụng khá phổ biến như MODIS, LANDSAT, SPOT, IKONOS, QuickBird.

Năm 2005, Viện Địa lý, Viện Khoa học Công nghệ Việt Nam chủ trì thực hiện đề tài sử dụng tư liệu viễn thám đa thời gian để đánh giá biến động rừng tràm và quỹ đất than bùn Vườn Quốc gia U Minh Thượng [39]. Theo đó ảnh viễn thám được sử dụng chủ yếu là LANDSAT đa thời gian với độ phân giải 30m kết hợp cùng số liệu điều vẽ thực địa để giám sát, đánh giá diễn biến tái sinh rừng tràm sau vụ cháy rừng năm 2003. Tiếp theo đó, giai đoạn 2008-2010, tiến sỹ Nguyễn Thanh Xuân, Viện Quy hoạch và Thiết kế Nông nghiệp, Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn cũng thực hiện đề tài sử dụng kết hợp các loại tư liệu ảnh vệ tinh khác nhau (MERIS, ASAR, SPOT) và số

liệu thông kê thực địa để theo dõi lúa và đánh giá biến động sử dụng đất nông nghiệp đồng bằng sông Hồng.

Gần đây hơn, PGS.TS Phạm Việt Hòa và đồng nghiệp [40, 41] đã chủ trì thực hiện một loạt các nghiên cứu ứng dụng sử dụng ảnh vệ tinh đa thời gian, đa độ phân giải (trung bình đến cao: SPOT4, 5, 6, 7) để phân loại và đánh giá biến động rừng, lớp phủ và diện tích nuôi trồng thủy sản ở các tỉnh ven biển đồng bằng sông Cửu Long từ Bến Tre đến Cà Mau. Trong các nghiên cứu này, nhóm tác giả đã chỉ ra việc sử dụng ảnh SPOT đa thời gian để đánh giá hiện trạng và biến động lớp phủ ở quy mô vùng như vùng đồng bằng Sông Cửu Long là rất hiệu quả. Năm 2015, PGS.TS Phạm Việt Hòa cùng cộng sự đã hoàn thiện nghiên cứu xây dựng hệ thống thông tin phục vụ quản lý giám sát lớp phủ rừng Tây Nguyên bằng công nghệ viễn thám đa độ phân giải, đa thời gian [42]. Trong đó, các tác giả đã sử dụng kết hợp ảnh viễn thám đa thời gian từ phân giải thấp như MODIS đến trung bình như LANDSAT và phân giải cao là SPOT5 để đánh giá hiện trạng, theo dõi diễn biến và sinh trưởng rừng Tây Nguyên các năm 1990, 2000, 2005, 2010, 2014. Các kỹ thuật phân loại và phương pháp tích hợp hiện đại đã được sử dụng để kết hợp, chiết tách được các thông tin định lượng về lớp phủ và sinh trưởng rừng ở khu vực nghiên cứu.

Ở Việt Nam hiện nay, việc chế tạo và ứng dụng thiết bị bay không người lái trong công nghệ viễn thám đang có những bước phát triển đáng kể. Năm 2013, TS. Phạm Ngọc Lãng cùng tập thể tác giả đã chế tạo thành công tổ hợp máy bay không người lái đầu tiên ở Việt Nam. Kết quả bay và chụp ảnh thử nghiệm đã được nhóm nghiên cứu thực hiện ở Hà Nội, Nha Trang và Tây Nguyên [43]. Năm 2014, nhóm nghiên cứu của Viện Công nghệ vũ trụ do PGS.TS Phạm Việt Hòa làm chủ nhiệm đã ứng dụng tích hợp thiết bị bay không người lái với hệ đo phổ kế phản xạ để bay đo phổ phản xạ nhóm một số đối tượng rừng ngập mặn tại Cà Mau [44]. Gần đây hơn, các tác giả Võ Chí Mỹ và Vũ Văn Chất đã nêu lên vai trò và khả năng ứng dụng ảnh máy bay không người lái trong công tác thành lập bản đồ 3D và giám sát tài nguyên môi trường [45, 46]. Công nghệ này hứa hẹn sẽ là một giải pháp hỗ trợ hữu hiệu cho việc thu thập dữ liệu phổ thực địa cũng như chụp ảnh viễn thám tầng thấp cho các nghiên cứu chuyên sâu, lấy mẫu, kiểm chứng và điều tra khảo sát thực địa.

Thực tế cho thấy nhu cầu đo và thu thập phổ phản xạ của các đối tượng mặt đất

đang trở nên rất cần thiết ở Việt Nam. Viện Khí tượng Thủy văn và Môi trường trang bị hệ thống đo GER1500, Khoa Địa lý, Đại học Quốc gia Hà Nội cũng sử dụng thiết bị đo phổ cảm tay nhập khẩu ASD. Tại Viện Công nghệ Vũ trụ, các chuyên gia cũng đã nghiên cứu chế tạo thành công thiết bị đo phổ phản xạ các đối tượng tự nhiên ở dải phổ nhìn thấy và hồng ngoại gần [47], và phổ kế siêu cao tần giám sát độ ẩm đất, sinh khối thực vật phục vụ công tác điều tra, giám sát tài nguyên và môi trường [48].

Các thiết bị này đã được đưa vào sử dụng, hỗ trợ nghiên cứu khá hiệu quả trong thực tế. Năm 2009, TS. Trần Minh Ý đã sử dụng phổ kế phản xạ mặt đất do Viện Công nghệ Vũ trụ chế tạo để đo phổ phản xạ của các đối tượng vùng ven biển Thừa Thiên Huế, phục vụ công tác mô phỏng ảnh vệ tinh và ứng dụng cho quản lý đới bờ [49]. Hồ Thị Vân Trang và đồng nghiệp tại Trung tâm Viễn thám, Bộ Tài nguyên và Môi trường cũng đã bước đầu nghiên cứu phương pháp xây dựng thư viện phổ ảnh vệ tinh độ phân giải cao về một số đối tượng lớp phủ mặt đất [50].

Các nghiên cứu đề cập ở trên cho thấy nhu cầu sử dụng tư liệu viễn thám và số liệu kiểm chứng thực địa rất đa dạng ở nhiều cơ quan, đơn vị trong công tác điều tra tài nguyên. Cùng với sự phong phú và sẵn có về dữ liệu viễn thám đa phổ, đa độ phân giải như hiện nay, giải pháp kết hợp dữ liệu viễn thám đa tầng như trình bày ở trên gồm viễn thám mặt đất, tầng máy bay và vệ tinh viễn thám là một giải pháp tích hợp và bổ sung rất hiệu quả cho các nghiên cứu chuyên ngành.

Các nghiên cứu về viễn thám radar trong nước

Tại Việt Nam, đã có không ít nghiên cứu về xâm nhập mặn, tuy nhiên, các hướng nghiên cứu chủ yếu tập trung vào phương pháp sử dụng mô hình động lực học, mô phỏng dòng chảy, chất lượng nước và vận chuyển bùn cát ở sông, hệ thống tưới..., phương pháp nghiên cứu kết hợp với các đặc điểm địa chất của khu vực nghiên cứu, và lồng ghép với vấn đề biến đổi khí hậu. Những nghiên cứu sử dụng tư liệu viễn thám trong phát hiện và giám sát xâm nhập mặn ở Việt Nam chưa nhiều, mới chỉ dừng lại ở việc sử dụng các tư liệu ảnh viễn thám đa phổ, hầu như còn chưa tiếp cận được tới các tư liệu viễn thám siêu phổ và viễn thám radar.

1.2.2. Viễn thám trong nghiên cứu xâm nhập mặn và đất nhiễm mặn.

Viễn thám đã được một số nhà nghiên cứu áp dụng trong lĩnh vực xâm nhập mặn

nhưng chưa nhiều, một số tập trung vào việc dùng ảnh đa phổ như MODIS, LANDSAT, SPOT để nghiên cứu mùa vụ, theo dõi quá trình sinh trưởng các cây nông nghiệp, tính toán các chỉ để lập bản đồ xâm nhập mặn. Năm 2006, trong nghiên cứu của mình, Huỳnh Thị Minh Hằng và cộng sự đã đề xuất giải pháp ứng dụng công nghệ địa tin học bao gồm 4 hợp phần chức năng là cơ sở dữ liệu, viễn thám, GIS và mô hình hóa trong công tác quản lý và theo dõi diễn biến xâm nhập mặn trên lưu vực sông Đồng Nai [51]. Nhóm tác giả chỉ ra rằng yếu tố mặn có vai trò quyết định đối với các hoạt động sử dụng đất ở vùng cửa sông ven biển và đề xuất sử dụng công nghệ viễn thám để theo dõi hệ sinh thái rừng ngập mặn như một chỉ thị sinh thái rất nhạy cảm với những biến động môi trường.

Nguyễn Đình Tài (2006) đã sử dụng ảnh LANDSAT TM và SPOT để tìm hiểu, đánh giá thay đổi về xâm nhập mặn 2 năm 1994 và 2003 dải ven biển Hải Phòng [52]. Tác giả tính toán các chỉ số thực vật NDVI, chỉ số độ mặn NDSI kết hợp với các bản đồ chuyên đề để phân vùng nhiễm mặn từ không mặn đến rất mặn ở khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên tác giả cũng chỉ ra kết quả mới dừng ở mức thử nghiệm và cần có dữ liệu, số liệu đo đạc mặt đất kiểm chứng thêm, đồng thời đề cập việc sử dụng ảnh vệ tinh phân giải cao để có thể nghiên cứu chi tiết hơn.

Năm 2011, Dương Thị Phương Khanh đã thử nghiệm đánh giá tổng quan hiện trạng xâm nhập mặn ở huyện Thạnh Phú, Bến Tre thông qua khảo sát thực tế, quan trắc một số chỉ tiêu hóa học về nước và phỏng vấn trực tiếp hộ dân [53]. Kết quả cho thấy quá trình xâm nhập mặn khá gay gắt trong mùa khô làm ảnh hưởng tới sinh kế người dân, từ đó đề xuất một số giải pháp thích ứng và ứng phó với xâm nhập mặn. Đến năm 2013, cũng tại Bến Tre, trong khóa luận tốt nghiệp của mình, Trần Thị Phương Dung đã bước đầu thử nghiệm ứng dụng viễn thám trong nghiên cứu xâm nhập mặn thông qua việc phân tích chuỗi 46 ảnh chỉ số NDVI năm 2012 tính từ ảnh vệ tinh MODIS [54]. Kết hợp với bản đồ hiện trạng cơ cấu mùa vụ cây trồng cùng năm nghiên cứu, tác giả đã đánh giá khoanh vùng diện tích bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn thành các vùng như vùng mặn, vùng lợ, vùng ngọt theo các mức độ ảnh hưởng nhiều, ảnh hưởng ít.

Đáng chú ý Nguyễn Duy Liêm đã đề xuất sử dụng hai phương pháp thống kê không gian hồi quy là Bình phương nhỏ nhất (Ordinary Least Squares- OLS), và Tự hồi quy không gian (Spatial Autoregressive- SAR) để thiết lập mối tương quan giữa giá trị phổ phản xạ trên ảnh viễn thám (chỉ số SI, NDVI và chỉ số khô hạn TDVI) với dữ liệu

đất nhiễm mặn thu thập thực địa và đề xuất mô hình dự đoán đất nhiễm mặn cho tỉnh Tiền Giang [55].

Công nghệ viễn thám đã được một số nhà nghiên cứu áp dụng trong lĩnh vực xâm nhập mặn nhưng chưa nhiều, chủ yếu mới dừng lại ở việc dùng ảnh đa phổ như Landsat, SPOT, MODIS cùng các chỉ số xâm nhập mặn tính từ các ảnh này để lập bản đồ xâm nhập mặn. Ví dụ như: Nghiên cứu xác định độ nhiễm mặn của đất vùng đồng bằng ven biển bằng công nghệ viễn thám phục vụ quản lý đất canh tác của tác giả Nguyễn Hùng Sơn, viện Vật Lý, Viện Hàn lâm khoa học và Công nghệ Việt Nam đã dùng ảnh MODIS, kỹ thuật không trộn phổ, các chỉ số xâm nhập mặn tính từ ảnh MODIS để thành lập bản đồ xâm nhập mặn. Luận văn thạc sỹ của tác giả Nguyễn Như Thuận thì dùng kết hợp dữ liệu ảnh Landsat, SPOT và Alos để đánh giá biến đổi độ mặn trên hệ thống thủy nông và biến động sử dụng đất tại huyện Giao Thủy, tỉnh Nam Định. Đặc biệt, trong luận văn thạc sỹ của mình, tác giả Nguyễn Duy Liêm đã sử dụng hai phương pháp thống kê không gian hồi quy là Bình phương nhỏ nhất (Ordinary Least Squares- OLS), và Tự hồi quy không gian (Spatial Autoregressive- SAR) để thiết lập mối tương quan giữa giá trị phổ phản xạ trên ảnh viễn thám (chỉ số SI, NDVI và chỉ số khô hạn TDVI) với dữ liệu đất nhiễm mặn thu thập thực địa và đề xuất mô hình dự đoán đất nhiễm mặn cho tỉnh Tiền Giang.

Nhìn chung, nhu cầu giám sát độ nhiễm mặn của đất phục vụ cho công tác điều tra, thống kê cũng như quy hoạch sử dụng đất đòi hỏi cần phải có những nghiên cứu ở quy mô vùng và những nghiên cứu sử dụng các phương pháp có độ chính xác cao như công nghệ viễn thám. Tuy nhiên, tại Việt Nam, việc nghiên cứu hiện tượng nhiễm mặn mới dừng lại ở việc đo đạc thống kê diện tích xâm nhập mặn thông qua việc thành lập bản đồ thổ nhưỡng, mặc dù phương pháp này còn khá nhiều hạn chế như tốn thời gian, công sức và khả năng cập nhật thấp.

Trong dự án “Nâng cao khả năng chống chịu của thành phố Cần Thơ để ứng phó với xâm nhập mặn do biến đổi khí hậu gây ra”. Một trong những hợp phần của dự án là “Xác định các ngưỡng xâm nhập mặn và hành động ứng phó” đã được nghiên cứu thực hiện bởi nhóm nghiên cứu trường đại học Cần Thơ. Kết quả điều tra khảo sát ở Cần Thơ và hai tỉnh lân cận là Hậu Giang và Sóc Trăng đã đưa ra một số giải pháp ứng phó với tình hình xâm nhập mặn như: cần thiết phải thiết lập một mạng lưới thông tin về tình

hình xâm nhập mặn của từng địa phương, hoàn thiện hệ thống quan trắc và cảnh báo tình hình xâm nhập mặn, đồng thời đề xuất các giải pháp về sinh kế và canh tác nông nghiệp phù hợp hơn.

Nhìn chung, nhu cầu giám sát độ nhiễm mặn của đất phục vụ cho công tác điều tra, thống kê cũng như quy hoạch sử dụng đất đòi hỏi cần phải có những nghiên cứu chuyên sâu, trên diện rộng với phương pháp tiếp cận phù hợp. Ở Việt Nam, việc nghiên cứu hiện tượng nhiễm mặn mới dừng lại ở việc đo đạc trực tiếp, thống kê diện tích xâm nhập mặn thông qua việc thành lập bản đồ điều tra. Tuy nhiên, phương pháp này còn khá nhiều hạn chế như tốn thời gian, công sức và khả năng cập nhật thấp.

1.3. Cơ sở khoa học trong nghiên cứu nhiễm mặn

1.3.1. Nhiễm mặn và đất mặn

Có nhiều cách hiểu về nhiễm mặn, theo cách chung nhất, xâm nhập mặn bao gồm: hiện tượng nước mặn xâm nhập sâu vào nội đồng khi xảy ra triều cường, nước biển dâng; là quá trình nước mặn thấm vào hệ thống nước ngầm ven biển dẫn đến sự pha trộn với nguồn nước ngọt của tầng chứa nước; hay do cạn kiệt nguồn nước ngọt khiến đất bị mặn hóa thông qua chuyển động mao dẫn từ các cột nước chứa muối rồi tích tụ trên bề mặt đất; hoặc là sự tích tụ quá nhiều muối hòa tan trong đất do nguyên nhân ngoại sinh chẳng hạn như tưới tiêu, thủy lợi.

Theo Tổ chức Nông lương Thế giới (FAO), đất nhiễm mặn là đất có tồn tại các loại muối hòa tan ở một nồng độ cao hơn bình thường, gây ảnh hưởng xấu đến cây trồng. Để đánh giá độ mặn của đất, người ta dùng đại lượng EC là độ dẫn điện của đất, có đơn vị là dS/m ($1\text{dS/m} = 0,64\%$). Đất mặn là những loại đất có độ dẫn điện $>4\text{dS/m}$ ở 25°C [56] tương đương với nồng độ muối hòa tan khoảng 2,56 % theo cách tính thông thường tại Việt Nam.

Dựa vào nguồn gốc phát sinh, có thể chia đất nhiễm mặn thành 2 loại: nhiễm mặn nguyên sinh (nguyên nhân khách quan) và nhiễm mặn thứ sinh (nguyên nhân chủ quan).

+ Nhiễm mặn nguyên sinh có thể do các nguyên nhân sau:

- Do ảnh hưởng của nước biển.
- Do hiện tượng mao dẫn từ nước ngầm.
- Do muối cùng với bụi từ biển và các hồ nước mặn theo gió chuyển vào.

- Do mưa rửa muối từ nơi có địa hình cao xuống thấp.
- Do sự khoáng hóa xác thực vật chịu mặn.
- Do đặc trưng về điều kiện khí hậu, địa hình, thủy văn (khí hậu khô hạn, độ bốc hơi cao)

+ Nhiễm mặn thứ sinh thường xảy ra ở những vùng khô hạn và bán khô hạn, lượng mưa rất thấp, sản xuất nông nghiệp chủ yếu dựa vào tưới tiêu. Tầng đất bề mặt bị nhiễm mặn do nguồn nước tưới bị nhiễm mặn. Hiện tượng nhiễm mặn thứ sinh còn liên quan đến các hoạt động của con người như: chế độ tưới tiêu không hợp lý trong khi hệ thống thoát nước kém, sử dụng phân bón quá mức, hay sự phát triển và mở rộng ô ạt diện tích nuôi trồng thủy sản ở các vùng đất ven biển.

Trong nghiên cứu này, nhiễm mặn được hiểu như là sự xâm mặn hóa của đất trong sản xuất nông nghiệp. Theo đó, đất nhiễm mặn là đất có chứa một lượng muối hòa tan đủ để ảnh hưởng đến sự sinh trưởng và phát triển của cây trồng. Sự mặn hóa là quá trình xâm nhiễm và tích tụ của các muối và các kim loại kiềm trong môi trường đất, nước khiến môi trường này chưa bị mặn trở nên mặn, hoặc từ ít mặn trở nên mặn nhiều hơn.

1.3.2. Cơ chế của nhiễm mặn và mặn hóa đất

Cơ chế của nhiễm mặn và mặn hóa đất bao gồm một số dạng sau:

- Xâm nhập mặn do nước biển xâm nhập vào nội đồng do triều đưa vào hay do nước biển dâng, tạo nên quá trình xâm thực của mặn vào các vùng đất ven biển.

- Sự di chuyển, thẩm thấu của nước mặn vào tầng nước ngọt dưới ảnh hưởng của sự phát triển nước ngầm các vùng ven biển. Nước ngầm nhiễm mặn này lại tiếp tục thẩm vào vùng đất kế cận của phễu diện, cứ như vậy gây nên đất và nước bị nhiễm mặn.

- Sự xâm nhập của nước biển vào sông, đặc biệt vào mùa khô, khi lượng nước đổ ra biển giảm, thủy triều từ biển mang mặn lấn sâu vào làm nước sông và những vùng lân cận bị nhiễm mặn. Ở các vùng cửa sông ven biển, nước mặn có thể xâm nhập bên dưới tầng nước ngọt, do nước mặn có tỷ trọng lớn hơn nước ngọt, nó tạo thành một "cái nêm" nước mặn nằm dưới đi sâu vào đồng bằng ven biển.

- Sự xâm nhập của nước mặn từ biển chảy vào sông, thông qua các kênh rạch, rò rỉ vào tầng đất canh tác. Sự mở rộng diện tích nuôi trồng thủy sản ven biển cũng là một

tác nhân gây mặn cho đất thông qua cơ chế thẩm thấu.

- Bay hơi: muối hòa tan tích lũy ở những nơi mà quá trình bay hơi chiếm ưu thế, nước ngầm mặn trong lòng đất đi lên bề mặt thông qua hiện tượng mao dẫn, tạo điều kiện cho nước mặn xâm nhập gây mặn hóa cho đất. Ở đây, nước chỉ là vật mang để muối di chuyển trong đất, và nước mang muối trong đất tập trung lại nhờ quá trình bay hơi và sự thoát hơi nước.

- Thẩm thấu do tưới tiêu và thủy lợi: do không đo lường được, nước mặn hoặc lợ có thể được sử dụng để dẫn vào hệ thống thủy lợi, tưới trên các diện tích canh tác nông nghiệp. Loại hình này hay xảy ra ở vùng sản xuất nông nghiệp đan xen với nuôi trồng thủy sản. Mức độ mặn hóa phụ thuộc vào thành phần và nồng độ muối trong nước, lượng nước, phương pháp tưới, độ thấm và đặc tính thổ nhưỡng.

Đất nhiễm mặn thường xảy ra ở những vùng khô hạn hoặc bán khô hạn, nơi mà điều kiện môi trường thích hợp cho việc tích tụ muối tan trong đất trong điều kiện tự nhiên hay trong điều kiện canh tác có nước tưới, và xảy ra tại vùng ven biển chịu ảnh hưởng của xâm nhập mặn do thủy triều. Hàm lượng muối hòa tan trong đất lớn tạo ra áp lực thẩm thấu gây khó khăn cho cây trồng hấp phụ nước trong đất. Đất chứa hàm lượng muối clorua natri cao gây ra sự mất kết cấu trong đất, đất thấm rất chậm hoặc không thấm. Tưới nước nhiễm mặn có thể gây ra tích tụ muối trong đất. Mặn hóa chính là quá trình tích tụ muối hòa tan trong đất. Sự mặn hóa làm hạn chế năng suất đất bởi lượng thừa muối, làm hạn chế sự phát triển của cây trồng do khả năng hấp thu nước của chúng yếu đi. Sự mặn hóa có thể xảy ra do tự nhiên hoặc do thực tế quản lý tài nguyên.

Bất cứ một quá trình nào sau đây ảnh hưởng đến sự cân bằng của nước trong đất có thể ảnh hưởng đến sự di chuyển và tích lũy muối trong đất, bao gồm: chế độ thủy văn, khí hậu, tưới, tiêu, đặc điểm của thảm phủ và bộ rễ và thực tế quản lý.

* *Sự mặn hoá từ nước ngầm*: một trong những tác nhân gây mặn hóa đất là do sự bốc hơi của nước. Trong đới bốc hơi, nước dưới đất có thể bốc hơi trực tiếp từ bề mặt nước ngầm, hoặc bốc hơi thông qua các mao quản. Khi nước bốc hơi, muối sẽ được giữ lại bên trong đới bốc hơi, nước ngầm mặn theo dòng mao dẫn đi lên hướng tới đới rễ. Bộ rễ của các cây trồng cạn sẽ chịu tác động của mặn, đặc biệt vào mùa khô hầu hết cây trồng cạn bị đờ hoặc vàng lá do thiếu nước sinh lý do sự bốc hơi tăng lên. Cơ chế mặn hóa đất chịu ảnh hưởng của nhiều yếu tố được giới thiệu trong sơ đồ dưới đây (Hình

1.1).

+ Ảnh hưởng của dòng mao dẫn: Dòng mao dẫn đi lên từ mặt nước ngầm hướng đến mức cao nhất, nhưng tốc độ của dòng này thường giảm theo sự gia tăng độ cao nên tỷ lệ của lượng muối cũng theo tỷ lệ tương ứng. Do đó hàm lượng muối cũng giảm dần từ bề mặt nước ngầm đến đới rễ. Khoảng cách mà dòng đi lên của mao dẫn trở nên không còn ý nghĩa được gọi là độ cao giới hạn của mao dẫn hay độ sâu lớp mao quản - H_c . Giá trị này phụ thuộc vào loại đất và nồng độ muối của nước ngầm.

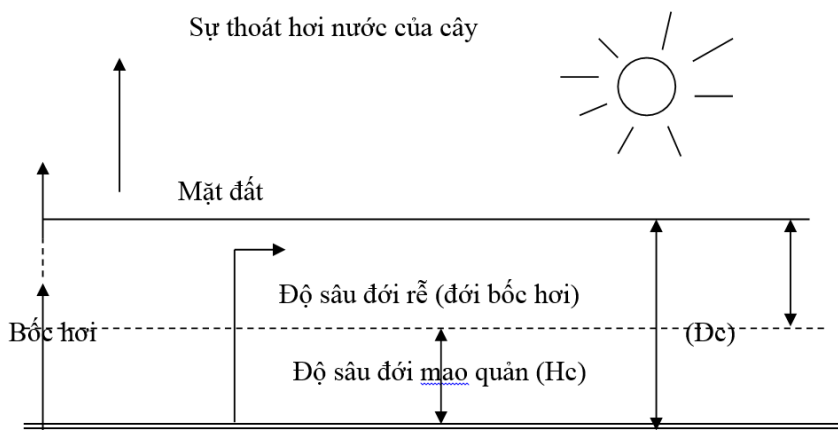
Mỗi loại đất có tỷ lệ lỗ rỗng tương ứng với nó. Các đất có thành phần cơ giới mịn có giá trị H_c lớn, các đất có hạt thô giá trị H_c nhỏ. Các đất có hạt từ trung bình có giá trị H_c trung bình. Một số giá trị chỉ báo đối với H_c như sau:

Cát thô – mịn : $H_c = 50 - 75$ cm.

Cát thịt – thịt cát : $H_c = 100 - 150$ cm.

Thịt cát mịn – thịt bột: $H_c = 150 - 200$ cm.

Thịt, thịt-sét, sét : $H_c = 100 - 150$ cm.



Hình 1-1. Mối quan hệ giữa sự bốc hơi, đới rễ và đới mao quản

+ Ảnh hưởng của tốc độ bốc hơi: Tốc độ bốc hơi mạnh trong mùa khô dẫn đến độ ẩm thấp trong đới bay hơi do đó lực hút mạnh làm tăng hướng lên của dòng nước trong mao quản. sẽ làm giảm Độ ẩm của đới bốc hơi giảm do sự bốc hơi lâu dài. Khi đới bốc hơi trở nên khô và dày hơn, sự mất ẩm hầu như không còn ý nghĩa, và hình thành tầng đất khô không ảnh hưởng bởi mặn. Hiện tượng này thường thấy ở vùng không có thực phủ. Trong kinh nghiệm sản xuất trên đất mặn, việc cây ải lớp đất canh tác có ý nghĩa tương tự, giúp gia tăng sự bốc hơi nước và ngắt dòng mao dẫn từ dưới lên.

+ *Sự ảnh hưởng của thực vật*: để sinh trưởng thông qua bộ rễ thực vật sử dụng nước trong đất. Do đó, trong trường hợp khô hạn, nước ngầm bị nhiễm mặn, các cây có bộ rễ sâu thường dễ bị ảnh hưởng hơn.

+ *Ảnh hưởng của sự phục hồi nước ngầm*: Mực nước ngầm trong đất sâu dần và sẽ gặp nước mặn khi nước bị bốc hơi. Sự khôi phục của nước ngầm phụ thuộc vào khả năng thấm rỉ của đất. Khả năng phục hồi lượng nước ngọt trong đất có thể xảy ra dễ dàng với các loại đất phù sa độ xốp của tầng mặt khá lớn.

+ *Ảnh hưởng của mực nước ngầm mặn*: Tốc độ dòng nước được hút lên bởi lực mao quản nhân với nồng độ muối trong dung dịch sẽ ảnh hưởng đến hướng di chuyển muối lên phía trên mặt đất. Do đó giá trị H_c tăng với sự gia tăng độ mặn của nước dưới đất.

* *Sự mặn hóa do nước mặt*: Sự mặn hóa đất trong vùng ven biển do xâm nhập mặn từ biển (lúc triều cường hoặc thiếu nước ngọt từ nguồn), nhưng phần lớn là do hoạt động sản xuất, canh tác của con người, trong đó lấy nước mặn để nuôi thủy sản là một trong những nguyên nhân gây mặn hóa ở diện rộng. Sự nhiễm mặn tầng đất mặt trên tất cả các đất trong vùng nghiên cứu so với các tầng bên dưới thể hiện qua số các chỉ tiêu mặn.

1.3.3. Độ mặn của đất

Đất nhiễm mặn là loại đất chứa nhiều muối hòa tan, gây hại cho cây trồng. Ở vùng ven biển, đất dễ bị nhiễm mặn do thủy triều, nước ngầm hoặc hoạt động của con người như làm muối, nuôi thủy sản. Hàm lượng các loại muối như Na_2SO_4 , NaCl , MgSO_4 trong đất tăng cao khiến đất trở nên mặn.

Độ mặn được biểu thị bằng % muối tan trong đất. Các phép phân tích độ mặn được biết đến ở Việt Nam bao gồm phương pháp Mohr, phương pháp ISRIC, phương pháp phân tích tổng số muối tan theo khối lượng và phương pháp phân tích độ dẫn điện (EC) bằng máy đo độ dẫn điện.

Hiện nay, trên thế giới thường dùng đại lượng EC là độ dẫn điện của đất để đánh giá độ mặn của đất. Đơn vị đo lường của độ dẫn điện EC là *Siemen*, ký hiệu là S. Trước kia, đơn vị này ký hiệu là *mho*. Trong thực tế, thường dùng đo vị nhỏ hơn S một nghìn lần, tức là *miliSiemen/cm* ký hiệu là *mS/cm* hay *deSiemen/m* ký hiệu là *dS/m*.

+ Đơn vị $dS/m = mS/cm = mmho/cm$

+ Quy đổi theo nồng độ muối tan: $1dS/m = 0,64‰$

Đất mặn là những loại đất có độ dẫn điện $>4 dS/m$ ở $25^{\circ}C$ tương đương với nồng độ muối hòa tan khoảng $2,56 ‰$ theo cách tính thông thường tại Việt Nam [56].

Để đo EC của đất có hai loại dịch chiết phổ biến là:

+ EC của dịch chiết đất bão hòa nước (đất nhão ở dạng sền sệt), ký hiệu là EC bão hòa.

+ EC của dịch chiết theo tỷ lệ đất/nước = 1/5, ký hiệu là EC (1:5)

Các thực hiện phổ biến trong phòng thí nghiệm là: lấy 20gram đất mịn pha với 100ml nước cất (không chứa CO_2), lắc 5 phút, để lắng 30 phút rồi lọc lấy dung dịch để đo độ dẫn điện bằng máy đo EC. Nồng độ ion trong dung dịch càng cao nghĩa là nồng độ muối càng cao, thì độ dẫn điện của dung dịch càng cao nghĩa là dung dịch đất càng mặn .

Vì đo phép đo EC (1:5) nhanh và tiện hơn nên phương pháp đo này được sử dụng thông dụng hơn. Sau đó, dùng công thức thực nghiệm để chuyển đổi như sau:

$$EC \text{ bão hòa} = 6.4 \times EC (1:5)$$

Bảng 1-1. Phân cấp độ mặn trong đất theo EC (dS/m)

Đánh giá	EC bão hòa	EC (1:5)
Không mặn	0 - 4	0 - 0,6
Mặn nhẹ	4 - 8	0,6 - 1,2
Mặn vừa	8 - 15	1,2 - 2,3
Mặn nặng	trên 15	trên 2,3

Bảng 1-2. Phân cấp độ mặn nước tưới

Cấp độ	EC (dS/m)	Đánh giá
I	$< 0,25$	Nước ngọt
II	0,25 - 0,75	Mặn nhẹ, dùng được
III	0,75 - 2,25	Mặn nặng, lúa bị hại
IV	2,25 - 5,00	Mặn rất nặng, không dùng tưới được

1.3.4. Phân loại đất mặn

Theo Szabolcs, dựa vào đặc tính có thể chia thành hai loại đất mặn chính [57] :

- Đất mặn (Saline soil): đất có chứa đầy đủ các muối hòa tan trung tính, gây ảnh hưởng tới sự sinh trưởng của cây trồng, các muối hòa tan này chủ yếu là muối kiềm gốc Clo và gốc sun phat, ví dụ như NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂, CaSO₄, MgCl₂, NaHCO₃. Nếu không được cải tạo kịp thời, loại đất này sẽ bị kiềm hóa.

- Đất kiềm (Sodic soil): là đất kiềm có chứa muối, trong đó hàm lượng kiềm là chủ yếu. Bản chất của loại đất này là đất kiềm bị mặn hóa, chứa chủ yếu là muối Na₂CO₃. Hàm lượng Na dư thừa trong đất làm hình thành đất sét, và khiến các hợp chất hữu cơ tan rã, dẫn đến sự xâm nhập của nước mặn. Một lớp vỏ đất màu nâu đen có thể được hình thành ở bề mặt trên cùng do sự tan rã của các hợp chất hữu cơ.

Hai loại đất trên không chỉ khác nhau về tính chất hóa học, mà còn phân biệt bởi sự phân bố địa lý, và địa hóa cũng như các tính chất sinh lý. Ngoài ra, hai loại đất mặn này đòi hỏi cách thức cải tạo đất, và canh tác nông nghiệp cũng khác nhau. Theo một số nghiên cứu, ngoài 2 loại đất trên, còn loại thứ ba là đất mặn kiềm. Loại này có hàm lượng Na vừa đủ để tác động đến sự sinh trưởng của cây, và chứa một hàm lượng đáng kể muối hòa tan.

Bảng 1-3. Phân loại một số loại đất mặn

Loại đất mặn	EC (ds/m)	SAR	ESP (tỷ lệ trao đổi kiềm)	pH
Đất mặn	>4	<13	<15	<8.5
Đất kiềm	<4	>13	>15	>8.5
Đất mặn kiềm	>4	>13	>15	

Theo Jan Kotuby-Amacher (2000), các mức độ đất mặn lại có thể được phân chia tương ứng với các mức độ ảnh hưởng đến cây trồng như sau [58]:

Bảng 1-4. Phân chia cấp độ mặn ảnh hưởng tới cây trồng

Loại đất mặn	Độ dẫn điện của đất (dS/m)	Nồng độ muối hòa tan (‰)	Ảnh hưởng đến cây trồng
Không mặn	0 – 2	0 – 1,28	Ảnh hưởng không đáng kể
Mặn ít	2 – 4	1,28 – 2,56	Năng suất của nhiều loại cây có thể bị giới hạn
Mặn trung bình	4 – 8	2,56 – 5,12	Năng suất của nhiều loại cây trồng bị giới hạn
Mặn	8 – 16	5,12 – 10,24	Chỉ một số cây trồng chịu đựng được
Rất mặn	> 16	> 10,24	Chỉ rất ít cây trồng chịu đựng được.

Ngoài ra, theo FAO, căn cứ vào tỷ lệ muối hòa tan, đất nhiễm mặn được chia thành các loại sau[59]:

- Đất mặn sú vẹt được: là đất ở dạng chưa thuần thực, tầng mặt thường dỏ đất, dỏ nước đang trong quá trình bồi lắng, dạng bùn lỏng lầy ngập, bão hòa NaCl, gley mạnh. Đất này trung tính hoặc kiềm yếu, giàu hữu cơ, dưỡng chất ở mức trung bình đến khá, tỷ lệ Mg^{2+} và Ca^{2+} tương đương. Muối tan $>1\%$, $Cl^{-} > 0,25\%$

- Đất mặn:

• Đất mặn nhiều: chứa các chất dinh dưỡng trung bình đến khá, thành phần cơ giới nặng, mùa khô thường nứt nẻ, muối bốc trắng trên mặt. Thường có $Cl^{-} > 0,25\%$, tổng số muối tan hơn 1%. Về mùa mưa các trị số trên thường hạ thấp hơn. Tỷ lệ $Ca^{2+}/Mg^{2+} < 1$.

• Đất mặn trung bình và ít: thành phần cơ giới nhẹ, tỷ lệ hạt cát tương đối cao, pH khoảng 4.5. Nếu được đầu tư và cải tạo hợp lý loại đất này có khả năng sản xuất nông nghiệp. Loại đất này có mức độ $Cl < 0,25\%$ và $EC < 4ms/cm$, đất có phản ứng trung tính, xuống sâu pH có tăng lên do nồng độ muối cao hơn tỷ lệ $Ca^{2+}/Mg^{2+} < 1$, mùn, đạm trung bình, lân trung bình và nghèo.

Theo FAO, phân cấp độ mặn của đất như sau:

Bảng 1-5. Phân cấp độ mặn theo FAO

Loại đất	EC (mS/cm)	Tổng lượng muối hòa tan (%)
Không mặn	< 4	< 0,15
Mặn ít	4 - 8	0,15 - 0,35
Mặn trung bình	8 - 15	0,35 - < 0,65
Mặn nhiều	> 15	> 0,65

Ở Việt Nam, phân cấp độ mặn trong đất theo hàm lượng các chỉ tiêu trong đất được thể hiện trong bảng sau:

Bảng 1-6. Phân cấp độ mặn theo hàm lượng 4 chỉ tiêu trong đất

Đánh giá	EC (1:5)	% TMT	% Cl-	% SO_4^{2-}
Không mặn	0 - 0,5	< 0,25	< 0,075	< 0,03
Mặn nhẹ	0,5 - 1,0	0,25 - 0,5	0,075 - 0,150	0,03 - 0,06
Mặn vừa	1,0 - 2,5	0,5 - 1,0	0,15 - 0,30	0,06 - 0,12
Mặn nặng	trên 2,0	> 1,0	> 0,3	> 0,12

Như vậy, để phân loại đất nhiễm mặn trên cơ sở tích hợp với tư liệu viễn thám đòi hỏi có những nghiên cứu, kiểm chứng thực địa cụ thể, tùy từng khu vực địa lý để xác định được ngưỡng phân chia phù hợp với khả năng nhận biết của đối tượng trên ảnh. Bên cạnh đó, những nghiên cứu, đánh giá về năng suất cây trồng trên cơ sở ứng dụng công nghệ viễn thám cũng là một phương pháp chỉ thị sinh thái khoa học, hiệu quả trong nghiên cứu, đánh giá sự nhiễm mặn của đất.

1.3.5. Các phương pháp truyền thống xác định nhiễm mặn bằng độ mặn của đất

Xâm nhập mặn thường được phát hiện qua các hiện tượng như: tầng nước ngầm ven biển bị nhiễm mặn, đất bị mặn hóa, bờ biển bị sạt lở, chế độ và độ mặn dòng chảy biến động, hệ sinh thái ven biển và thực trạng sử dụng đất thay đổi. Do đó, để xác định xâm nhập mặn ở địa bàn nào đó cần thiết phải tiếp cận thực tế với nhiều yếu tố khác nhau. Các thông tin đo mặn truyền thống có thể kết hợp với tư liệu viễn thám để phân tích, đánh giá tình trạng và diễn biến mặn thông qua các biểu hiện về phản xạ, tán xạ, cấu trúc, biểu hiện trên ảnh.

1.3.5.1. Phương pháp phòng thí nghiệm

Xâm nhập mặn được biểu hiện qua tính chất đất là: Đất trước đây không mặn nhưng hiện nay bị mặn, hoặc đất trước đây mặn ít nhưng hiện nay nay bị mặn nhiều hơn. Độ mặn trong đất được đánh giá thông qua phân tích trong phòng thí nghiệm. Các phép đo trong phòng thí nghiệm sau đây thường được sử dụng để xác định mức độ mặn của đất:

+ Phương pháp điện hóa được sử dụng khá phổ biến để đo độ dẫn điện của dung dịch đất, ký hiệu là EC. Độ dẫn điện tỷ lệ thuận với tổng hàm lượng muối hòa tan và áp suất thẩm thấu của dung dịch đất. EC được tính ở điều kiện chuẩn khi dung dịch đất bão hòa ở 25°C bằng thiết bị đo độ dẫn điện chuyên dụng.

+ Phương pháp hóa học xác định tổng số muối hòa tan hoặc hàm lượng các muối thành phần bằng các phương pháp hóa học. Chẳng hạn như phân tích xác định hàm lượng Cl⁻ trong dịch chiết theo tỷ lệ đất/nước = 1:5 theo phương pháp Mohr hoặc ISRIC.

Nếu thiết lập được mạng lưới các điểm lấy mẫu, cung cấp giá trị đủ dày, phân bố rải đều trên khu vực nghiên cứu, phương pháp này có thể dùng kết hợp với các phép phân tích nội suy và các phép phân tích địa lý đa biến để xây dựng bản đồ phân bố và

đánh giá mức độ xâm nhập mặn. Tuy nhiên, cách làm này khá tốn kém về thời gian và công sức.

1.3.5.2. Phương pháp hiện trường

Sử dụng thiết bị đo địa điện từ ngoài thực địa như máy đo điện trở đất hay thiết bị đo điện từ EM (Electromagnetic). Ngày nay công nghệ đo không phá hủy đang phát triển mạnh phục vụ nghiên cứu môi trường, trong đó các thiết bị đo độ dẫn của môi trường đất là công cụ khá hữu hiệu để đo độ mặn. Phương pháp này dựa trên nguyên lý về độ dẫn điện EC (Electrical Conductivity) của đất. Thiết bị đo EC sử dụng một cuộn truyền để tạo ra một từ trường thâm nhập vào trong đất. Từ trường tạo ra một dòng điện để tạo ra một trường từ thứ cấp được nhận bởi cuộn dây thu. Tỷ số từ trường thứ cấp đến trường chính là tỷ lệ tuyến tính với độ dẫn điện biểu kiến của đất.

Đây là phương pháp cụ thể, thiết thực, tiết kiệm chi phí và phát triển tốt cho các ứng dụng cơ bản. Đo đạc cho kết quả nhanh và có khả năng tính toán được nhiều thông tin, chỉ số về đặc điểm của đất do các thiết bị đo thường có phần mềm đi kèm, tạo điều kiện thuận lợi cho việc lập bản đồ, giám sát và tự động hóa các phép đo để đánh giá hiện trường.

1.3.5.3. Xác định nhiễm mặn qua sự biến đổi hệ sinh thái và biến động sử dụng đất

Mỗi vùng địa lý hay hệ sinh thái tự nhiên có những đặc trưng riêng về địa hình, khí hậu, thổ nhưỡng, cây trồng, và do đó nó quyết định hệ động, thực vật thích nghi sinh trưởng trên đó. Ở chiều ngược lại, mỗi hệ thống sử dụng đất hay sự biến động của thảm thực vật sống trên đó có thể được coi là một chỉ thị sinh thái phản ánh đặc trưng về môi trường sống. Phương pháp này được sử dụng như một cách tiếp cận xác định vùng ảnh hưởng của xâm nhập mặn và môi trường sinh thái trong một vùng. Chẳng hạn như nhóm cây ngập mặn thường phát triển ở vùng đất mặn ven biển hoặc đất lợ ven sông là những nơi vẫn còn chịu ảnh hưởng của thủy triều, đất làm muối và đất chuyên nuôi trồng thủy sản (NTTS) là đất mặn, đất chuyên trồng lúa, màu và cây ăn quả thường là đất không mặn, diện tích canh tác xen tằm - lúa thường là vùng đất lợ (mặn nhẹ). Sự biến động giữa các hợp phần này sẽ là chỉ thị cho thấy có sự thay đổi trong môi trường sinh trưởng.

Kết luận

Viễn thám trong nghiên cứu đất nhiễm mặn là sự kết hợp của giải đoán ảnh, giải đoán tổ hợp màu ảnh vệ tinh và tính toán phân tích ảnh số vệ tinh. Với nhiều ưu điểm về thời gian và đa dạng về loại ảnh, công nghệ viễn thám đã dần được sử dụng để nghiên cứu các vấn đề liên quan đến xâm nhập mặn thay thế cho các phương pháp truyền thống.

Tuy nhiên, trong thời gian qua, các nhà nghiên cứu chủ yếu chỉ dừng lại ở việc sử dụng viễn thám đa thời gian cho các nghiên cứu về xâm nhập mặn của mình mà chưa quan tâm nhiều đến viễn thám đa tầng và viễn thám đa độ phân giải. Mỗi loại viễn thám có một ưu điểm riêng để phục vụ việc giám sát xâm nhập mặn, sự kết hợp các loại viễn thám là một phương pháp mới, hạn chế những thiết sót khi chỉ sử dụng một loại viễn thám nhất định. Vì vậy, cần sử dụng kết hợp các loại viễn thám trong nghiên cứu để đạt hiệu quả cao nhất.

Sử dụng dữ liệu viễn thám đa phổ, đa thời gian kết hợp với số liệu thực địa cho phép ta theo dõi được xu thế biến động lớp phủ, theo dõi năng suất cây trồng, xác định các khu vực có phân bố cây chịu mặn, chịu lợ. Sự xuất hiện của các loại cây trồng hay thảm thực vật khác nhau cũng có những phản xạ riêng, đặc thù trên ảnh vệ tinh và các chỉ số tính toán được từ ảnh. Từ đó, tính toán được những ảnh chỉ số gián tiếp, giúp khoanh vùng ảnh hưởng và đánh giá được diễn thế của hiện tượng xâm nhập mặn hay sự mặn hóa của đất trên địa bàn nghiên cứu.

Đối với các nguồn ảnh vệ tinh độ phân giải cao trên thế giới như: SPOT, IKONOS, QuickBird, ... việc sử dụng chiết tách các thông tin phục vụ cho nghiên cứu về xâm nhập mặn sẽ cho kết quả độ chính xác đáng tin cậy. Tuy nhiên việc chủ động nguồn ảnh cũng như độ phủ trùm của những loại ảnh viễn thám này dẫn tới kinh phí cao sẽ là một trong những điều kiện đầu tiên cần phải xem xét để đảm bảo được tính khả thi trong nghiên cứu.

Ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu, đánh giá, phân vùng XNM kết hợp với số liệu thực địa để tính diện tích là khả thi và cho độ chính xác khá cao nhất là với các vùng trồng lúa chịu ảnh hưởng của XNM.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ KHOA HỌC VÀ PHƯƠNG PHÁP LUẬN KẾT HỢP TƯ LIỆU VIỄN THÁM ĐA TẦNG, ĐA ĐỘ PHÂN GIẢI, ĐA THỜI GIAN TRONG NGHIÊN CỨU DIỄN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG NHIỄM MẶN

2.1. Cơ sở khoa học ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu, đánh giá, phân vùng nhiễm mặn

2.1.1. Đặc trưng cơ bản của viễn thám quang học

Dữ liệu ảnh viễn thám được dùng để thu thập thông tin về bề mặt Trái đất bằng cách ghi lại bức xạ điện từ thông qua một hoặc nhiều vùng của phổ điện từ phản xạ từ bề mặt Trái đất. Mức độ phản xạ và hấp thụ của từng đối tượng trên bề mặt Trái đất khác nhau và mỗi vật thể tương tác duy nhất với năng lượng EM. Các vùng thích hợp nhất của phổ điện từ cho các ứng dụng viễn thám là các vùng nhìn thấy (VIS), cận hồng ngoại (NIR), hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) và hồng ngoại nhiệt (TIR).

Các cảm biến vệ tinh thu được năng lượng điện từ phản xạ hoặc phát xạ và chuyển đổi nó thành một lưới các ô (pixel). Mỗi pixel chứa một giá trị số thô (Digital Number - DN), đại diện cho mức độ phản xạ/phát xạ của một vùng cụ thể trong phổ điện từ (VIS, NIR hoặc SWIR). Vùng cụ thể này thường được gọi là một dải cảm biến. Mảng pixel tạo thành ảnh raster được dùng để phân tích. Mỗi hình ảnh raster được xác định duy nhất bởi các đặc điểm nhất định liên quan đến hệ thống vệ tinh của nó, mà cuối cùng xác định giá trị của nó cho các vấn đề viễn thám cụ thể. Những đặc điểm này là độ phân giải không gian, quang phổ, thời gian và bức xạ.

Độ phân giải không gian đề cập đến mức độ chi tiết hiển thị các đối tượng trên ảnh, hay là vật thể nhỏ nhất có thể phát hiện được của mặt đất ở trên ảnh. Đối với các vệ tinh, nó chủ yếu được xác định bởi trường nhìn tức thời của nó (IFOV) và được đo bằng mét trên mặt đất. Độ phân giải không gian của hình ảnh vệ tinh có thể dao động từ vài cm đến km, tùy thuộc vào hệ thống vệ tinh.

Độ phân giải phổ xác định có bao nhiêu dải cảm biến được cung cấp. Độ phân giải phổ lớn hơn có nghĩa là độ bao phủ của phổ điện từ lớn hơn, cho phép ghi lại tốt hơn các đặc điểm phổ của các vật thể bề mặt. Ảnh raster đa phổ có độ phân giải phổ từ ba đến hơn 30 dải phổ, trong khi hình ảnh siêu phổ có thể chứa hơn 100 dải phổ hẹp.

Độ phân giải thời gian là một phép đo tần suất một hệ thống vệ tinh quan sát lại một khu vực cụ thể. Độ phân giải này được xác định bởi các đặc điểm quỹ đạo của hệ thống vệ tinh và sự phủ trùm của nó. Các hệ thống vệ tinh có độ phân giải thời gian cao sẽ có giá trị hơn để theo dõi sự thay đổi. Một số hệ thống vệ tinh thu thập dữ liệu của một khu vực cụ thể hai lần mỗi ngày, trong khi những hệ thống khác chỉ thu thập dữ liệu một vài lần mỗi tháng.

Độ phân giải bức xạ liên quan đến độ nhạy của cảm biến vệ tinh và khả năng phân biệt giữa sự thay đổi trong dải phổ đã ghi. Độ phân giải bức xạ cao hơn thường đề cập đến số lượng cấp độ xám cao hơn trong một dải và được đo bằng số bit.

Các độ phân giải này được kết nối với nhau một cách mật thiết và độ phân giải này tăng thì ở một độ phân giải khác lại giảm. Ảnh vệ tinh có độ phân giải không gian cao thường có độ phân giải quang phổ và thời gian thấp và ngược lại. Điều này là do sự kết hợp của các yếu tố, bao gồm IFOV, tốc độ quét của vệ tinh, quang học của vệ tinh, cảm biến và tốc độ đường dẫn tải xuống. Việc chọn nguồn dữ liệu vệ tinh nào phù hợp nhất để phân tích tùy thuộc vào đối tượng và mục tiêu nghiên cứu.

Dữ liệu ảnh quang học có thể được thu thập từ hai nguồn chính: trên không (bao gồm cả máy bay không người lái) và không gian (hệ thống vệ tinh). Ảnh trên không có thể thu được bằng hệ thống camera chụp thẳng đứng hoặc xiên xuống mặt đất từ máy bay hoặc máy bay không người lái. Ảnh trên không thường có độ phân giải không gian cao và nó phụ thuộc vào chiều cao của máy bay hoặc góc chụp của camera. Độ phân giải thời gian của ảnh này phụ thuộc vào nhà cung cấp hình ảnh và thường rất thấp, hơn nữa phụ thuộc nhiều vào điều kiện thời tiết.

Hiện nay, có khoảng hơn 1381 vệ tinh hoạt động, trong đó có khoảng 344 vệ tinh (bao gồm 152 vệ tinh quang học) được sử dụng để quan sát trái đất [60]. Trong đó, có một vài ảnh quang học được sử dụng miễn phí, hay thương mại hoặc cho mục đích nghiên cứu.

2.1.2. Các dấu hiệu nhận biết đất nhiễm mặn từ ảnh viễn thám

Hiện nay, phương pháp viễn thám được sử dụng rất phổ biến trong các nghiên cứu về xâm nhập mặn, và sự kết hợp giữa phương pháp này với phương pháp đo truyền thống như dùng thiết bị đo độ dẫn điện cho độ chính xác khá cao và thu hút được sự

quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu. Trong công nghệ viễn thám, đất nhiễm mặn có thể được nhận biết bằng các dấu hiệu trực tiếp trên ảnh như màu đất, độ phản xạ, do độ mặn làm thay đổi màu đất, hay do muối tích tụ trên bề mặt đất; hoặc nhận biết qua các dấu hiệu gián tiếp như **sự xuất hiện của các loài cây chịu mặn** và các **dấu hiệu khác như năng suất cây trồng** [61].

Độ phản xạ của đất do rất nhiều yếu tố quyết định như hàm lượng muối, thành phần khoáng chất, độ ẩm, màu sắc và độ gồ ghề của đất [14]. Khi sử dụng công nghệ viễn thám để nghiên cứu đất nhiễm mặn thì đặc trưng phản xạ của đất được coi là dấu hiệu nhận biết, giải đoán trực tiếp. Hai nhóm nghiên cứu của Stoner và Schmid đã kết luận rằng đất có hàm lượng muối hòa tan cao thì cho độ phản xạ cao hơn trên dải sóng nhìn thấy và cận hồng ngoại (từ 520 đến 900 nm), đặc biệt là trên dải sóng xanh, khi ảnh hưởng của oxit sắt bị loại bỏ [62]. Nghiên cứu của Z. E. Mashimbye và các đồng nghiệp cũng chỉ ra mối quan hệ giữa EC và độ phản xạ của đất nhiễm mặn tăng dần từ dải nhìn thấy sang dải hồng ngoại sóng ngắn [63]. Hai tác giả Everitt và Shrestha thì cho rằng dải sóng cận hồng ngoại và hồng ngoại trung có mối tương quan cao nhất với giá trị EC của đất [64, 65]. Tuy nhiên, Baumgardner đã lưu ý rằng đất có giá trị EC lớn hơn 4 dS/m lại phản xạ yếu hơn trên dải sóng 500-2380nm [66].

Metternicht và Zinck cho rằng độ phản xạ của đất nhiễm mặn trên dải sóng nhìn thấy và cận hồng ngoại chịu ảnh hưởng mạnh mẽ bởi màu của lớp cận muối và độ gồ ghề của bề mặt đất [67]. Về màu sắc, bề mặt đất nhiễm mặn thường có màu trắng, trắng xám, xám, nâu nhạt và đậm hơn, trong khi đất nhiễm mặn mức độ trung bình thường có tông màu xanh sáng, và đất nhiễm mặn nhẹ thì có màu trắng hơi hồng, thậm chí là đỏ. Nhóm nghiên cứu của Fernvâez-Buces, đã thiết lập được hệ số tương quan giữa màu sắc của bề mặt đất nhiễm mặn, giá trị EC và tỷ lệ hấp thụ Natri và kết luận rằng màu sắc của cận muối trên bề mặt đất có thể được sử dụng làm chỉ thị tốt để đánh giá mức độ xâm nhập mặn [68]. Bên cạnh đó, để hạn chế ảnh hưởng của độ ẩm đất, Amal Med-hut Abdul-Qadir đã khuyến cáo sử dụng dải sóng nhìn thấy hơn là dải sóng cận hồng ngoại trong việc xác định giá trị độ sáng của đất nhiễm mặn [69].

Dấu hiệu nhiễm mặn có thể biểu hiện gián tiếp thông qua biểu hiện của hệ sinh thái hoặc thay đổi loại hình sử dụng đất có thể nhận biết bằng ảnh viễn thám. Các loài cây chịu mặn là các loài có thể chịu được hàm lượng muối hòa tan cao trong đất và có

thể sinh trưởng bình thường trên đất nhiễm mặn [70]. Các sinh cảnh hoặc hệ sinh thái có đất bị nhiễm mặn, các loài cây không chịu được mặn sẽ bị ảnh hưởng và thay thế dần bởi các loài cây ưa mặn. Khi đất mới bị nhiễm mặn ở mức độ nhẹ, thì một số loài cây chịu mặn vẫn tồn tại được nhưng không phải loài nào cũng phù hợp để dùng làm dấu hiệu nhận biết đất nhiễm mặn được. Metternicht đã chỉ ra rằng, cùng là cây chịu mặn, nhưng có loài thể hiện độ phản xạ mạnh trên dải sóng nhìn thấy và cận hồng ngoại, nhưng cũng lại có loài phản xạ yếu trên dải sóng này, do sự khác biệt về hàm lượng chlorophyll [71]. Mỗi vùng sinh thái lại có những đặc trưng riêng về loài. Nghiên cứu khảo sát chuyên sâu có thể chỉ ra sự khác biệt về phổ phản xạ và trạng thái sinh trưởng của các loài/nhóm loài cây.

Sự hiện diện của muối hoặc các ion Na với tỷ lệ cao tạo điều kiện bất lợi cho sự phát triển của thảm thực vật, thường dẫn đến bề mặt địa hình đất trống. Tuy nhiên, nồng độ muối thấp vẫn cho phép một số quần thể thực vật chịu mặn có thể tồn tại và sinh trưởng. Đây là yếu tố có thể được sử dụng làm chỉ số gián tiếp để lập bản đồ vùng mặn hoặc kiềm. Tương tự như vậy, sự hiện diện của cây chết, cây bụi hay sự xâm lấn của cây tiên phong chịu mặn xâm chiếm các khu vực thực vật trước đây là các chỉ thị sinh thái cho thấy hiện tượng nhiễm mặn đang diễn ra. Các cây chịu mặn phổ biến ở vùng đất như mắm, đước, hoặc chịu lợ như dừa nước có thể cân nhắc sử dụng như là các chỉ số viễn thám tốt về độ mặn của đất.

Một số hoạt động canh tác trên đất nhiễm mặn như trồng cây mía, bông, hoặc lúa cũng có thể phản ánh được mức độ xâm nhập mặn. Ví dụ, dựa vào độ tương quan chặt chẽ giữa giá trị NDVI của các cánh đồng trồng mía, bông, với giá trị EC, một số nhà nghiên cứu đã phân biệt được đất nhiễm mặn và đất bình thường, đồng thời đánh giá được mức độ xâm nhập mặn dựa trên sự ảnh hưởng của các hoạt động canh tác trên khu vực nghiên cứu. Hai tác giả Luis Garcia, và Ahmed Eldeiry cũng kết luận rằng việc sử dụng các yếu tố về trạng thái mùa màng như một chỉ thị chính cho đất nhiễm mặn là phương pháp viễn thám khả thi [20]. Tuy nhiên, phương pháp này được khuyến cáo sử dụng khi xâm nhập mặn là yếu tố chính, chi phối năng suất nông nghiệp bên cạnh các yếu tố khác.

Ngoài ra, một số chỉ số trên ảnh viễn thám có thể được sử dụng để làm nổi bật và xác định những thay đổi của hệ sinh thái do thay đổi độ mặn trên đất. Các chỉ số thực

vật như NDVI, LAI xác định mức độ, trạng thái sinh trưởng của cây trồng. Các chỉ số về độ mặn SI (Salinity Index) làm nổi bật hoặc gia tăng sự khác biệt giữa các trạng thái, biểu hiện của đất mặn, đất không mặn. Các chỉ số này có thể được sử dụng kết hợp theo những cách khác nhau để lập bản đồ diễn biến độ mặn của đất.

Để khắc phục, loại bỏ ảnh hưởng của các yếu tố bên ngoài trong nghiên cứu xâm nhập mặn, dữ liệu viễn thám đa thời gian được đề xuất sử dụng để có thể trích xuất được thông tin về năng suất canh tác trong một chuỗi thời gian liên tiếp, đủ dài, và từ đó có thể khoanh vùng khu vực XNM một cách chính xác nhất [11, 72]. Lobell và các đồng nghiệp đã sử dụng dữ liệu ảnh vệ tinh trong khoảng thời gian 6 năm để thiết lập mối quan hệ giữa năng suất nông nghiệp và độ nhiễm mặn của đất, và kết luận: sự sụt giảm về năng suất do một số nguyên nhân chính gây ra, trong đó có xâm nhập mặn [8, 72]. Tương tự như vậy, nghiên cứu của Weicheng Wu và cộng sự cũng sử dụng chuỗi dữ liệu viễn thám đa thời gian để xác định diễn biến xâm nhập mặn trên đất canh tác do các yếu tố như sự chuyển đổi mục đích sử dụng đất, ví dụ từ đất trồng sang đất canh tác, từ đất trồng cây nông nghiệp sang đất nuôi trồng thủy sản [11]. Sau đó, các tác giả sử dụng các chỉ số thực vật, chỉ số xâm nhập mặn và các chỉ số khác để thiết lập mối quan hệ với giá trị EC đo ngoài thực địa để xác định mức độ, diễn biến xâm nhập mặn trong đất.

2.1.3. Đặc điểm phổ phản xạ của đất trong nghiên cứu nhiễm mặn

2.1.3.1. Đặc điểm phổ phản xạ của các loại đất mặn

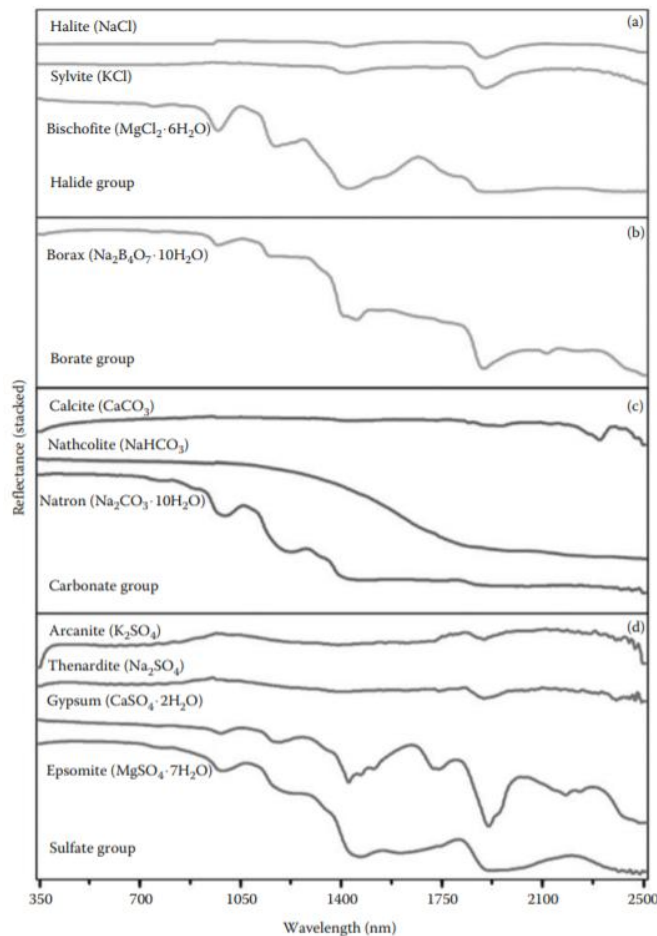
Đường cong phổ phản xạ của các loại đất muối khác nhau được thực hiện trong điều kiện phòng thí nghiệm có kiểm soát, chủ yếu ở các dải phổ nhìn thấy, cận hồng ngoại, hồng ngoại sóng ngắn và hồng ngoại nhiệt. Trong tự nhiên, tính chất phản xạ của muối trong đất thường bị nhiễu bởi các yếu tố tạp chất, cấu trúc tinh thể và thành phần nguyên tố, bên cạnh đó là ảnh hưởng của kích thước hạt đất và các tính chất đất. Hàm lượng của các muối carbonate, sunfat và clorua trong đất quyết định đến khả năng hấp thụ điện từ của đất [73]. Đất mặn có phản xạ cao hơn trong dải sóng nhìn thấy và vùng hồng ngoại gần – trung so với đất không bị nhiễm mặn. Trong điều kiện phòng thí nghiệm, các trạng thái của muối có độ phản xạ tốt nhất ở 6 dải phổ: dải nhìn thấy (550-770nm), hai dải trong vùng cận hồng ngoại (900-1030nm và 1270-1520nm), ba dải trong vùng hồng ngoại trung (1940-2150nm, 2150-2310nm và 2330-2400nm). Bên cạnh đó, ở dải phổ 1550-1720nm, trộn ảnh màu giả cũng có thể xác định được đất bị nhiễm mặn.

Nghiên cứu độ dẫn điện của đất nhiễm mặn và trên bề mặt trong dải vi sóng cũng được sử dụng. Các bộ cảm vi sóng có khả năng thu thập được dữ liệu độc lập với điều kiện khí quyển [60].

Với các loại muối Clorua, trong đó muối NaCl không tạo ra các dải hấp thụ tại vùng sóng nhìn thấy, NIR và hồng ngoại nhiệt. Một số dải sóng hấp thụ 1400nm, 1900nm và 2250nm là do ảnh hưởng của độ ẩm và chất lỏng. Với loại đất muối mà có KCl và NaCl thì dải hấp thụ phù hợp là 1440nm và 1933nm, còn với muối $MgCl_2$ thể hiện các tính năng hấp thụ ở bước sóng 1190 và 1824nm. Các nghiên cứu của Howari và nnk [74] và Farifteh [25] cho thấy xu hướng tính năng hấp thụ tăng khi nồng độ muối tăng. $CaCl_2$ hiếm khi xảy ra trong đất vì xu hướng phản ứng với natri sunfat và natri cacbonat.

Các muối sunfat như thạch cao $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ có dải hấp thụ trong khoảng 1500–1730 nm. Howari và nnk [74] đã xác định thêm một dải hấp thụ tại 1978 nm của đất Na_2SO_4 , làm cho việc phân biệt giữa thạch cao và đất đá khó khăn hơn. Bên cạnh đó, Mulder cũng chỉ ra một dải hấp thụ cho các anion sunfat gần 10.200nm (hồng ngoại nhiệt)[15]. Với muối $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ tính năng hấp thụ trong dải sóng V-NIR-SWIR (tức là, 793, 999, 1240, 1490, 1631, 1760, 1946, 3270 và 3400nm).

Muối Cabonat thể hiện hấp thụ trong phạm vi kênh nhiệt 11000–12000 nm gây ra bởi nhóm gốc CO_3^{2-} . Đất chứa $CaCO_3$ có một số dải hấp thụ trong SWIR ở 2250, 2350, 2380 và 2465nm. Trong đất có hỗn hợp nathcolite và calcite ($NaHCO_3$, $CaCO_3$) các đặc trưng phổ chiếm ưu thế vì các canxit ít hòa tan kết tủa trước, khiến các muối hòa tan hơn chiếm ưu thế.



Hình 2-1. Đường cong phản xạ phổ của các loại khoáng vật muối

Vùng đất mặn vẫn có thể được dùng để trồng trọt nếu mức độ mặn cho phép. Phản xạ phổ của đất muối đặc biệt vùng đất mặn nhiều và trung bình cao hơn các loại lớp phủ khác trong tất cả các kênh phổ và trong tất cả các ảnh LANDSAT [75]. Với các loại đất thông thường khi được tưới và ẩm có phản xạ thấp hơn so với đất mặn ở tất cả các kênh. Đối với ảnh LANDSAT MSS thì sự phân biệt giữa đất mặn với cồn cát là một trở ngại. Tuy nhiên, khi sử dụng kênh nhiệt trong LANDSAT TM thì có thể tách được cồn cát bởi cồn cát khô hơn và nhiệt cao hơn trong mùa hè.

Sự khác nhau về hàm lượng, khoáng vật, độ ẩm của đất, màu sắc và độ nhám làm thay đổi đường cong phản xạ phổ của muối. Ở trong vùng nông nghiệp thì độ nhám bề mặt khác nhau làm cho phản xạ phổ cũng khác. Cấu trúc không gian của quá trình tích tụ muối thay đổi, xuất hiện các mảnh đất nhỏ làm cho các điểm ảnh bị nhầm lẫn. Sự thay đổi thời gian phụ thuộc vào lượng mưa mùa, làm thay đổi đặc tính phổ của vùng nhiễm

mặn. Ngoài ra, sự xuất hiện của thực vật (thực vật ngập mặn và chịu mặn) cũng là nguyên nhân làm cho phổ của đất mặn bị nhiễu. Sự tích tụ muối trong giai đoạn đầu chưa tạo thành lớp vỏ do đó rất khó để có thể xác định được [60].

2.1.3.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến phản xạ của đất mặn

Độ mặn của đất là một quá trình các loại đất bị ảnh hưởng theo không gian và thời gian bởi sự xuất hiện của muối trong đất, và do đó, nó ảnh hưởng tới đặc tính quang phổ của đất. Các yếu tố chính ảnh hưởng tới phản xạ của đất mặn được xác định bởi các quan sát mặt đất và đo đặc bức xạ phổ. Nó thể hiện thông qua hàm lượng muối, độ ẩm đất, màu sắc và độ nhám bề mặt.

Các chỉ số bề mặt đất được sử dụng khi lập bản đồ các khu vực đất bị ảnh hưởng bởi mặn bao gồm các đặc điểm như lớp vỏ, độ kín bề mặt, mức độ phòng rộp, độ ẩm của đất. Hiện tượng sủi bọt và lớp vỏ muối xảy ra ở những nơi muối kết tủa trực tiếp trên bề mặt đất do mao dẫn nước mặn từ dưới đất hoặc mực nước ngầm bị nhiễm mặn cao. Lớp vỏ khác nhau chủ yếu ở tính liên tục trong không gian (diện tích), độ dày, độ nhám và màu sắc. Các loại muối khác nhau tạo ra các đặc điểm hình học khác nhau ở bề mặt đất. Ví dụ, lớp đất mặt phồng lên do muối natri sunfat, trong khi lớp vỏ muối mịn là do sự hiện diện của clorua.

Độ kín bề mặt diễn ra với sự có mặt của hàm lượng natri cao góp phần làm suy yếu sự kết tụ của đất và gây ra sự bờ rời của đất. Nguyên nhân là do bản chất hydrat hóa cao của Na có trong đất, ion này và vỏ nước dày của nó ngăn chặn các hạt đất sét kết bông. Độ chặt của đất thường liên quan đến sự hòa tan các chất hữu cơ có trong đất với độ pH cao.

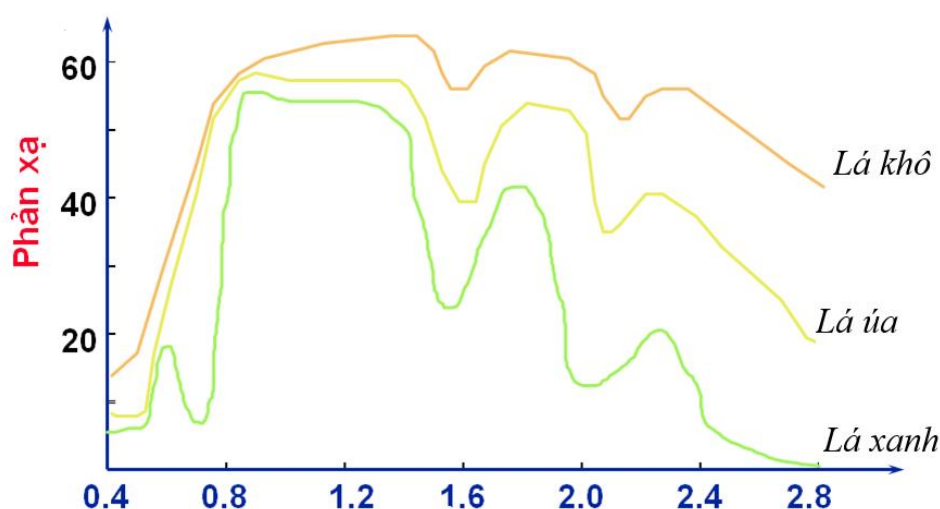
Cấu trúc và màu sắc của lớp vỏ muối có thể thay đổi đáng kể, dẫn đến sự thay đổi lớn của hệ số phản xạ. Vùng có độ nhám cao thì phản xạ giảm so với vùng có bề mặt mịn. Nước mặn thấm vào đất tại các khu vực hoạt động xả hay tưới nước tạo nên các vùng ẩm ướt phía trên mực nước ngầm làm tăng mao mạch muối lên bề mặt đất. Xu hướng muối tập trung cục bộ tạo các vùng loang lổ có thể gây nên hiện tượng nhiễu trong các pixel riêng lẻ trên ảnh.

2.1.4. Đặc điểm phản xạ phổ của thực vật trong nghiên cứu nhiễm mặn

Đặc điểm phản xạ phổ của thực vật thay đổi theo bước sóng và các giai đoạn sinh trưởng khác nhau của thực vật. Bức xạ mặt trời bị phản xạ ngay một phần khi tới bề mặt lá cây. Đặc trưng phản xạ phổ của thực vật phụ thuộc vào đặc điểm của lá bao gồm sự định hướng và cấu trúc của lá.

Trong quá trình quang hợp, cây, lá hấp thụ mạnh năng lượng ở vùng sóng xanh lam và sóng đỏ, do đó, phổ phản xạ của thực vật có giá trị thấp ở 2 dải bước sóng này. Ngược lại, thực vật có hai đỉnh phản xạ đặc trưng nằm ở vùng sóng xanh lá và cận hồng ngoại. Đây là lý do vì sao mắt người quan sát thấy lá cây tươi xanh trong vùng khả kiến.

Khi cây chịu mặn hoặc khô hạn, trên lá sẽ giảm diệp lục tố nên phản xạ mạnh ở vùng đỏ, khiến lá có màu vàng đỏ. Lá khỏe mạnh khuếch tán tốt ở vùng cận hồng ngoại. Ở vùng hồng ngoại nhiệt và vi sóng, hơi nước trong lá hấp thụ ánh sáng mạnh hơn, còn khả năng phản xạ giảm rõ rệt.



Hình 2-2. Đặc trưng phổ phản xạ của lá cây theo các trạng thái sinh trưởng

Một số cây trồng như cỏ linh lăng, cây bông, cây mía có thể được trồng trên đất bị nhiễm mặn hoặc kiềm. Năng suất của chúng là một chỉ thị phản ánh mức độ nghiêm trọng của độ mặn có trong đất. Năng suất của các loại cây trồng này bị giảm đi do sự hiện diện của muối có thể được nhận biết thông qua một số các biểu hiện:

- Các mầm cây sinh trưởng chậm, cây trồng phát triển khác biệt theo từng cụm khu vực.

- Độ che phủ của cây trồng giảm và có dấu hiệu xâm lấn của cỏ dại và cây chịu mặn.
- Giảm năng suất cây trồng
- Lá bị cuộn và úa vàng

Tình trạng sinh trưởng của cây trồng có thể được ước tính từ NDVI, hệ số độ sáng, mật độ ảnh trên các ảnh hồng ngoại màu. Tại một số khu vực, mối tương quan cao giữa NDVI của cây bông, cây mía và EC có thể được dùng để tách vùng đất kiềm mặn với vùng không bị ảnh hưởng.

Thực vật nói chung hấp thụ rất tốt năng lượng điện từ trong dải sóng nhìn thấy. Sự hấp thụ giảm đáng kể và phản xạ tăng nhanh từ bước sóng 0.7 μm . Độ phản xạ gần như không đổi từ 0.7-1.3 μm và sau đó giảm dần cho các bước sóng dài hơn. Thực vật có mức độ phản xạ mạnh nhất trong dải sóng cận hồng ngoại của. Khi so sánh với vùng đất mặn ở trong dải kênh đỏ thì thực vật có phản xạ thấp hơn, và kênh cận hồng ngoại thì phản xạ lại cao hơn.

Sự phản xạ của từng loại thực vật phụ thuộc vào thành phần hóa học và hình thái của chúng. Phản xạ của lá từ những cây trồng trên đất bị nhiễm mặn thấp hơn so với phản xạ của lá trên đất không bị nhiễm mặn trước khi trưởng thành và cao hơn sau đó. Với lá trưởng thành, phản xạ tăng lên ở kênh cận hồng ngoại. Tới kênh hồng ngoại trung thì phản xạ giảm mà không bị ảnh hưởng với nước do hiệu ứng mọng nước và tăng trong trường hợp khác. Độ dày của lá như thực vật mọng nước làm giảm nhiều hơn là sự gia tăng phản xạ. Ở kênh cận hồng ngoại có một quan hệ nghịch giữa phản xạ và độ mặn bởi độ mặn làm cho lớp phủ thực vật ít (giảm mật độ, chiều cao cây). Trong ảnh trộn màu tiêu chuẩn, thực vật bị nhiễm mặn có màu đỏ sẫm hoặc đỏ đậm là do quá trình trưởng thành khác nhau của cùng loại thực vật trên đất mặn và đất không mặn. Các cây chịu mặn trồng khu vực đầm lầy nhiễm mặn là nguồn dữ liệu tham khảo tốt về mức độ mặn nhưng cần phải hiệu chuẩn mặt đất.

2.1.5. Đặc điểm phản xạ của nước

Bước sóng của bức xạ và các đặc tính vật lý-hóa học của nước sẽ dẫn đến sự thay đổi các đặc trưng phản xạ phổ của nước [76]. Khi điều kiện vật lý thay đổi thì phản xạ phổ thay đổi. Ở các thể rắn như băng, tuyết, nước phản xạ tốt trong dải sóng nhìn thấy.

Còn khi ở trạng thái lỏng, nước phản xạ năng lượng rất thấp so với các lớp phủ khác, khiến cho nó rất dễ nhận biết trên ảnh. Sự khác biệt về độ phản xạ này là do sự khác biệt trong liên kết nguyên tử ở trạng thái lỏng và rắn. Khi ở dạng lỏng, nước phản xạ cao hơn trong khoảng $0.4\mu\text{m} - 0.6\mu\text{m}$. Từ bước sóng $0.7\mu\text{m}$ trở đi nước hấp thụ phần lớn năng lượng tới và phản xạ rất thấp. Do đó, nước trong vát xuất hiện với tông màu tối hơn trong kênh phổ cận hồng ngoại.

Tính chất phản xạ của một vùng nước không chỉ đơn thuần là chức năng của nước mà còn là vật chất có trong nước. Nhiều đặc điểm quan trọng của nước như nồng độ oxy hòa tan, pH và nồng độ muối không thể quan sát trực tiếp thông qua thay đổi độ phản xạ của nước. Tuy nhiên, các tham số này đôi khi tương quan với kênh chỉ số phản xạ thu được.

Các hạt vật chất trong nước hấp thụ và tán xạ sóng điện từ của ánh sáng mặt trời. Các photon ánh sáng được tán xạ trong khối nước một phần sẽ truyền ngược lại, đi ra khỏi khối nước và hợp thành chùm tia bức xạ. Viễn thám có thể cho thấy được sự khác nhau ở giá trị phản xạ phổ thu được trong vùng nước trong (pure water) với vùng nước đục (turbidity water). Trong khối nước đục, hàm lượng và thành phần bùn cát lơ lửng là 2 yếu tố khiến lượng bức xạ ra khỏi khối nước trong dải sóng đỏ lớn hơn so do tính chất các hạt bùn cát lơ lửng tán xạ mạnh hơn ở dải sóng đỏ.

Các tính chất quang học vốn có của một vùng nước ven biển nhất định được xác định bởi các tính chất quang học của nước, độ mặn, phytoplankton, trầm tích lơ lửng, chất hữu cơ hòa tan có màu (CDOM). Cùng với nhau, những hợp phần này quyết định màu sắc của nước biển ven bờ và vùng cửa sông và làm suy giảm của ánh sáng truyền trong nước.

Nước hấp thụ mạnh bức xạ trong vùng sóng cận hồng ngoại và hồng ngoại sóng ngắn. Phổ phản xạ thu được từ nước phát sinh từ 3 nguồn:

- + Phản xạ bề mặt/phản xạ gương (surface/specular reflection);
- + Phản xạ bởi các vật chất lơ lửng có trong nước/phản xạ khối nước (volume reflection);
- + Phản xạ đáy (bottom reflection).

Do đó, chỉ có phản xạ khối chứa đựng các thông tin liên quan tới chất lượng nước. Nước sạch có phản xạ khối rất thấp (6-8%) và chỉ giới hạn trong vùng dải bước sóng khả kiến.

Phần lớn năng lượng mặt trời bị nước hấp thụ để làm tăng nhiệt độ, trong khi phần còn lại phản xạ từ bề mặt và các vật chất lơ lửng tạo thành năng lượng phản xạ của nước. Các bức xạ của bước sóng dài trong dải nhìn thấy và cận hồng ngoại bị hấp thụ nhiều hơn các bước sóng trong dải nhìn thấy. Do đó, nước có màu xanh lục hoặc màu xanh lá do phản xạ mạnh hơn tại những bước sóng ngắn và tối màu hơn nếu nhìn ở các bước sóng đỏ và cận hồng ngoại.

Các yếu tố ảnh hưởng tới sự thay đổi phản xạ của nước là độ sâu, thành phần vật chất trong nước và bề mặt của nước. Khả năng phản xạ tăng lên khi nước bị đục do ảnh hưởng tán xạ của các vật chất lơ lửng, đặc biệt ở vùng sóng đỏ. Khi tính chất của nước bị thay đổi thì giá trị phản xạ phổ của nước thay đổi và đường cong phản xạ phổ của sẽ bị thay đổi.

2.1.6. Các chỉ số viễn thám trong nghiên cứu nhiễm mặn

Viễn thám có khả năng thu thập thông tin theo không gian và thời gian, do đó, nó có khả năng xác định sự thay đổi của muối trong đất. Có hai cách tiếp cận để phát hiện sự tích tụ muối bằng viễn thám: một là xác định sự tích tụ muối trực tiếp trên đất trồng dựa trên đặc điểm phản xạ phổ của đất bị ảnh hưởng bởi mặn (như thành phần khoáng vật của đất, muối trên bề mặt đất). Hai là phát hiện sự tích tụ muối gián tiếp thông qua các biểu hiện thứ sinh của sự tích tụ muối (như sự thay đổi của lớp phủ, hay quá trình sinh trưởng của thực vật). Tư liệu viễn thám có thể ứng dụng trong nghiên cứu và lập bản đồ nhiễm mặn đất là bởi mặn hóa không phải là một trạng thái tĩnh tĩnh, nó thay đổi thông qua quá trình biến đổi hệ thống sử dụng đất hay các biểu hiện sinh lý (biophysical parameters) của hệ sinh thái tại khu vực nghiên cứu. Trong luận án này, nghiên cứu tập trung vào khai thác các chỉ số về biểu hiện sinh lý của hệ sinh thái, đất và thực vật có khả năng ứng dụng trong giám sát và thành lập bản đồ nhiễm mặn đất hướng tới khai thác các loại tư liệu vệ tinh phổ biến hiện có như LANDSAT và Sentinel-2.

Các thông tin viễn thám được phân thành các nhóm khác nhau như SI (Salinity Index), NDSI (Normalized Difference Salinity Index), chỉ số độ sáng BI (Brightness

Index), các chỉ số NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) để đánh giá, thành lập bản đồ nhiễm mặn của đất. Với nhóm chỉ số thực vật mà đại diện là chỉ số NDVI phù hợp để đánh giá diễn biến xâm nhập mặn của đất vì đất càng mặn thì sự sinh trưởng của cây trồng càng giảm và giá trị NDVI càng thấp. Tuy nhiên, việc phát hiện độ mặn của đất mà chỉ dùng NDVI có thể bị ảnh hưởng bởi sự xuất hiện của cây ngập mặn và cây chịu mặn làm cho sự phản xạ của đất mặn bị nhiễu, dẫn đến phân loại không đúng. Để giảm thiểu sai số phân loại, chỉ số SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) và các chỉ số thực vật khác như EVI (Enhanced Vegetation Index) được bổ sung để phân biệt phản xạ của đất và thảm thực vật. Ngoài ra chỉ số GDVI (Greenness Difference Vegetation Index) được phát triển trong những năm gần đây cho thấy kết quả khả quan trong việc đánh giá độ mặn của đất cũng được xem xét trong nghiên cứu này.

2.1.6.1. Chỉ số thực vật

Chỉ số thực vật được xây dựng trên các nguyên lý toán học nhằm tăng độ phân biệt phổ phản xạ của thực vật trong các kênh phổ khác nhau, qua đó giúp làm nổi bật những đặc trưng riêng của lớp phủ thực vật thông qua giá trị tính toán cho từng điểm ảnh. Chẳng hạn, mức độ phát triển cây xanh có thể đánh giá thông qua các chỉ số sinh lý như hàm lượng chlorophyll hoặc nước trong lá (chẳng hạn NDVI, NDWI), cũng như một số chỉ số kết cấu như cấu tạo lá hay tán cây (như LAI, EVI). Trong các chỉ số này, NDVI là loại phổ biến nhất vì dễ hiểu và dễ sử dụng. NDVI biểu thị sự phát triển của cây dựa vào mối liên hệ với lượng diệp lục trong lá. Tuy nhiên, NDVI có xu hướng bị bão hòa ở mức cao, thường từ 0,8 đến 1.

Các chỉ số khác như SAVI có tính đến yếu tố hiệu chỉnh đất có thể giải quyết các vấn đề phản xạ nhiễu nền ở khu vực có mật độ thực vật thưa hơn. Hay chỉ số EVI bao gồm giá trị hệ số sol khí để giảm thiểu ảnh hưởng của nhiễu khí quyển với phản xạ thực vật. Trong mỗi trường hợp khác nhau, việc hiệu chỉnh các chỉ số thực vật là rất cần thiết để cải tiến độ chính xác của việc xác định nhiễm mặn.

Bảng 2-1. Một số chỉ số thực vật phổ biến sử dụng trong nghiên cứu xâm nhập mặn [60]

Chỉ số thực vật	Công thức	Ghi chú
-----------------	-----------	---------

Normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)}$	
Soil-adjusted vegetation index	$SAVI = (1+L) \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)}$	Trong đó L =0.5
Enhanced vegetation index	$EVI = G \frac{(NIR-R)}{(NIR+C_1R-C_2B+L)}$	Trong đó: L=1, c1=6, c2=7.5
Generalized Difference Vegetation Index	$GDVI = \frac{(NIR^n - R^n)}{(NIR^n + R^n)}$	n=1 thì GDVI=NDVI n=2 thì GDVI có mối quan hệ tốt hơn với chỉ số LAI. Khi n tăng lên 3, 4 thì chỉ số GDVI trở nên bão hòa

Các chỉ số thực vật được sử dụng phổ biến để gián tiếp xác định mức độ nhiễm mặn của đất. Tuy nhiên, đặc điểm canh tác và cải tạo đất có thể dẫn tới những nhận định sai về diễn biến mặn và sự phát triển của thực vật. Hơn nữa, các loài cây trong giai đoạn sinh trưởng ban đầu có mức độ chịu mặn khác nhau khiến phản xạ phổ trên ảnh khác nhau cũng là một yếu tố cần lưu ý khi sử dụng chỉ số thực vật trong nghiên cứu diễn biến xâm nhập mặn.

2.1.6.2. Chỉ số muối, chỉ số độ mặn

Nhằm làm nổi bật các biểu hiện về mặn trên đất so với các nhóm đối tượng lớp phủ khác có nhiều loại chỉ số muối hay chỉ số độ mặn được nghiên cứu phụ thuộc vào các điều kiện tự nhiên, môi trường sinh thái, lớp phủ. Thường các chỉ số muối/chỉ số độ mặn được tính từ các kênh phổ trong vùng sóng khả kiến và cận hồng ngoại. Các kênh phổ này phù hợp để có thể nghiên cứu thử nghiệm trên ảnh vệ tinh LANDSAT và Sentinel-2 để thành lập bản đồ xâm nhập mặn trong đất.

Bảng 2-2. Các kênh chỉ số muối có khả năng ứng dụng cho ảnh Sentinel2 và ảnh LANDSAT [77]

Chỉ số muối	Công thức
Canopy Response Salinity Index	$CRSI = \frac{(NIR \times R) - (G \times B)}{(NIR \times R) + (G \times B)}$
Normalized difference salinity index	$NDSI = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$

Salinity index-1	$SI = \sqrt{(B \times R)}$
Salinity index-2	$SI = \sqrt{(G \times R)}$
Salinity index-3	$SI = \sqrt{(G^2 + R^2 + NIR^2)}$
Salinity index-4	$SI = \sqrt{(G^2 + R^2)}$
Salinity index-5	$SI = \frac{B}{R}$
Salinity index-6	$SI = \frac{(B-R)}{(B+R)}$
Salinity index-7	$SI = \frac{(G \times R)}{B}$
Salinity index-8	$SI = \frac{(B \times R)}{G}$
Salinity index-9	$SI = \frac{(NIR \times R)}{G}$
Salinity index-10	$SI = \frac{(SWIR1 - SWIR2)}{(SWIR1 + SWIR2)}$
Salinity index-11	$SI = \frac{SWIR1}{SWIR2}$
Salinity index-11	$SI7 = \sqrt{R * NIR}$

2.1.6.3. Các chỉ số vật lý khác

Trong nghiên cứu xâm nhập mặn, để làm nổi bật và gia tăng mối tương quan giữa dữ liệu mặn với thông tin phản xạ phổ trên ảnh vệ tinh, một số các ảnh chỉ số khác được sử dụng như chỉ số độ sáng của đất, chỉ số nhiệt cũng như các chỉ số tỷ lệ giữa các kênh ảnh phản xạ.

Bảng 2-3. Các chỉ số vật lý khác

Chỉ số	Công thức
Chỉ số độ sáng	$BI = \sqrt{(R^2 + NIR^2)}$
Chỉ số cường độ của các kênh trong dải nhìn thấy	$INT1 = \frac{(G+R)}{2}$
Chỉ số cường độ của các kênh trong dải nhìn thấy và cận hồng ngoại	$INT2 = \frac{(G+R+NIR)}{2}$

Ngoài các nhóm trên, phân tích thành phần chính PCA là một trong những nhóm chỉ số được ứng dụng để chiết xuất các yếu tố không tương quan giữa các kênh phổ của ảnh Sentinel2.

2.1.7. Cơ sở khoa học ứng dụng viễn thám Radar trong nghiên cứu nhiễm mặn

Radar (Radio Dectection And Ranging) dùng để phát hiện và xác định vị trí của các đối tượng thông qua việc phát ra những sóng năng lượng vi sóng theo một hướng quan tâm rồi ghi lại cường độ của những sóng phản hồi từ các đối tượng trong trường thu nhận của thiết bị. Hệ thống radar có thể tạo hình ảnh hoặc không tạo hình ảnh mà bằng các giá trị đo.

Viễn thám radar có hai hệ thu ảnh với sóng radar: hệ viễn thám radar chủ động (active) là hệ thống viễn thám sử dụng nguồn năng lượng chủ động phát và thu sóng radar phản hồi thông qua anten thu phát; hệ viễn thám radar bị động (passive) là hệ thống thu nhận sóng radar phát xạ từ một đối tượng trong tự nhiên.

Một trong những ưu điểm nổi bật của hệ viễn thám radar chủ động là không phụ thuộc nguồn ánh sáng mặt trời như viễn thám quang học. Đồng thời radar chủ động sử dụng bước sóng dài, do vậy nó có khả năng đâm xuyên, không bị ảnh hưởng bởi mây che phủ. Cho đến nay, một số loại tư liệu viễn thám radar chủ động phổ biến được biết đến như RADARSAT của Canada (phóng từ từ 1995) sử dụng kênh C, ALOS PALSAR của Nhật (từ 2006) sử dụng kênh L, và gần đây là Sentinel-1 của Châu Âu năm 2014 sử dụng kênh C. Hiện nay, mới chỉ có tư liệu Sentinel-1 là miễn phí toàn bộ, hai loại tư liệu viễn thám còn lại chưa được chia sẻ miễn phí toàn bộ.

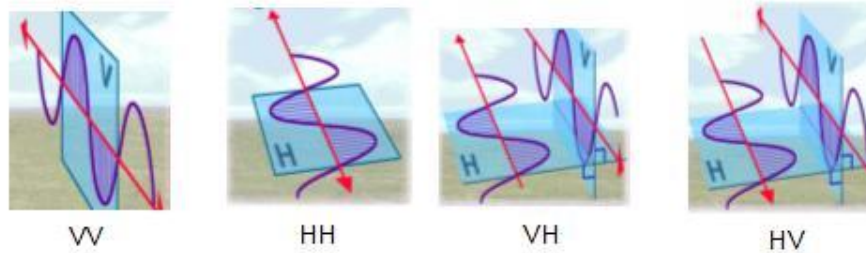
Bảng 2-4. Bước sóng và tần số dùng trong viễn thám radar

Kênh	Bước sóng λ (cm)	Tần số τ (MHz)
Ka	0.8 - 1.1	40.000 - 26.500
K	1.1 - 1.7	26.500 - 18.000
Ku	1.7 - 2.4	18.000 - 125.000
X	2.4 - 3.8	125.000 - 8.000
C	3.8 - 7.5	8.000 - 4.000
S	7.5 - 15	4.000 - 2.000
L	15 - 30	2.000 - 1.000
P	30 - 100	1.000 - 3.000

Trong thu nhận và khai thác tư liệu viễn thám Radar có khẩu độ tổng hợp - SAR (Synthetic Aperture Radar) cần lưu ý đến yếu tố phân cực, chia làm 2 loại:

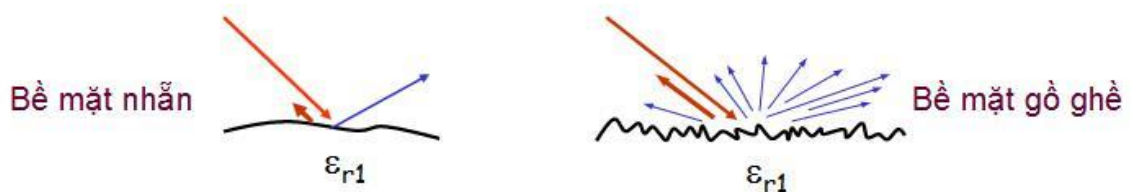
- Phân cực giống nhau:

- + VV - phát phân cực đứng, thu phân cực đứng
- + HH - phát phân cực ngang, thu phân cực ngang
- Phân cực chéo:
 - + HV - phát phân cực ngang, thu phân cực đứng
 - + VH - phát phân cực đứng, thu phân cực ngang



Hình 2-1. Phân cực trong viễn thám Radar

Tán xạ là một đặc trưng của ảnh Radar, đóng vai trò quyết định trong việc tạo ảnh Radar thể hiện sự tương tác giữa sóng Radar với bề mặt đối tượng. Tín hiệu tán xạ ngược là kết quả giữa tán xạ bề mặt, tán xạ khối và đa tán xạ khối. Các tán xạ này phụ thuộc vào độ gồ ghề của bề mặt và đặc trưng điện môi của môi trường. Nghiên cứu về xâm nhập mặn có thể khai thác đặc điểm này của tư liệu viễn thám radar để xác định và đánh giá mức độ nhiễm mặn thông qua mối quan hệ giữa hệ số tán xạ ngược trên ảnh (back scattering) và giá trị về độ mặn, độ dẫn điện (EC) của đối tượng đo được ngoài thực địa.



Hình 2-2. Các kiểu tán xạ trên các bề mặt khác nhau

Hiện nay, khai thác tư liệu viễn thám radar SAR đang thu hút được sự quan tâm sử dụng trong các nghiên cứu về xâm nhập mặn. Sự kết hợp, phân tích tương quan trực tiếp thông tin viễn thám trên ảnh radar với số liệu, dữ liệu thu được từ phương pháp truyền thống như phân tích trong phòng hay như đo đạc thực địa bằng thiết bị đo độ dẫn điện cho thấy kết quả khá khả quan. Bên cạnh đó, tư liệu viễn thám radar cũng có thể sử

dụng để nhận biết đất nhiễm mặn thông qua biến động sử dụng đất, biến động hệ sinh thái hay trạng thái sinh trưởng của cây trồng theo thời gian.

2.2. Cơ sở khoa học một số thuật toán machine learning trong ứng dụng nghiên cứu nhiễm mặn.

Như đã thảo luận ở các phần trên, độ chính xác của việc thành lập bản đồ độ mặn của đất phụ thuộc vào phương pháp được sử dụng và không có phương pháp nào là tốt nhất cho tất cả các khu vực. Bên cạnh đó, mặc dù có thể thu nhận dữ liệu dưới nhiều điều kiện thời tiết, không bị ảnh hưởng bởi mây, nghiên cứu ứng dụng tư liệu ảnh radar vẫn có những khó khăn đặc thù riêng, khó lượng hóa và đánh giá trực quan. Trong nghiên cứu này, cách tiếp cận dựa trên phương pháp học máy (machine learning) được thử nghiệm trong đánh giá và ước tính mối quan hệ giữa EC đo đạc ngoài thực địa với các giá trị tán xạ ngược (backscattering) và thông tin cấu trúc trên ảnh radar. Năm thuật toán học máy đã được xem xét thử nghiệm: Multilayer perceptron neural network (MLP-NN) - mô hình mạng nơron đa lớp, Radial Basis Function neural networks (RBF-NN) - mô hình mạng nơron hướng tâm, Gaussian Processes (GP) - mô hình hồi quy phân phối Gaussian, Support Vector Regression (SVR) - mô hình hồi quy vector hỗ trợ, và Random Forests (RF) - mô hình phân loại rừng cây ngẫu nhiên.

2.2.1. Neural Networks

Mạng nơ-ron (NN) là một trong những thuật toán học máy phổ biến và đã chứng minh hiệu quả của nó trong việc ước tính các thông số lý sinh khác nhau bằng ảnh vệ tinh, chẳng hạn như độ ẩm đất, độ mặn của đất và lập bản đồ số về đất. Ưu điểm chính của NN là nó linh hoạt và hoạt động tốt cho các vấn đề phức tạp với độ chính xác dự đoán cao, với cả số lượng mẫu lớn và nhỏ. Hiệu suất của NN bị ảnh hưởng bởi cấu trúc và thuật toán được sử dụng để tối ưu hóa trọng số. Với các vấn đề liên quan đến hồi quy, Multilayer Perceptron NN (MLP-NN) và Radial Basis Function NN (RBF-NN) được sử dụng rộng rãi nhất.

Đối với MLP-NN, mô hình này thường có ba lớp: lớp dữ liệu đầu vào, lớp ẩn và kết quả đầu ra. Số lượng neuron đầu vào bằng số lượng biến đầu vào, trong khi đó số lượng neuron ẩn phải được tính toán, còn số lượng neuron đầu ra là một trong những giá trị EC ước tính trong nghiên cứu. Hoạt động của mô hình MLP-NN được đặc trưng bởi

các trọng số khái quát giữa ba lớp. Các trọng số này được bắt đầu, và sau đó, được cập nhật bằng thuật toán lan truyền ngược thông qua các quy trình lặp.

Đối với **RBF-NN**, mô hình này cũng bao gồm ba lớp như trong MLP-NN; tuy nhiên, nó khác về lớp ẩn được thực hiện tính toán. Lớp ẩn của RBF-NN được ám chỉ đến các nhóm đơn vị RBF, ở đó, các neuron đầu vào được gộp nhóm lại trong một không gian mới, sử dụng thuật toán K-mean. Để xây dựng mô hình RBF-NN, chỉ cần xác định số lượng nhóm đơn vị.

2.2.2. Gaussian Process

Phương pháp hồi quy Gaussian Process (GP) là một thuật toán học máy hiện đại, được sử dụng rộng rãi để ước tính các thông số lý sinh bằng ảnh vệ tinh, ví dụ hàm lượng diệp lục, độ ẩm đất và sinh khối trên mặt đất. Sử dụng kỹ thuật thống kê Bayesian, GP xây dựng mô hình hồi quy trong đó các tham số của nó được giả sử tuân theo phân phối Gaussian. Ưu điểm chính của GP là khả năng tự động tối ưu hóa các tham số để đạt được các mô hình hiệu quả nhất.

Xem xét tập dữ liệu độ mặn của đất $D = ([X_i, y_i], i = 1, 2, \dots, m)$ với $X_i \in \mathbb{R}^n$ là một ma trận gồm m biến đầu vào với n quan sát, trong đó $y_i \in \mathbb{R}$ là giá trị đầu ra, trong nghiên cứu này là độ dẫn điện (EC). Mỗi quan hệ của các biến đầu vào và đầu ra được mô hình GP được xác định thông qua phương trình dưới đây:

$$\hat{y} = f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K(X_i, X)$$

Trong đó α_i là trọng số và K là hàm toán Radial Basis kernel (RBF) được mô tả như phương trình dưới đây:

$$K(X_i, X) = \beta \exp \left(- \sum_{i=1}^m \frac{(X_i^{(m)} - X^{(m)})^2}{2\sigma^2} \right)$$

Trong đó β là hệ số tỷ lệ và σ là tham số kernel.

Hiệu suất của mô hình GP phụ thuộc vào các tham số và trọng số ω_i và chúng có thể được tự động chuyển và tối ưu hóa thông qua tối đa hóa biên độ xác suất. Ở đây, các tham số σ được xác định dựa trên dữ liệu đầu vào hiện có.

2.2.3. Support Vector Regression

Mô hình hồi quy Support Vector Regression (SVR) xuất phát từ mô hình học máy Support Vector Machines, được phát triển dựa trên lý thuyết thống kê. Đây được coi là một trong những kỹ thuật máy học tiên tiến, mạnh mẽ để tính toán các thông số lý sinh từ dữ liệu viễn thám, chẳng hạn như hàm lượng carbon hữu cơ trong đất, độ mặn của đất và sinh khối. Ưu điểm của việc sử dụng SVR là chỉ cần hai tham số để tối ưu hóa và SVR hoạt động tốt với các tập mẫu nhỏ.

Một số phiên bản của SVR được biết đến như Epsilon-SVR, Nu-SVR và Sequential Minimal Optimization-RVR. Tuy nhiên, để ước tính, thành lập bản đồ độ mặn của đất, trong nghiên cứu này, Nu-SVR đã được chọn do hiệu năng tính toán của mô hình. Quá trình xây dựng mô hình SVR hướng tới việc tạo ra hàm hồi quy sau:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i - \lambda_i^*) k(x_i, x) + b$$

trong đó λ_i , λ_i^* biểu thị các số nhân Lagrange và $k(x_i, x)$ là hàm kernel RBF.

2.2.4. Random Forests

Mô hình Random Forests (RF), được đề xuất bởi tác giả Breiman, là một thuật toán quy nạp, ở đó mô hình RF được xây dựng từ các nhánh cây quyết định sub-decision trees. Từ tập dữ liệu mẫu D , các tập con được tạo ra thông qua thuật toán *bootstrap aggregating algorithm*, và sau đó, mỗi tập con được sử dụng để xây dựng nhánh cây quyết định sub-decision tree bằng thuật toán phân loại cây hồi quy CART (Classification And Regression Trees). Cuối cùng, kết quả mô hình RF được tạo ra thông qua tổng hợp tích dồn một tổ hợp được thành lập bằng cách tổng hợp quy nạp tất cả các nhánh cây quyết định sub-decision trees.

Mô hình RF được áp dụng hiệu quả của các ứng dụng viễn thám như lập bản đồ các tính chất của đất, ước tính các đặc tính hóa học của cây và ước tính carbon hữu cơ trong đất. Nhìn chung, RF là một thuật toán nhanh và hoạt động tốt với các tập biên đa dạng. Ngoài ra, RF có khả năng lượng hóa sự đóng góp của các biến đầu vào trong mô

hình, qua đó, xác định được tầm quan trọng tương ứng của các biến đầu vào. Khi xây dựng mô hình RF, hai tham số phải được xác định cho phù hợp với mô hình là số lượng biến đầu vào và số lượng nhánh cây quyết định sub-decision trees trong mô hình.

Kết luận

Ứng dụng dữ liệu viễn thám đa phổ, đa thời gian kết hợp với số liệu thực địa cho phép ta theo dõi được xu thế biến động lớp phủ, theo dõi năng suất cây trồng, xác định các khu vực có phân bố cây chịu mặn, chịu lợ. Sự xuất hiện của các loại cây trồng hay thảm thực vật khác nhau cũng có những phản xạ riêng, đặc thù trên ảnh vệ tinh và các chỉ số tính toán được từ ảnh. Từ đó, tính toán được những ảnh chỉ số gián tiếp, giúp khoanh vùng ảnh hưởng và đánh giá được diễn thế của hiện tượng xâm nhập mặn hay sự mặn hóa của đất trên địa bàn nghiên cứu.

Đối với các nguồn ảnh vệ tinh độ phân giải cao trên thế giới như: SPOT, IKONOS, QuickBird, ... việc sử dụng chiết tách các thông tin phục vụ cho nghiên cứu về xâm nhập mặn sẽ cho kết quả độ chính xác đáng tin cậy. Tuy nhiên việc chủ động nguồn ảnh cũng như độ phủ trùm của những loại ảnh viễn thám này dẫn tới kinh phí cao sẽ là một trong những điều kiện đầu tiên cần phải xem xét để đảm bảo được tính khả thi trong nghiên cứu.

Ứng dụng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian trong nghiên cứu, đánh giá, phân vùng XNM kết hợp với số liệu thực địa để tính diện tích là có cơ sở và khi ứng dụng họ máy cho độ chính xác khá cao nhất là với các vùng trồng lúa chịu ảnh hưởng của XNM.

Với sự giám sát ảnh hưởng của XNM đến các vùng trồng lúa trong nhiều năm, hoàn toàn có thể rút ra được những cảnh báo sớm cho người dân về sự cố thiên tai có thể xảy ra trong tương lai, đồng thời giúp cho các nhà quản lý có những phương thức chỉ đạo phù hợp với tình hình ở các thời điểm khác nhau. Từ đó cho thấy khả năng sử dụng ảnh viễn thám radar, siêu phổ, đa phổ, ảnh viễn thám phân giải cao, trung bình, thấp, đa thời gian, hàng không trong nghiên cứu mùa vụ cây trồng cũng đạt kết quả khả quan.

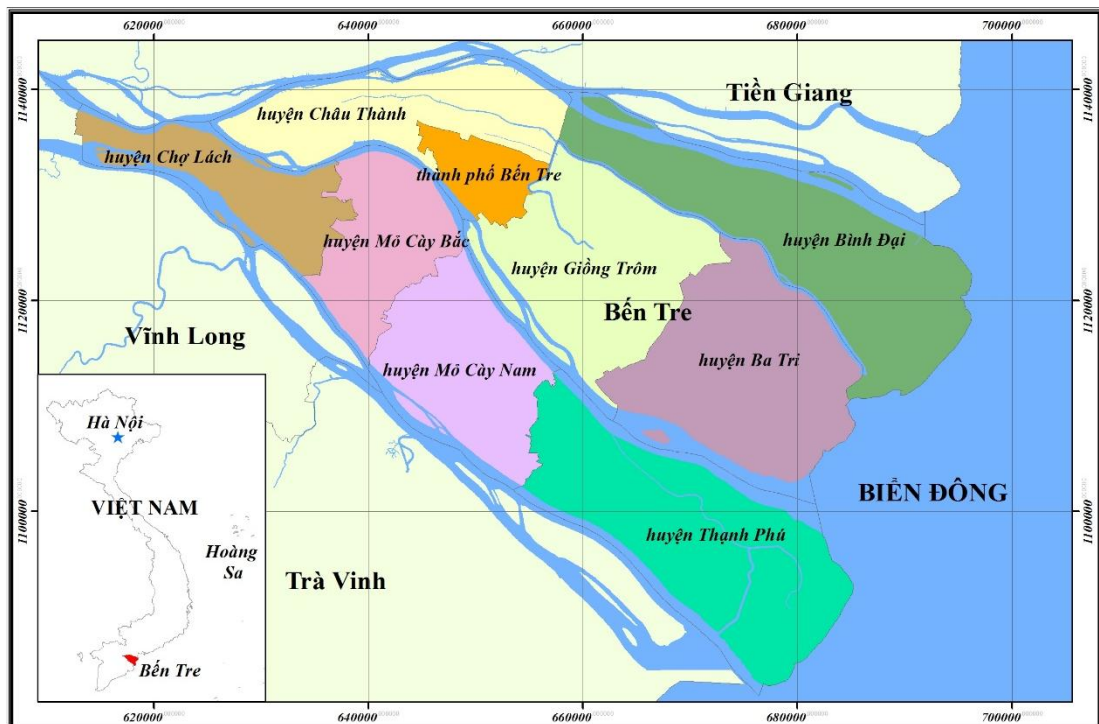
CHƯƠNG 3. ỨNG DỤNG VIỄN THÁM TRONG NGHIÊN CỨU ĐIỂN BIẾN VÀ PHÂN VÙNG ẢNH HƯỞNG NHIỆM MẶN TỈNH BẾN TRE

3.1. Khái quát về khu vực nghiên cứu

3.1.1. Khái quát về tỉnh Bến Tre

3.1.1.1. Vị trí địa lí

Bến Tre thuộc đồng bằng sông Cửu Long, có diện tích gần 2.360 km², được hình thành bởi cù lao An Hoá, cù lao Bảo, cù lao Minh, và do phù sa của 4 nhánh sông Cửu Long bồi tụ thành (gồm sông Tiền dài 83 km, sông Ba Lai 59 km, sông Hàm Luông 71 km, sông Cổ Chiên 82 km). Điểm cực bắc của Bến Tre nằm trên vĩ độ 9°48' Bắc, điểm cực nam nằm trên vĩ độ 10°20' Bắc, điểm cực Đông nằm trên kinh độ 106°48' Đông, điểm cực Tây nằm trên kinh độ 105°57' Đông.[2]



Hình 3-1. Bản đồ tỉnh Bến Tre.

3.1.1.2. Điều kiện tự nhiên

Địa hình

Địa hình của Bến Tre bằng phẳng, rải rác những giồng cát xen kẽ với ruộng, vườn, không có rừng cây lớn, chỉ có những dải rừng ngập mặn ở ven biển và các cửa

sông. Bến Tre như một lưỡi phù sa mới của sông Tiền, mang đặc trưng riêng của ĐBSCL, địa hình tương đối bằng phẳng với cao độ phổ biến từ 1 -2 m, có khuynh hướng thấp dần theo hướng Tây Bắc xuống Đông Nam và từ ven biển vào[78].



Hình 3-2. Bản đồ cao độ tỉnh Bến Tre [78].

Khí hậu

khu vực tỉnh Bến Tre nói riêng nằm trong vùng nhiệt đới gió mùa, với đặc trưng cơ bản là khí hậu ẩm áp, ôn hòa. Nhiệt độ hàng năm cao, thay đổi từ 26,6 - 27,5°C. Nhiệt độ cao thường rơi vào tháng IV, nhiệt độ bình quân tháng biến đổi từ 28,3 - 28,8°C, nhiệt độ cao nhất biến đổi từ 36,1 - 37,7°C. Tháng 1 lạnh nhất, nhiệt độ bình quân từ 25,3 - 25,9°C, nhiệt độ thấp nhất biến đổi từ 17,1 - 19,4°C. Chênh lệch nhiệt độ trung bình các tháng trong năm khoảng 2,8 - 3,3°C. Số giờ nắng cao, từ 2.387 đến 2.743 giờ mỗi năm, trung bình 6 - 7 giờ mỗi ngày. Cao nhất là trong mùa khô, có xấp xỉ 8 giờ nắng mỗi ngày.

Lượng mưa hàng năm từ 1.428 đến 2.444 mm. Tuy nhiên, trên 90% lượng mưa cả năm tập trung vào mùa mưa gây ra tình trạng thừa nước trong mùa mưa (V-XI), thiếu nước ngọt trong mùa khô (XII-IV).

Hàng năm khu vực tỉnh Bến Tre có lượng bốc hơi trên ống Piche trung bình từ 958 - 1.216 mm. Những ngày nắng gắt lượng bốc hơi có thể đạt 4 - 5 mm/ngày. Ở vùng

ven biển và hải đảo thì lượng bốc hơi từ mặt nước thoảng còn lớn hơn nhiều, đạt từ 1.200 - 1.600 mm. Nếu cân bằng trong từng tháng, ta thấy chỉ có các tháng VII - X là lượng mưa hầu hết các nơi vượt cao hơn lượng bốc hơi, theo tiêu chuẩn của FAO thì đây là thời kỳ ẩm ướt nhất trong năm. Các đặc trưng khí hậu được tính toán trên chuỗi số liệu từ năm 1977 - 2020 theo các trạm[79].

Lượng mưa trung bình năm biến đổi từ 1.400 đến 1600mm. Xu thế về không gian, lượng mưa lớn ở phía biển và phía tỉnh Trà Vinh; lượng mưa có giá trị thấp hơn ở phía huyện Châu Thành và Chợ Lách. Biến đổi lượng mưa trong năm, lượng mưa ở các tháng VII đến XI chiếm 80 - 90% lượng mưa năm. Lượng bốc hơi ngày lớn nhất biến đổi từ 6,5 mm đến 9,2 mm. Xu thế chung, các tháng mùa khô lượng bốc hơi lớn hơn các tháng mùa mưa. Tổng lượng bốc hơi trung bình năm biến đổi từ 1000 mm đến 1166,3 mm. Độ ẩm không khí lớn nhất phổ biến xấp xỉ 100%; giá trị nhỏ nhất biến đổi từ 30 đến 60%; giá trị trung bình biến đổi trên 75%.

Về gió chướng: Vào mùa gió Đông Bắc, gió không chế ở bề mặt, hướng gió chính Đông Bắc mà đã chuyển thành hướng Đông hoặc Đông Nam, gần như thẳng góc với bờ biển phía Đông ĐBSCL. Vận tốc gió trung bình là 5 m/s, ngoài khơi phía Đông ĐBSCL vận tốc trung bình đạt tới 10 m/s, lúc mạnh có thể lên tới 15 - 20 m/s.

Bão và áp thấp nhiệt đới: ít xuất hiện, số cơn bão và ATNĐ ảnh hưởng trực tiếp đến ĐBSCL thời kỳ 1956 - 1997 (40 năm) là 7 cơn (tháng VIII: 1 cơn, tháng X: 1 cơn và tháng XI: 5 cơn). So với tổng số cơn bão và ATNĐ ảnh hưởng trực tiếp đến nước ta trong cùng thời kỳ là 243 cơn thì tần suất chỉ là 2,88%. Tuy hiếm nhưng bão và ATNĐ hoạt động vẫn ảnh hưởng đến ĐBSCL gây thiệt hại về người và của cải vật chất; Bão gây ra mưa, gió và làm dâng cao sóng triều vùng ven biển, các kết quả khảo sát về độ cao nước dâng do cơn bão[79].

Tài nguyên nước

Bến Tre có 4 con sông lớn: Mỹ Tho, Ba Lai, Hàm Luông và Cổ Chiên và một mạng lưới sông, rạch, kênh đào chằng chịt nối liền nhau, tạo thành một mạng lưới giao thông và thủy lợi rất thuận tiện. Trung bình dọc theo các sông chính, cứ cách khoảng 1 đến 2 km là có một con rạch hay kênh. Bến Tre có hàng trăm sông, rạch và kênh, trong đó hơn 60 con rộng từ 50-100 m. Nguồn nước ngọt chủ yếu lấy từ sông Tiền, được bổ

sung nhờ điều tiết của Biển Hồ (Campuchia). Mỗi năm, từ tháng VI đến IX, nước chảy ngược vào Biển Hồ và từ tháng XII đến V năm sau, nước từ Biển Hồ lại dôn về sông Tiền, sông Hậu với tổng lượng khoảng 80 tỷ m³.

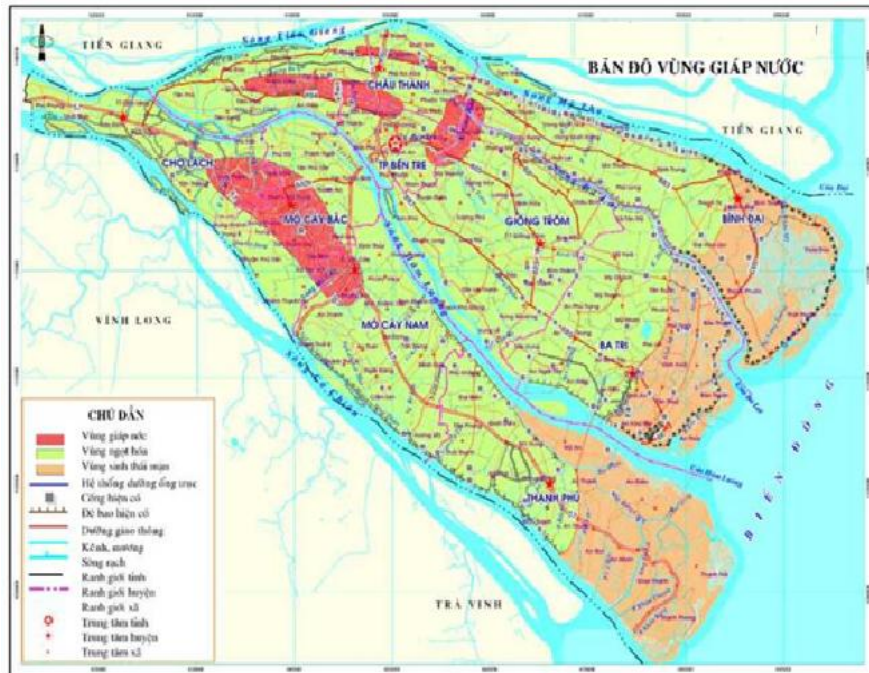
Dòng chảy sông ở Bến Tre chịu ảnh hưởng của nước thượng nguồn và thủy triều biển Đông nên khá phức tạp. Mùa cạn (từ tháng 12 đến tháng 5), khoảng 52% lượng nước từ thượng nguồn được phân bổ qua sông Tiền; nếu không có tác động tiêu cực, Bến Tre đủ nước ngọt. Tuy nhiên, mùa khô, nước sông thường nhiễm mặn nặng (4,5-20‰), gây thiếu nước ngọt. Mùa lũ, nước ngọt sông Tiền chiếm khoảng 52% tổng lượng nước hai sông. Nếu có công trình điều tiết ở thượng nguồn, việc cấp nước vào mùa khô sẽ giúp đẩy mặn xuống hạ lưu xa hơn.

Đặc điểm thủy triều

Nằm kề bên biển Đông các sông hằng ngày đều có dao động theo sự chi phối của thủy triều, có hai lần triều lên (nước lớn) và hai lần triều xuống (nước ròng), thường có dạng “M”, biên độ triều lớn 3 - 4m vào thời kỳ triều cường và từ 1,8 - 2,0 m vào thời kỳ triều kém.

Biên độ triều trên sông giảm dần do sóng triều bị nâng lên. Trên sông Hàm Luông, mùa khô, sóng triều giảm 8% sau 45 km và đến 25% khi đi thêm 25 km. Mùa lũ, nước nguồn làm sóng triều giảm thêm 10-20 cm tại Mỹ Hoà và 20-40 cm tại Chợ Lách.

Tốc độ truyền trung bình của sóng triều khoảng 30 km/h trên các sông lớn. Ở các sông nhỏ hoặc kênh rạch, truyền triều phức tạp hơn do hiện tượng sóng triều giao thoa từ hai phía, tạo nên vùng giáp nước.



Hình 3-3. Bản đồ vùng giáp nước tỉnh Bến Tre[79].

Tài nguyên đất

Đất đai ở Bến Tre khá đồng nhất, có độ phì tiềm tàng khá, nhưng khả năng cung cấp dinh dưỡng cho cây trồng kém (do độc tố kim hãm giải phóng dinh dưỡng chậm). Ở tầng mặt, đất có phản ứng từ ít chua đến trung tính, ngoại trừ nhóm đất phèn nặng. Lượng lân từ nghèo đến rất nghèo trong khi lượng đạm tổng số nhìn chung từ mức trung bình đến khá ở tầng đất mặt. Hầu hết các loại đất đều có độ phì từ mức thấp đến rất thấp. Tương quan giữa lượng đạm và lân trong đất tương đối tốt, nhưng do tương quan giữa lượng lân tổng số và dễ tiêu rất xấu nên năng suất cây trồng bị ảnh hưởng. Theo kết quả điều tra từ chương trình “Điều tra, bổ sung chỉnh lý xây dựng bản đồ đất các tỉnh Đồng Bằng Sông Cửu Long” tỷ lệ 1/50.000 do Phân viện Quy hoạch và Thiết kế nông nghiệp miền Nam thực hiện năm 2004, đất đai tỉnh Bến Tre phân thành 5 nhóm đất.

Nhóm đất cát

Diện tích khoảng 14.678 ha (6,32% toàn tỉnh), phân bố tại các huyện Mỏ Cày, Ba Tri, Thạnh Phú, Bình Đại và một phần Giồng Trôm. Đất cát giồng có đặc điểm cao, thành

phần cát biển phân hóa chiếm 80-90%, cấu trúc rời rạc, giữ nước và phân kém, chỉ phù hợp làm thổ cư, trồng cây ăn trái có múi và rau màu.

Nhóm đất mặn

Khoảng 56.053,69 ha, chiếm 24,14% diện tích tỉnh, tập trung ở 3 huyện ven biển là Bình Đại, Ba Tri, Thạnh Phú, chủ yếu dùng để trồng lúa một vụ, trồng rừng và nuôi thủy sản. Đây là loại đất nhiễm mặn trên toàn phần diện, tuy ít chua nhưng thường xuyên bị mặn nên tính chất đã thay đổi so với đất phù sa. Đất nặng, thoát nước kém, phân giải hữu cơ chậm; sau khi rửa mặn có thể trồng nhiều loại cây nông nghiệp. Vùng đất ven biển thích hợp với rừng ngập mặn và nuôi thủy sản.

Nhóm đất phèn

Đất phèn chiếm 9.522,35 ha (4,10% diện tích tỉnh), phân bố rải rác ở các huyện với địa hình thấp, khó tiêu và nhiễm mặn. Các khu vực có đất phèn gồm Châu Thành, Bình Đại, Mỏ Cày Bắc, Mỏ Cày Nam, Giồng Trôm, Ba Tri, Thạnh Phú. Đất phèn được chia thành ba loại: tiềm tàng, hoạt động và nhiễm mặn. Đặc điểm: rất chua (pH 2,9 - 4,5), giàu hữu cơ nhưng khó phân giải nên cây trồng khó sử dụng.

Nhóm đất Phù sa

Diện tích 24.306,70 ha chiếm 10,48% tổng diện tích, phân bố chủ yếu tại các huyện Chợ Lách, Châu Thành, TP. Bến Tre, Mỏ Cày Bắc và một phần phía Bắc huyện Bình Đại, Giồng Trôm, Ba Tri với nguồn nước ngọt. Nhóm đất này phù hợp cho nông nghiệp, có thành phần cơ giới từ thịt nhẹ đến thịt nặng. Đất được bồi tụ phù sa hàng năm nên có độ màu mỡ và khả năng thoáng khí tốt. Tuy nhiên, đất chứa nhiều sắt và các tầng xác bã hữu cơ dưới bề mặt; nếu khai thác và sử dụng không hợp lý có thể phát sinh hiện tượng kết von, cây trồng bị ngộ độc sắt và tăng nguy cơ phát triển đất phèn.

Nhóm đất Nhân tác

Toàn tỉnh có khoảng 91.000 ha đất nhân tác, chiếm 39,16% diện tích tự nhiên. Chủ yếu là đất đã lên líp lâu năm, tính chất lý - hóa thay đổi nhiều so với đất nguyên thủy. Trong đó, gần 58.600 ha là đất phù sa lập líp, gần 30.000 ha là đất phèn và 2.330 ha là đất mặn lập líp [80].

Theo báo cáo của Sở Khoa học và Công nghệ tỉnh Bến Tre, mặn xâm nhập chủ yếu vào mùa khô (từ tháng 12 đến tháng 5 năm sau), đây là giai đoạn nước kiệt của dòng chảy sông Cửu Long, do thủy triều kết hợp với gió chướng đẩy nước mặn di chuyển sâu nhất vào nội địa. Nước có độ mặn lớn nhất thường ở các cửa sông (cửa Đại, Hàm Luông, Cổ Chiên) và giảm dần khi di chuyển sâu vào trong nội địa, đặc biệt vào hai tháng 3 và 4. Điều này gây ra những hạn chế lớn đối với sinh trưởng và phát triển của cây trồng trong mùa khô, đặc biệt đối với cây lúa trong vụ Đông Xuân, nhưng là điều kiện thuận lợi cho nuôi thủy sản nước lợ. Đất đai bị mặn hóa theo thời kỳ, để sau đó ngọt hóa nhờ mưa, trở thành vùng có thể canh tác được các loại cây trồng. Chu kỳ này đã quyết định đến tính chất hóa lý của đất đai tỉnh Bến Tre, dẫn đến phân hóa các loại đất từ nội địa ra đến ven biển [80]. Bản đồ thổ nhưỡng của tỉnh được thành lập từ năm 2003, tỷ lệ 1:50.000 theo hệ thống phân loại đất của Hội Khoa học Đất Việt Nam năm 1996. NCS đã khái quát hóa bản đồ thổ nhưỡng này theo các nhóm đất mặn nặng, mặn vừa, mặn nhẹ và không mặn.

Nguồn gốc địa mạo cũng là một yếu tố quyết định đặc điểm phân bố đất mặn ở Bến Tre. Xét về nguồn gốc địa mạo, Bến Tre có những đơn vị địa mạo sau:

- + Nguồn gốc sông là các dạng: Doi cát, cù lao sông và bãi bồi cao.
- + Nguồn gốc sông biển: Bề mặt tích tụ sông – biển
- + Nguồn gốc biển: Bãi triều và giồng cát trẻ và cổ
- + Nguồn gốc sông đầm lầy: Bề mặt sông – đầm lầy ven rìa châu thổ.
- + Nguồn gốc biển – đầm lầy: Dải tích tụ biển – đầm lầy ven biển.
- + Nguồn gốc đầm lầy: Đầm lầy khép kín

Diện tích đất mặn là 56.054 ha, chiếm 24,14% tổng diện tích đất tự nhiên, bao gồm các loại đất mặn sú vẹt (rừng ngập mặn), đất mặn nhiều gley, đất mặn nhiều trên nền cát và đất mặn trung bình, ít. Các loại đất mặn, phân bố tập trung ở vùng phía Đông Nam, thuộc 3 huyện Bình Đại, Ba Tri, Thạnh Phú. Ngoài ra, đến 40% diện tích đất tự nhiên được lên líp để trồng cây lâu năm và đây là đất không bị nhiễm mặn. Bên cạnh đó, phần diện tích đất phù sa tập trung nhiều nhất ở huyện Ba Tri và một phần ở huyện Giồng Trôm, chủ yếu là đất trồng lúa 3 vụ. Phần diện tích đất mặn ít và đất phèn ở huyện Thạnh Phú là đất trồng lúa hai vụ và 1 vụ. Đất cát giồng của tỉnh Bến Tre nằm xen kẽ

Năm 2016, toàn tỉnh có 356 trường học phổ thông các cấp, từ cấp I đến cấp III, bao gồm trường 33 trường trung học phổ thông, 133 trường trung học cơ sở và 190 trường tiểu học, Trong đó: tổng số học sinh đến trường là 199.717 em với 11.216 cán bộ giáo viên. Ngoài ra, tỉnh hiện có 03 trường trung cấp chuyên nghiệp với 70 giáo viên và 3.171 học sinh; 02 trường cao đẳng với 270 giáo viên và 1.686 sinh viên. Số trường trung cấp chuyên nghiệp và cao đẳng vẫn giữ nguyên từ năm 2010 - 2016, chưa có sự chú trọng trong công tác đào tạo sau phổ thông.

Bến Tre có nhiều lợi thế về nguồn lợi thủy sản, còn là vùng đất phù sa trù phú, với nhiều loại nông sản mang lại hiệu quả kinh tế cao. Vùng Cái Mon - Chợ Lách là những vường hoa kiểng, trái cây nổi tiếng hàng năm cung ứng cho thị trường nhiều loại trái cây và hàng triệu giống cây trồng, cây cảnh nổi tiếng Cây dừa với diện tích trồng khoảng 51.560ha là vùng trồng lớn nhất nước, đã góp phần to lớn vào sự phát triển kinh tế của tỉnh.

3.1.2. Các yếu tố ảnh hưởng đến xu thế nhiễm mặn tại tỉnh Bến Tre

3.1.2.1. Yếu tố tự nhiên

* *Địa hình*: tỉnh Bến Tre có dạng hình quạt nan, nhìn chung tương đối bằng phẳng, có xu thế thấp dần từ hướng Tây Bắc xuống hướng Đông Nam và nghiêng ra biển. Có 3 dạng địa hình cơ bản:

+ Địa hình thấp dưới 1m thường bị ngập khi triều lên, gồm ruộng trong lòng chảo xa sông, bãi triều ven sông, bồi ven biển, rừng ngập mặn, chiếm 6,7% diện tích toàn tỉnh.

+ Vùng địa hình trung bình (cao 1 - 2 m) chiếm 87,5% diện tích tỉnh, là vùng đất ngập ít hoặc trung bình, đôi khi bị ảnh hưởng bởi triều cường từ tháng 9 đến 12 ở ven sông.

+ Vùng có địa hình cao có cao độ từ 2 – 3,5 m, có nơi cao trên 5 m, chiếm 5,8% diện tích toàn tỉnh.

Dưới ảnh hưởng hoạt động tương tác giữa sông và biển nên chất lượng nước biển đổi rất mạnh theo thời gian và không gian hình thành nên các thủy vực nước mặn, lợ và ngọt với ranh giới phân vùng luôn thay đổi theo mùa và theo chế độ thủy văn.

Do địa hình thấp, nhiều sông và kênh rạch lớn nên mùa khô thường bị nhiễm mặn nghiêm trọng, những năm gần đây do ảnh hưởng của biến đổi của khí hậu toàn cầu và hoạt động kiểm soát lũ ở thượng nguồn đã làm thay đổi lưu lượng nước về hạ nguồn (xu hướng giảm) nên ranh giới mặn có xu hướng xâm nhập sâu hơn vào đất liền. Ranh giới mặn 4‰ vào cuối mùa khô xâm nhập vào sâu trong đất liền vào khoảng 50km (vượt qua khỏi thị xã Bến Tre), chiếm khoảng 80% so với tổng diện tích tự nhiên của tỉnh, thời gian xâm nhập mặn kéo dài từ 40 – 100 ngày trong năm.

**Nhân tố khí hậu:* Nhiệt độ, số giờ nắng cao, mưa ít và gió chướng khiến nước mặn dễ xâm nhập sâu vào đất liền.

Nhìn chung, tác động của điều kiện khí hậu đối với sự mặn hóa đất trên địa bàn tỉnh Bến Tre là tình trạng bốc thoát hơi nước cao, nhất là đối với đất cát giồng, đây là loại đất có hệ số thấm lớn và phân bố ở địa hình cao hứng gió nên bốc thoát hơi nước khá nhanh. Đối với đất phèn và đất mặn, sự khô hạn trong mùa khô đã làm đất mất cân bằng nước, thúc đẩy quá trình oxy hóa tầng phèn và mao dẫn muối từ tầng sâu lên tầng mặt. Mặt khác, gió chướng cũng là một trong những nguyên nhân gây ra nước biển dâng cao và đẩy mạnh triều biển vào sâu trong nội đồng.

** Nhân tố thủy văn:* Bến Tre có mạng lưới sông, kênh, rạch dày đặc với 45 kênh rạch chính (383 km) và 4 nhánh sông lớn thuộc hệ thống sông Cửu Long: sông Tiền Giang, Ba Lai, Hàm Luông, Cổ Chiên. Lưu lượng các sông thay đổi rõ rệt giữa mùa mưa và mùa khô.

Do đặc điểm địa lý và lịch sử hình thành, tỉnh Bến Tre có một mạng lưới sông rạch lớn và chằng chịt, hệ thống sông rạch này đóng vai trò địa giới hành chính và tự nhiên của Tỉnh là hệ thống cấp nước ngọt cho vùng phía Bắc của Tỉnh, đồng thời cũng là đường dẫn mặn xâm nhập từ biển vào địa bàn tỉnh Bến Tre.

Ngoài bốn sông chính là: sông Mỹ Tho, Ba Lai, Hàm Luông và Cổ Chiên. Mật độ cao của hệ thống sông rạch là yếu tố bất lợi trong việc kiểm soát xâm nhập mặn nếu không hiểu hết qui luật của dòng chảy và không quản trị nước mặn theo các hệ thống lưu vực tự nhiên.

**Chế độ triều:* Bến Tre chịu ảnh hưởng bán nhật triều không đều của Biển Đông, mỗi ngày có hai lần nước lên và xuống. Mỗi tháng có hai kỳ triều cường (mùng 3, 17 âm

lich) và hai kỳ triều kém (mùng 10, 25). Đỉnh triều cao nhất thường rơi vào tháng 10-11, thấp nhất vào tháng 6-7, với biên độ triều trong năm từ 201-241 cm.

Độ mặn trong sông phụ thuộc chặt chẽ vào thủy triều và thường biến động giống chu kỳ triều, nhưng xuất hiện trễ 1-2 giờ. Càng xa biển, sự chênh lệch này càng tăng.

Ngoài ra, độ mặn còn thay đổi theo mùa và lượng nước ngọt từ thượng nguồn. Mùa lũ, nước ngọt nhiều làm giảm độ mặn; vùng gần biển luôn có độ mặn trên 2%. Độ mặn cao nhất vào tháng 4, khi nước ngọt ít nhất.

* *Hướng sóng*: tỉnh có một số hướng sóng nguy hiểm: hướng Đông Bắc, Đông, Đông Nam. Theo vận tốc gió khác nhau cho độ cao sóng ở Bến Tre không lớn lắm (từ 0,3 - 1,5) và giảm từ ngoài khơi vào bờ với chu kỳ sóng từ 3 - 6 giây. Hệ thống sông rạch với dòng chảy nhỏ, lưu lượng thấp, địa hình bằng phẳng kết hợp với hướng sóng đánh vuông góc với bờ biển nên thủy triều dễ dàng xâm nhập vào sâu trong đất liền.

* *Lưu lượng dòng chảy thượng nguồn*: Từ tháng 1 đến 4 (mùa khô), nước mưa rất ít, nguồn nước ngọt chủ yếu là sông Tiền từ thượng nguồn sông Mê Công, với lưu lượng thấp nhất vào tháng 4. Nhu cầu nước nông nghiệp cao, lòng sông dốc nhỏ và địa hình bằng phẳng khiến nước mặn dễ xâm nhập sâu vào đất liền.

* *Tác động tương hỗ giữa dòng chảy sông và động lực biển*: đây là yếu tố ảnh hưởng đến các khu vực ven biển. Khi mực nước sông giảm, dòng chảy ra biển suy yếu, nước mặn có thể xâm nhập sâu hơn vào bên trong các hệ thống sông và kênh rạch, đặc biệt khi kết hợp với triều cường. Kết quả là hình thành vùng nước nhiễm mặn với độ mặn khác nhau.

Với đặc trưng dòng chảy là từ nội địa ra biển (hướng Tây Bắc- Đông Nam), các sông Mỹ Tho- Ba Lai- Cỏ Chiên- Hàm Luông chảy dọc suốt chiều dài của tỉnh Bến Tre ra đến biển Đông và trở thành đường dẫn nước mặn chính xâm nhập vào nội địa vào mùa kiệt (tháng 4-5). Bên cạnh đó, mạng lưới sông rạch nhỏ (như sông Bến Tre, Rạch Vàm Thơm, Rạch Mỏ Cà, Rạch Băng Cung...) cũng đóng vai trò quan trọng trong việc dẫn mặn xâm nhập sâu vào đất liền và làm mặn hóa các lớp thủy cấp vào mùa khô với mức độ xâm nhập mặn không đều ở các sông trong vùng.

3.1.2.2. *Yếu tố nhân tác*

* *Do sử dụng đất*: diện tích đất nuôi trồng thủy sản tại Bến Tre tăng nhanh trong vòng 20 năm trở lại đây. Nguyên nhân của sự gia tăng này, chủ yếu do việc mở rộng đất nuôi tôm biển vùng ven biển Ba Tri, Bình Đại, Thạnh Phú dẫn đến một diện tích lớn rừng ngập mặn bị phá hủy. Rừng ngập mặn mất đi làm cho thủy triều, sóng biển dễ xâm nhập vào đất liền gây ra xâm nhập mặn. Bên cạnh đó, để phục vụ cho nuôi tôm, người dân đã dẫn nước mặn từ biển vào các vuông tôm làm cho độ mặn trong đất và nước ở đây tăng cao.

Trong quá trình sử dụng đất, hệ thống cây chắn gió và thảm thực vật rừng ngập mặn đã bị triệt phá và thoái hóa dần, dưới ảnh hưởng của chế độ khí hậu nhiệt đới - ẩm, kết hợp với những đặc trưng khí hậu ven biển, tình trạng mặn hóa và khô hạn diễn ra nhanh chóng ở các lớp đất mặt vùng ven biển của Tỉnh Bến Tre. Ở một số khu vực ven biển Bình Đại, Ba Tri lớp muối xốp xuất hiện trên bề mặt đất thường xuyên vào mùa khô, phá hủy dần cấu trúc của đất mà chủ yếu là các lớp sét, sau đó với mùa mưa tập trung, nước mưa không những rửa đi các hợp chất muối trong đất, mà còn cuốn trôi cả chất dinh dưỡng của đất do keo đất không còn giữ lại được đất bị thoái hóa dần theo thời gian với tình trạng mất lớp phủ thực vật.

* *Khai thác nước ngầm*: Do nguồn nước mặt ở Bến Tre thường bị nhiễm phèn, mặn nên địa phương phải khai thác nước ngầm. Tuy nhiên, nhu cầu tăng cao khiến việc khai thác quá mức, dẫn đến cạn kiệt nước ngầm và nguy cơ nhiễm mặn do nước biển xâm nhập.

* *Do hệ thống thủy lợi*: Các công trình thủy lợi đang được xây dựng để phục vụ nuôi trồng, nhưng đa số vùng chưa có hệ thống cấp thoát nước rõ ràng. Việc vận hành còn thiếu kiểm soát, dẫn đến nguy cơ nước mặn xâm nhập sâu vào đất nông nghiệp hoặc vườn cây ăn trái.

3.1.3. *Thực trạng nhiễm mặn ở tỉnh Bến Tre*

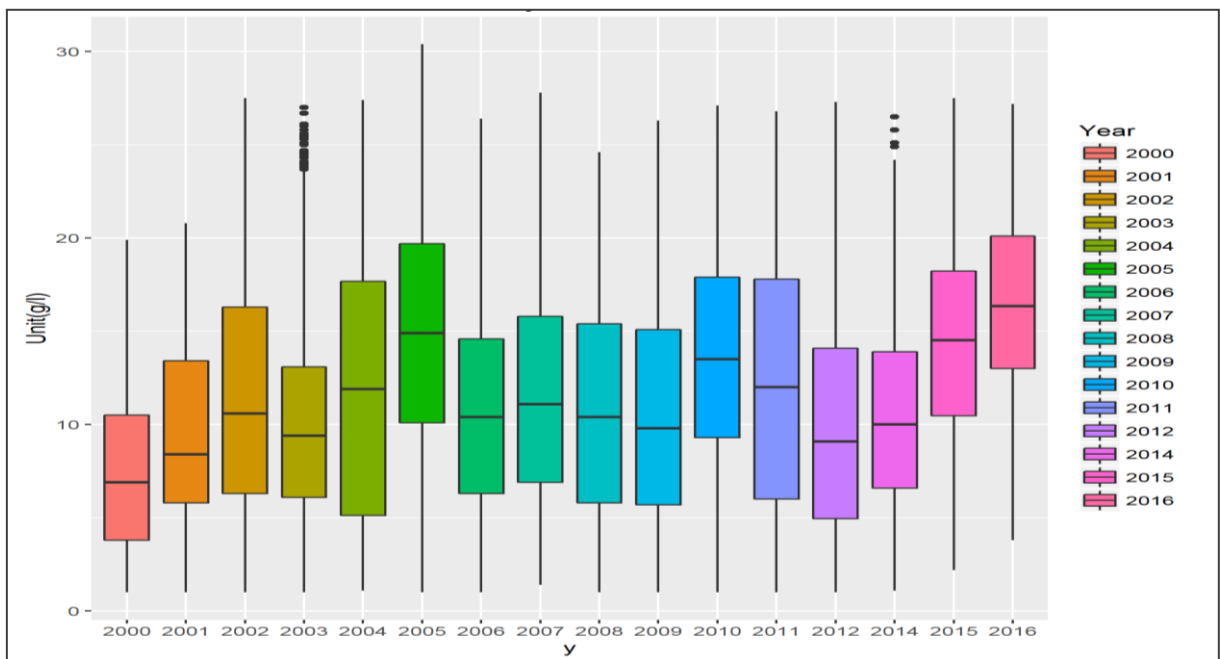
Bến Tre là một trong những tỉnh có nhiều sông lớn trong hệ thống sông Cửu Long chảy qua. Điều này cho thấy mặt thuận lợi về dòng chảy từ thượng nguồn chảy về và cung cấp cho khu vực tỉnh Bến Tre. Bên cạnh mặt thuận lợi đó, các sông lớn cũng là những nguồn nhiễm mặn vào khu vực tỉnh Bến Tre. Như các sông Cửa Tiểu, Cửa Đại;

Hàm Luông; và Cổ Chiên. Trong phạm vi nghiên cứu này đánh giá diễn biến mặn khu vực phía Bắc Bến Tre.

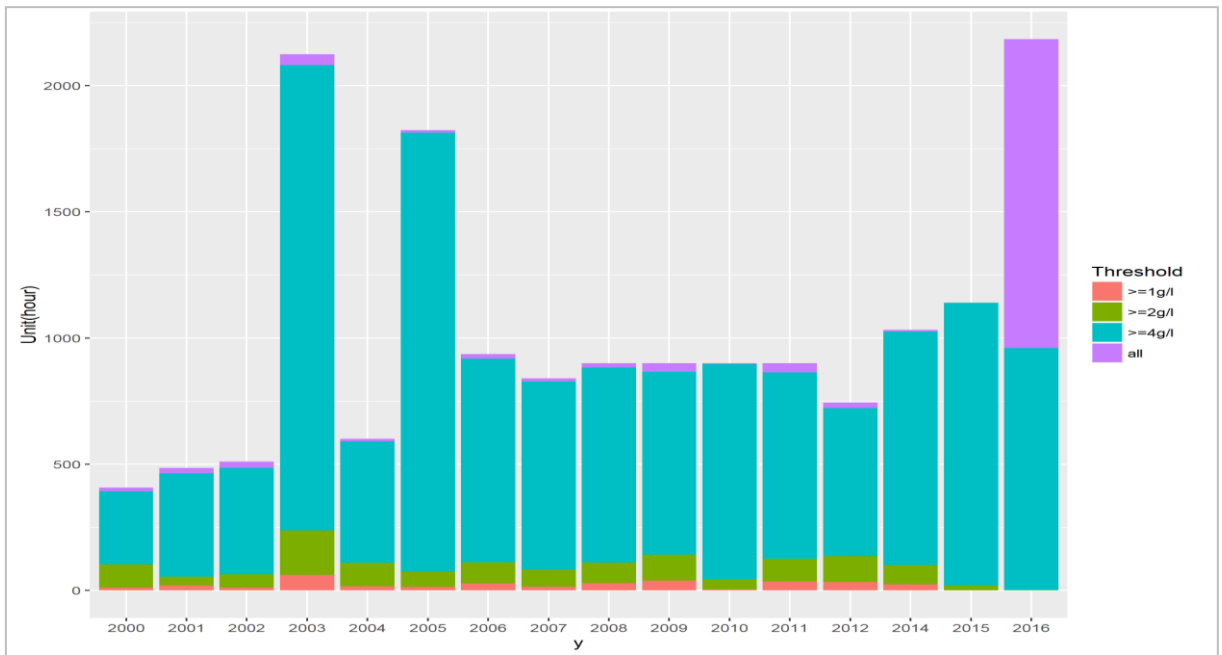
Hướng phân tích sẽ sử dụng một số trạm cửa sông; và một số trạm trên dòng chính phía trong khu vực tỉnh Bến Tre mà có đầy đủ số liệu để đánh giá xem diễn biến mặn trong những năm vừa qua tại khu vực Bến Tre. Đặc trưng đánh giá số liệu mặn giờ hoặc mặn lớn nhất ngày; số thời điểm mặn lớn hơn các ngưỡng 1g/l; 2g/l; và 4g/l[24].

Trên sông Tiền (gồm sông Cửa Tiểu và Cửa Đại):

- Tại trạm Bình Đại: Hình 3-5 **Error! Reference source not found.** cho thấy từ năm 2000 trở lại đây diễn biến mặn tại trạm Bình Đại xuất hiện một số năm mặn có giá trị cao như 2016; 2010; 2015; năm 2005 với giá trị mặn phổ biến trên 10 g/l. Về thời gian mặn duy trì trên ngưỡng, có thể thấy năm 2015, 2016 tại Bình Đại giá trị mặn duy trì trên ngưỡng 4 g/l là phổ biến (Hình 3-6).

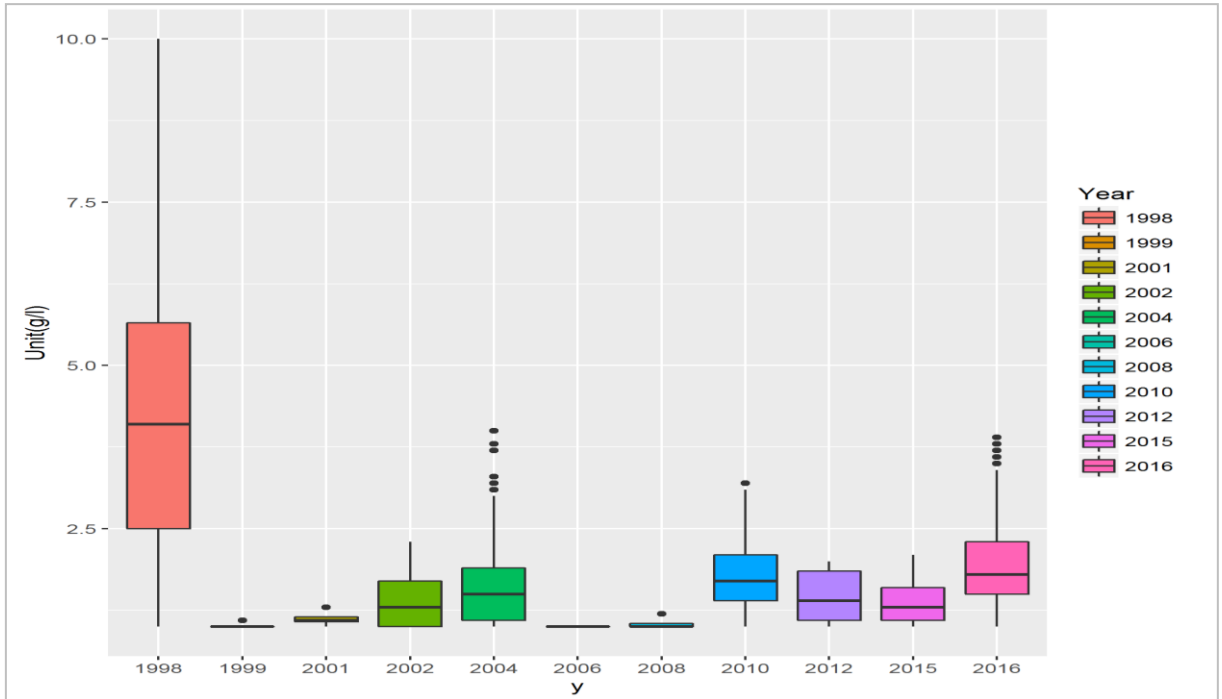


Hình 3-5. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Bình Đại

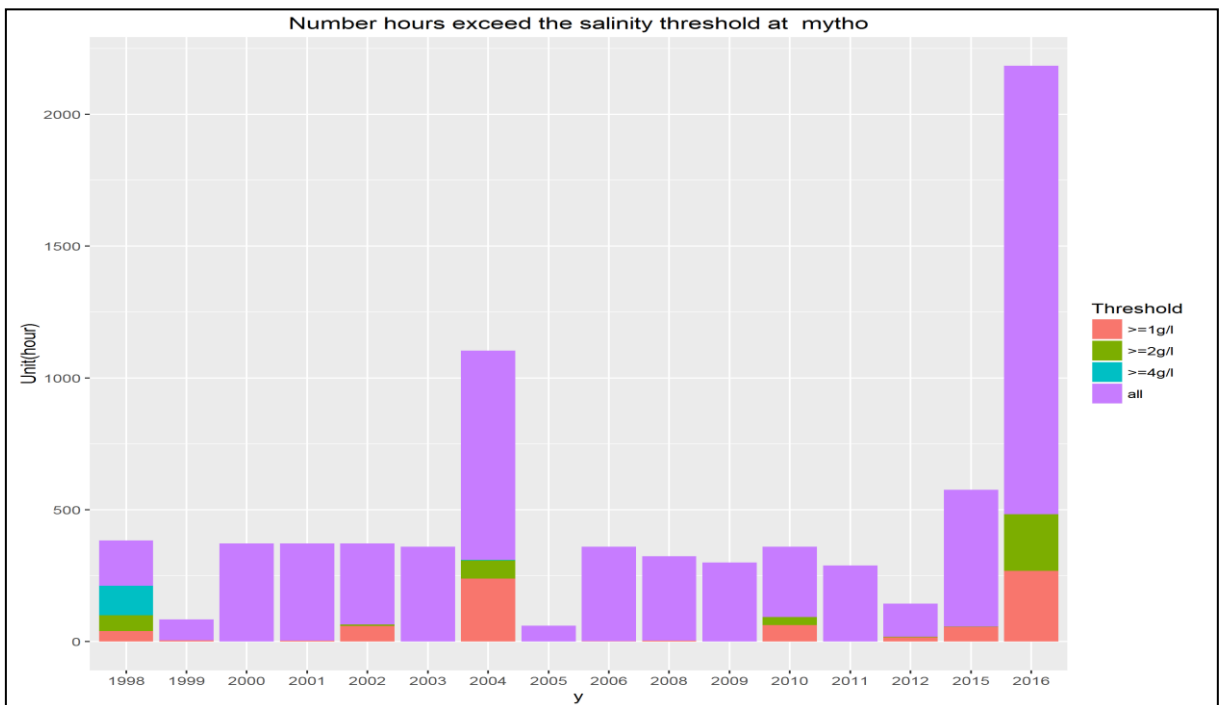


Hình 3-6. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm Bình Đại theo các năm

Tại trạm Mỹ Tho cách cửa sông khoảng 60 km. Đánh giá trong chuỗi số liệu từ 1998-2016 cho thấy một số năm mặn lớn tại Mỹ Tho như 1998; 2016; 2004; 2010 (Hình 3-7). Trong đó năm mặn lớn nhất là năm 1998 với giá trị lớn nhất xấp xỉ 10 g/l, và phổ biến lớn hơn 2,5 g/l trong thời kỳ đo. Thời gian duy trì mặn trên ngưỡng 4 g/l xuất hiện duy nhất năm 1998 và 2004 tại Mỹ Tho, đối với 2 g/l xuất hiện ở các năm 2016; 2004; 2010 (Hình 3-8).



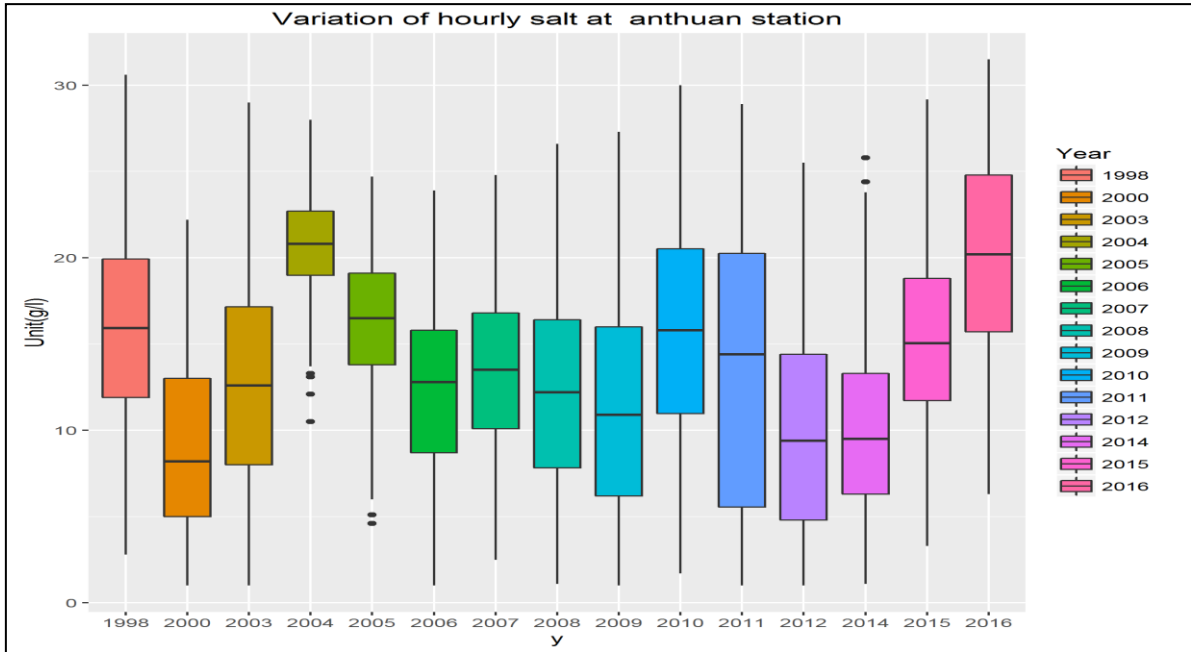
Hình 3-7. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Mỹ Tho.



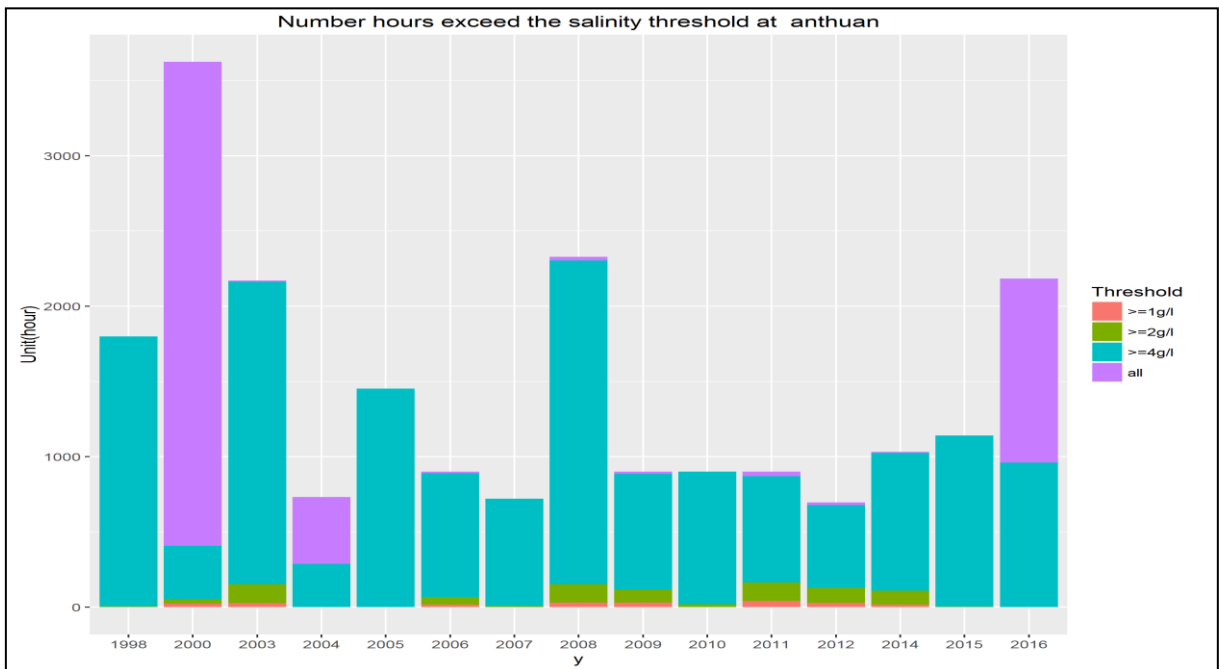
Hình 3-8. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm Mỹ Tho theo các năm

Trên sông Hàm Luông

- Trạm An Thuận: Một số năm mặn có giá trị lớn trong chuỗi 1998 – 2016 gồm 2016; 2004; 2005; 1998 và 2010 (Hình 3-9). Trong đó năm 2016 có giá trị cực trị mặn lớn nhất trong chuỗi nhiều năm. Một số năm chỉ xuất hiện mặn duy trì trên 4 g/l như 2005; 2015 và 2007 (Hình 3-10).

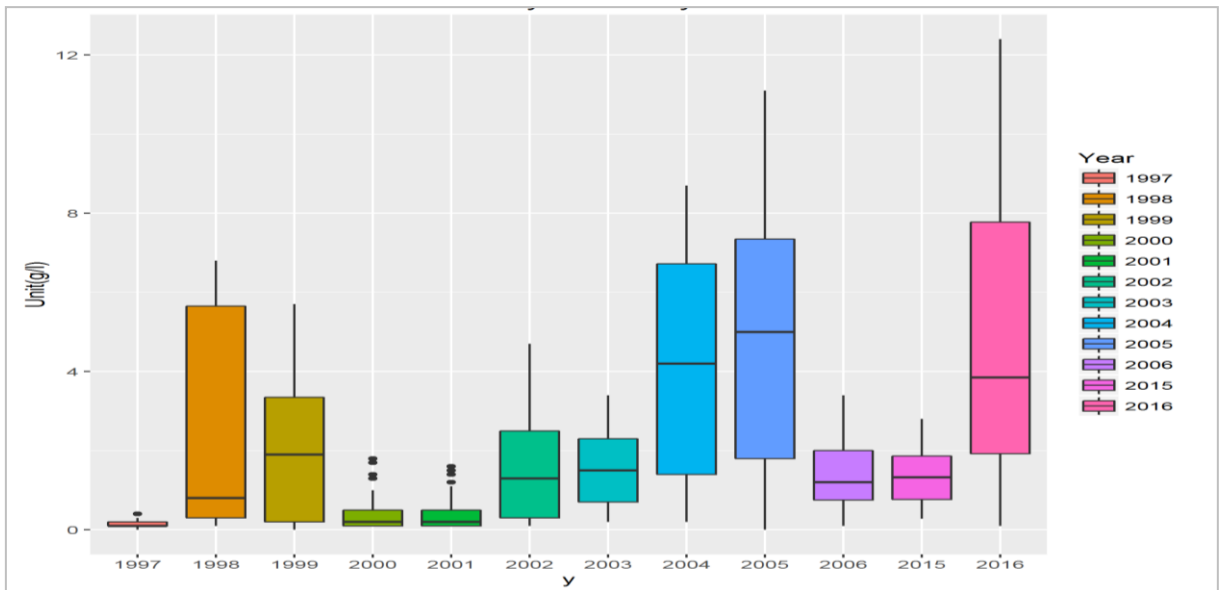


Hình 3-9. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm An Thuận

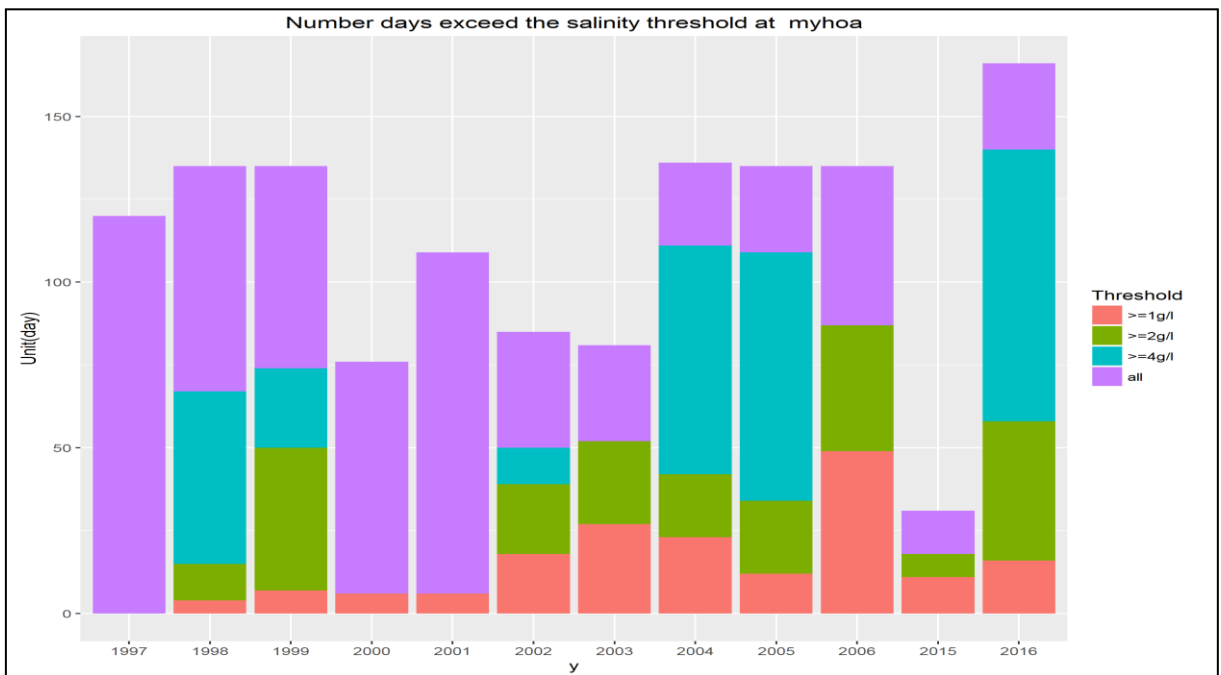


Hình 3-10. Số giờ mặn so sánh với ngưỡng (Threshold) tại trạm An Thuận theo các năm

Trạm Mỹ Hóa cách cửa sông khoảng 55 km. Một số năm tại Mỹ Hóa có giá trị lớn như 2016; 2004-2005 và 1998 (Hình 2-11). Trong đó năm 2016 là năm tại Mỹ Hóa mặn đạt cực trị với giá trị lớn nhất lớn hơn 12 g/l. Một số năm có giá trị mặn duy trì lớn hơn 4 g/l dài như 2016; 2004-2005 (Hình 2-12).



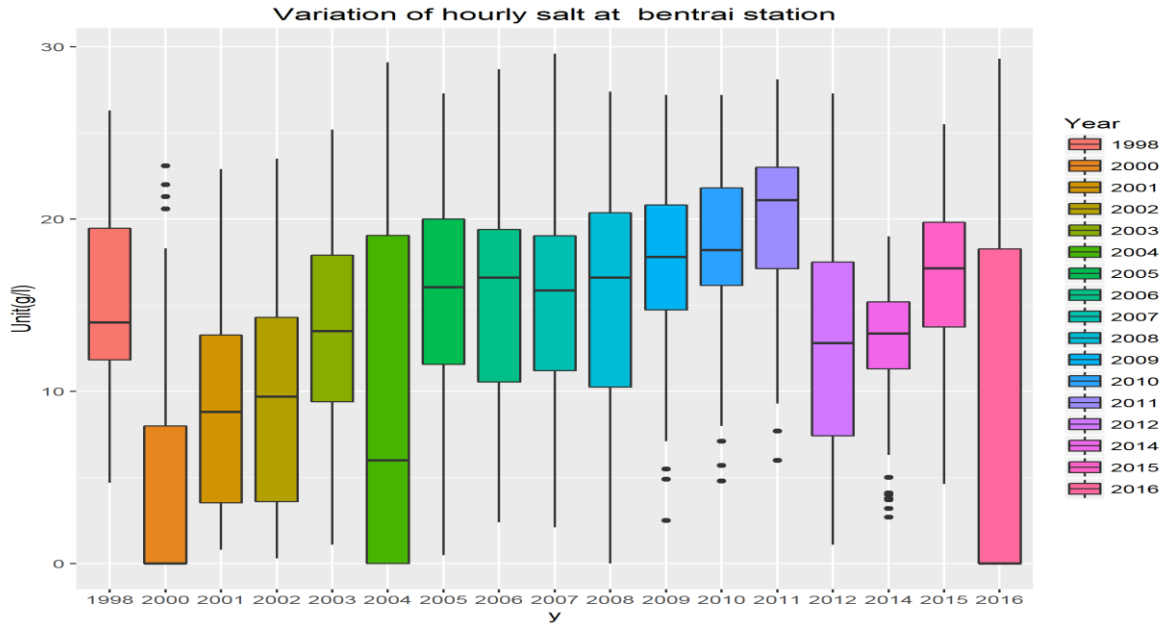
Hình 3-11. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Mỹ Hóa



Hình 3-12. Số ngày mặn lớn nhất vượt ngưỡng theo các năm tại trạm Mỹ Hóa

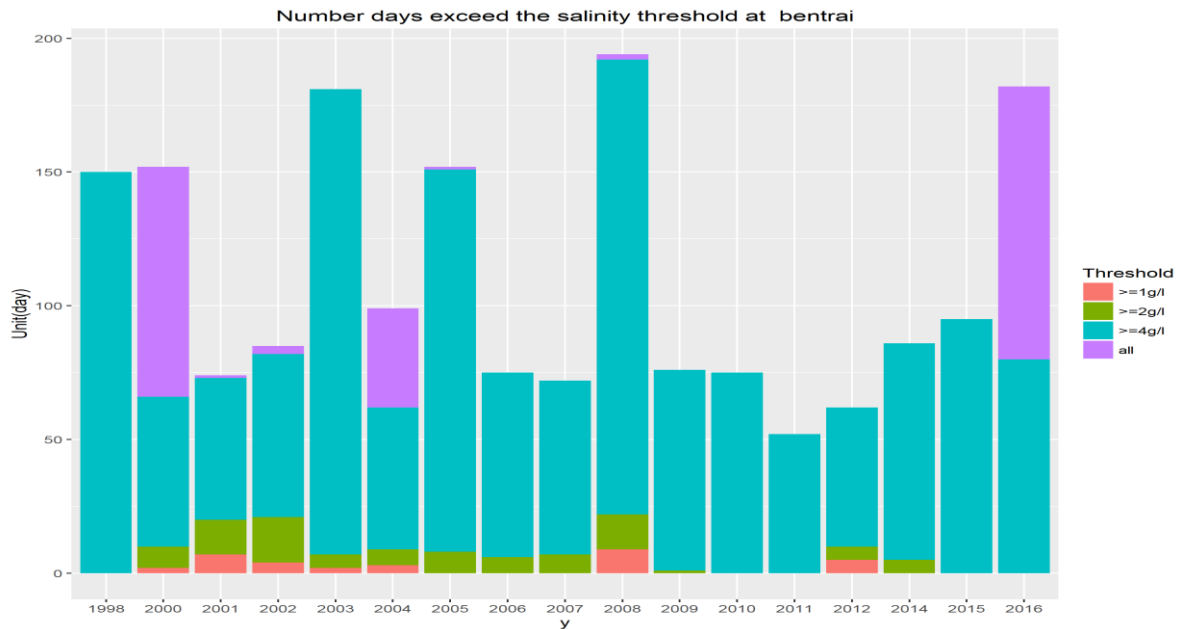
Thống kê giá trị mặn lớn nhất theo các năm và các trạm khu vực tỉnh Bến Tre cho thấy trên sông Hàm Luông tại trạm Mỹ Hóa năm 2016 mặn lớn nhất đo được là 12,4 g/l và năm 2005 là 11,1 g/l. Trên sông Tiền tại trạm An Định mặn lớn nhất năm 1998 là 12,7g/l. Trên sông Cổ Chiên tại trạm Hương Mỹ mặn lớn nhất đo được năm 2015 và 2016 lần lượt là 18,88 g/l và 16,6 g/l.

Trên sông Cổ Chiên



Hình 3-13. Diễn biến các đặc trưng độ mặn giờ theo các năm tại trạm Bến Trại

Trạm Bến Trại: Một số năm mặn có giá trị lớn trong chuỗi 1998 – 2016 gồm 2016; 2004; 2011; 1998 và 2010. Trong đó năm 2016 có giá trị cực trị mặn lớn nhất trong chuỗi nhiều năm, số lượng giá trị lớn hơn 4g/l xuất hiện phổ biến.



Hình 3-14. Số giờ mặn lớn nhất vượt ngưỡng theo các năm tại trạm Bến Trại

Bảng 3-1. Giá trị mặn lớn nhất theo các năm các trạm khu vực tỉnh Bến Tre (g/l)

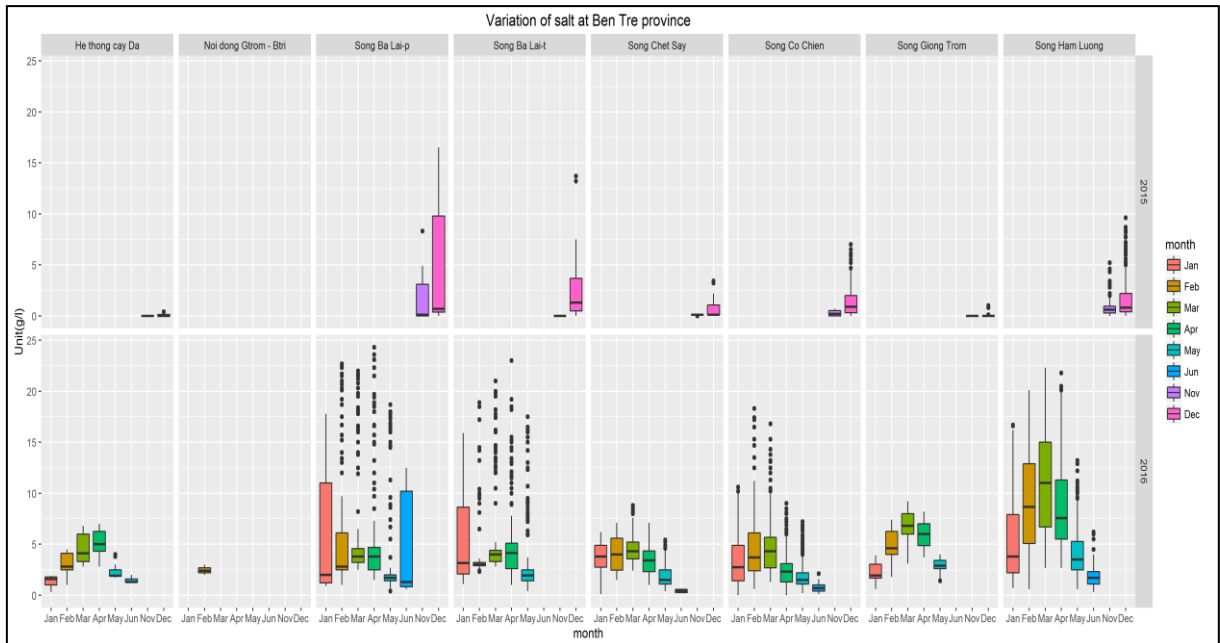
Năm	S. Hàm Luông			S. Cỏ Chiên		S. Tiền				
	An Thuận	Sơn Đốc	Mỹ Hóa	Bến Trại	Hương Mỹ	Bình Đại	Lộc Thuận	Giao Hòa	Mỹ Tho	An Định
1997	-	4,2	-	-	2,3	-	10,8	-	-	2,4
1998	30,612	6	6,8	26,3	7	-	13,8	-	10	12,7
1999	-	7,2	5,7	-	10,8	-	10,7	-	1,1	3,3
2000	22,2	4,1	1,8	23,1	9	19,9	10,7	-	0,8	2,2
2001	-	10	1,6	22,9	10,3	20,8	13,1	-	1,3	2,8
2002	-	9	4,7	23,5	9,2	27,5	16,4	5,6	2,3	1,8
2003	29	10,3	3,4	25,2	6,7	27	15,2	3,5	0,8	0,7
2004	28	17,2	8,7	29,1	12,5	27,4	17,5	10,1	4	0,8
2005	24,7	24,1	11,1	27,3	11,3	30,4	21,2	11,1	0,7	3,5
2006	23,9	13,7	3,4	28,7	6,4	26,4	18,1	4,4	1	-
2007	24,8	14,5	-	29,6	9	27,8	19,3	-	-	-
2008	26,6	8,5	-	27,4	7	24,6	14	-	1,2	1,8
2009	27,3	11,8	-	27,2	10	26,3	21,8	-	0,9	0
2010	30	17,6	-	27,2	8	27,1	18,3	-	3,2	2,9
2011	28,9	14,5	-	28,1	9,6	26,8	16,1	-	0,7	2
2012	25,5	13,1	-	27,3	8,3	27,3	14	-	2	3,1
2013	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	25,8	-	-	19	-	26,5	14,5	-	-	-
2015	29,18	15,78	2,8	25,5	18,88	27,5	18,88	-	2,1	5,1
2016	31,5	27,4	12,4	29,3	16,6	27,2	17,5	-	3,9	-

Ghi chú: -: Thiếu số liệu

Nhận xét chung: Qua đánh giá diễn biến mặn và giá trị mặn duy trì theo ngưỡng ở các trạm dọc sông Hàm Luông và sông Cửa Tiểu, Cửa Đại khu vực Bến Tre cho thấy. Hiện tượng nhiễm mặn là một hiện tượng phức tạp ảnh hưởng cộng dồn bởi nhiều yếu tố như dòng chảy thượng nguồn, sử dụng nước, thủy triều, hình thái lòng sông, gió chướng... trên cùng hệ thống sông xuất hiện giá trị mặn cực đại biến đổi theo thời gian là không giống nhau. Ví dụ tại Mỹ Tho năm 1998 là năm cực trị về mặn; thì tại Mỹ Hóa năm 2016 mới là năm cực trị.

Nhiễm mặn tỉnh Bến Tre trong năm hạn mặn 2016: Mặn mùa khô 2015-2016 xâm nhập sớm, và sâu vào khu vực tỉnh Bến Tre với giá trị mặn cao. Cụ thể, tháng 11 và 12 năm 2015 đã đo đạc được mặn ở khác khu vực sông Chệt Sậy, sông Cỏ Chiên, sông Hàm Luông và sông Ba Lai. Giá trị mặn tăng cao ở các tháng giữa mùa khô 2016 và kéo dài tới tháng 6/2016. Một số khu vực nội đồng như Giồng Trôm mặn lớn nhất

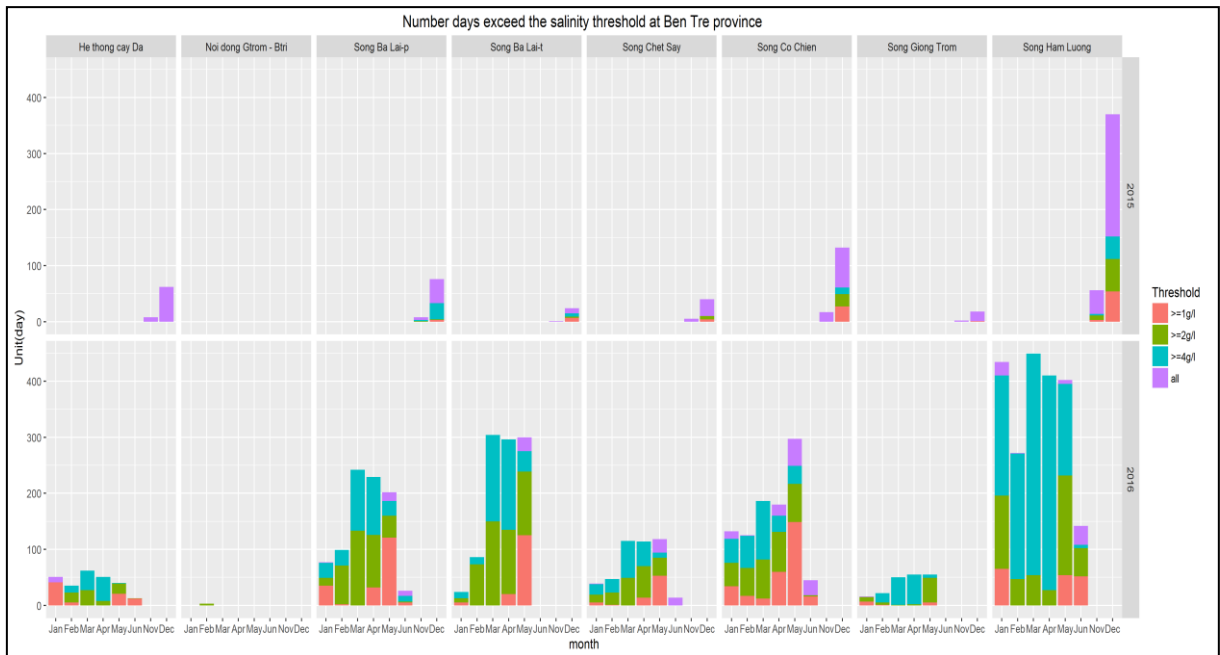
tháng 4 đo được xấp xỉ 10 g/l. Hay khu vực xa Biển như sông Chệt Sậy mặn tháng 3 và 4 vượt 5g/l.



Ghi chú: Sông Ba Lai – t : Trạm đo bờ trái hướng từ thượng lưu xuống hạ lưu;
Sông Ba Lai –P : Bờ phải

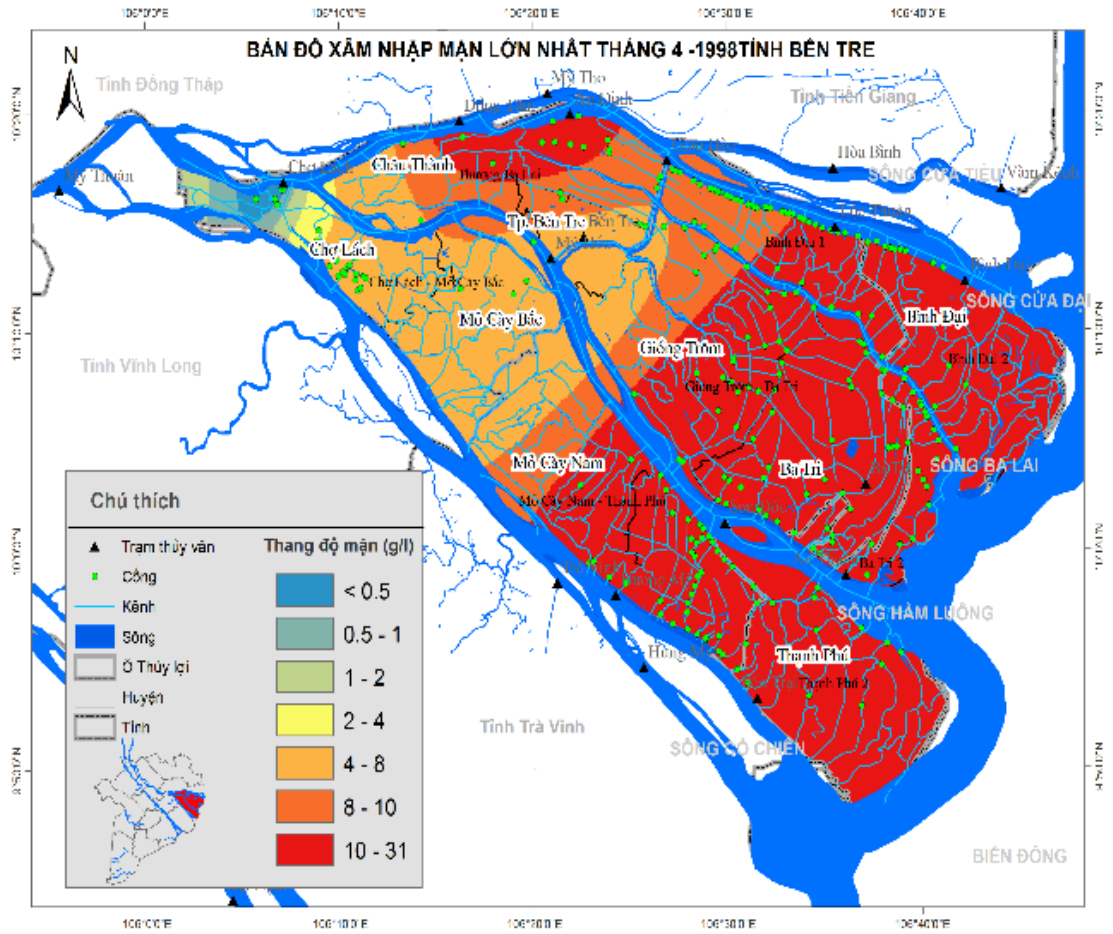
Hình 3-15. Mặn lớn nhất ngày tại các khu vực đo tỉnh Bến Tre năm 2015-2016 theo tháng

Về thời gian duy trì mặn trên ngưỡng; có thể thấy ở dọc các sông chính như Hàm Luông; Cô Chiên và Ba Lai mặn phổ biến duy trì trên 4g/l. Khu vực nội vùng như hệ thống Cây Da cuối năm 2015 mặn nhỏ hơn 1g/l. Tuy nhiên vào mùa khô 2016 mặn phổ biến trên 4g/l ở tháng 3 và 4. Ảnh hưởng lớn là khu vực sông Chệt Sậy vào tháng 12/2015 đã xuất hiện mặn trên 4g/l.

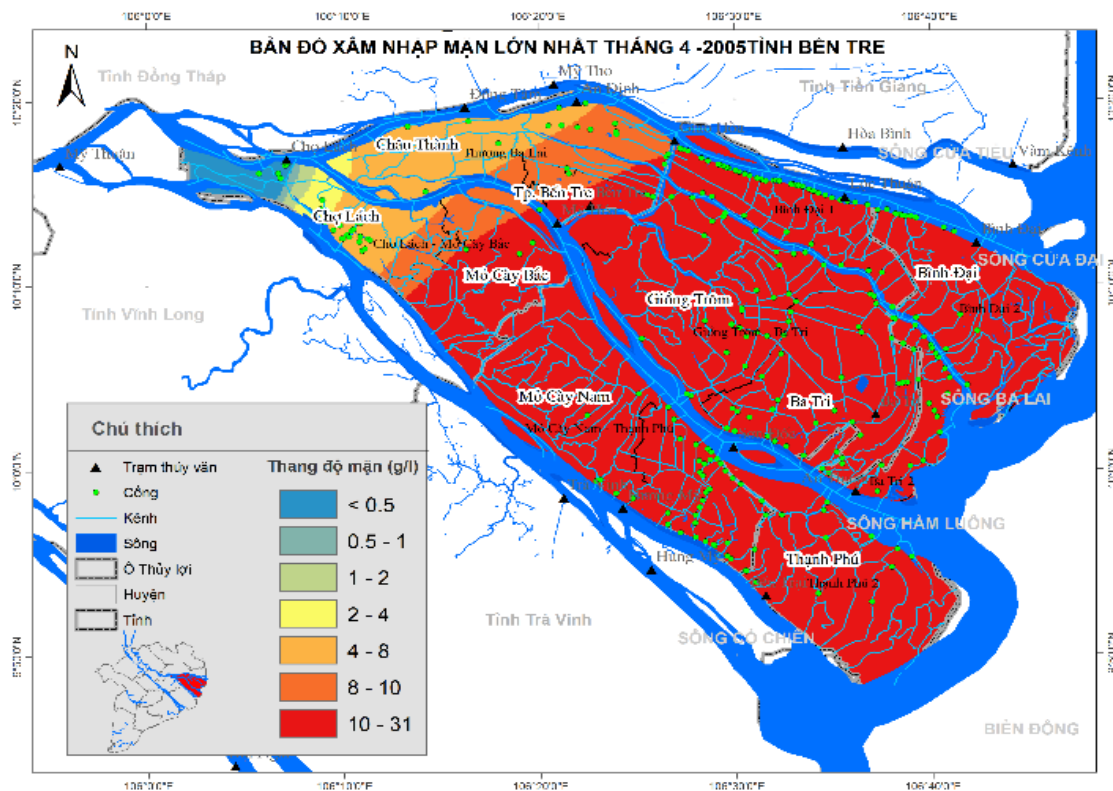


Hình 3-16. Số ngày mặn duy trì trên ngưỡng (Threshold) tại khu vực đo năm 2015-2016 theo tháng

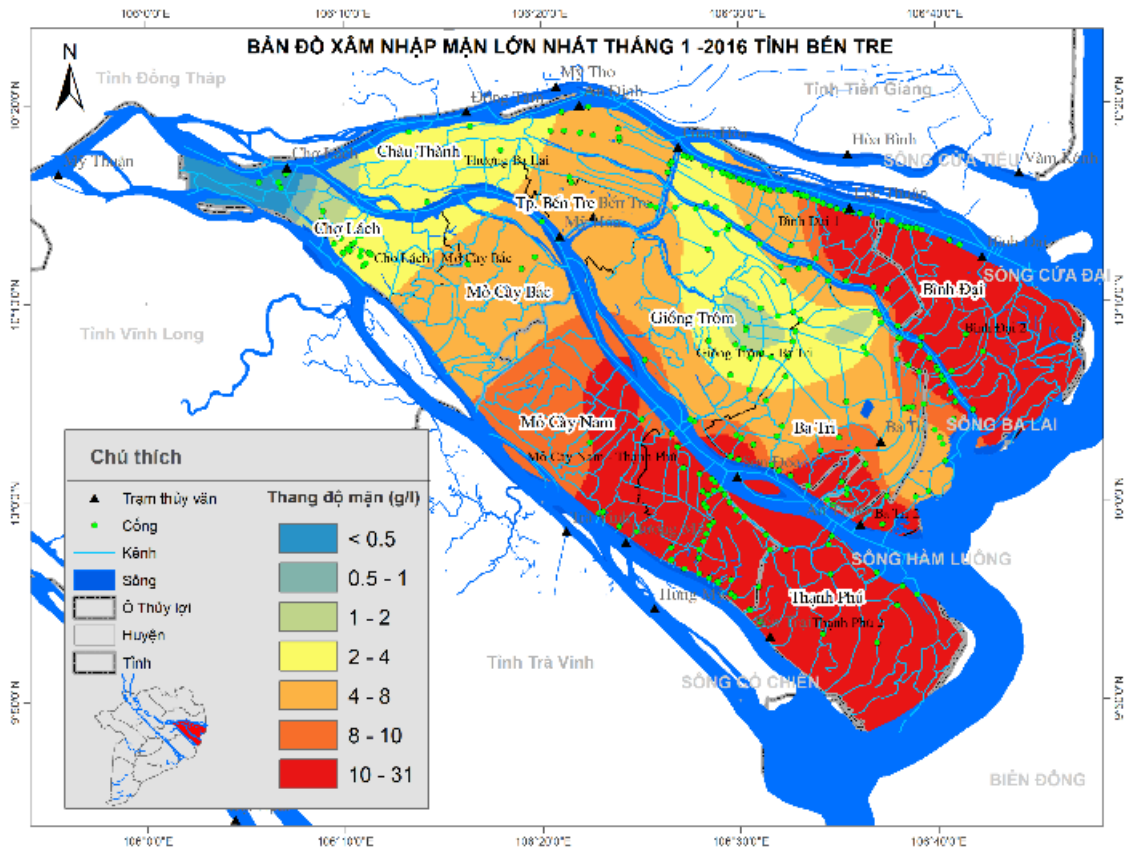
Đánh giá nhiễm mặn theo không gian: Từ những đánh giá về tổng quan diễn biến mặn trên địa bản tỉnh Bến Tre, cho thấy một số năm giá trị mặn lịch sử cả về phạm vi ảnh hưởng và mức độ ảnh hưởng, như các năm 2016, 1998, 2005, 2008. **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.** trình bày độ mặn lớn nhất tháng 4 năm 1998 và 2005 dựa trên số liệu thực đo của các trạm trên dòng chính sông Mê Công. Mặn năm 1998 xâm nhập với phạm vi ảnh hưởng 2g/l lên tới các huyện Châu Thành và Chợ Lách, và xu thế xâm nhập phía sông Tiền lớn hơn so với sông Cổ Chiên và Hàm Luông. Tương tự xu thế đó mặn năm 2005, phạm vi ảnh hưởng vượt qua vàm Giao Hòa với giá trị mặn lớn hơn 2g/l, và xu thế ảnh hưởng trên sông Cổ Chiên và Hàm Luông lớn hơn so với sông Tiền.



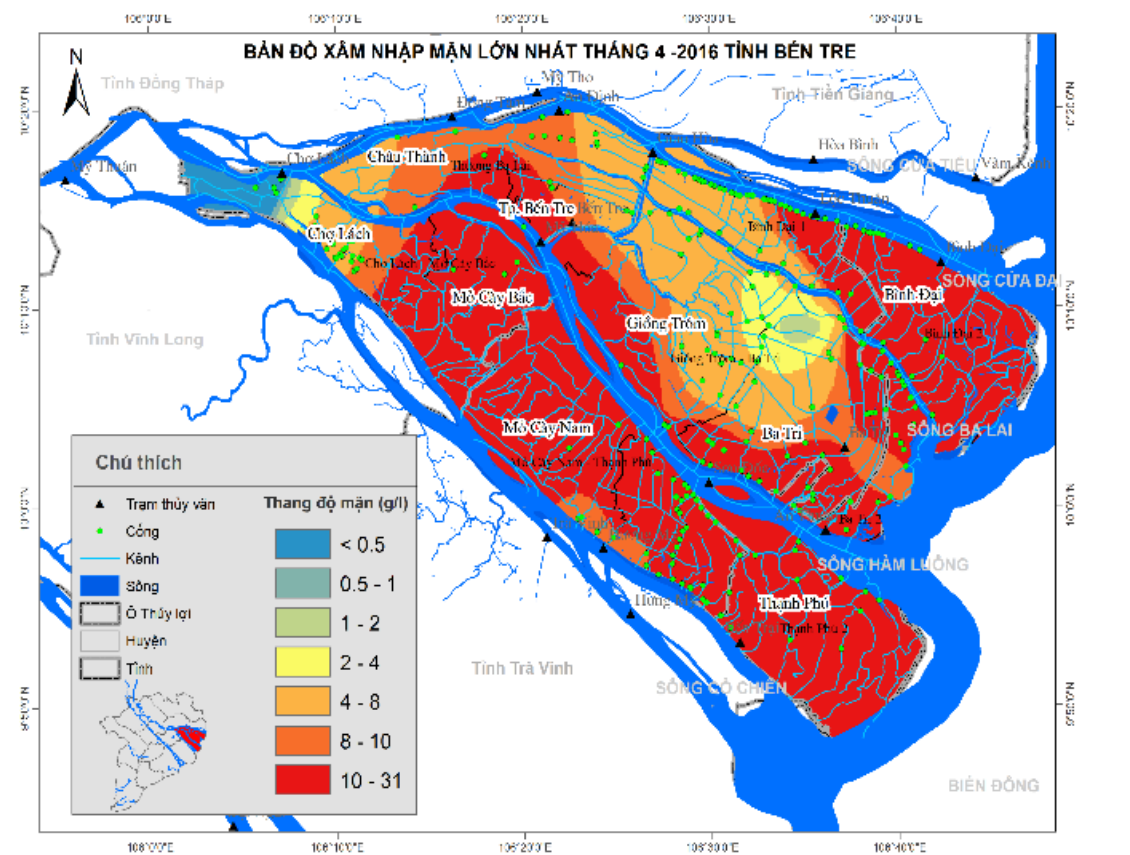
Hình 3-17. Bản đồ phân bố mặn lớn nhất tháng 4/1998



Hình 3-18. Phân bố mặn lớn nhất 4-2005 trên địa bàn tỉnh Bến Tre



Hình 3-19. Phân bố mặn lớn nhất tháng 1- 2016 trên địa bàn tỉnh Bến Tre



Hình 3-20. Phân bố mặn lớn nhất tháng 4-2016 trên địa bàn tỉnh Bến Tre

Năm 2016 là một trong năm lịch sử mặn xâm nhập sớm và sâu hơn so với các năm khác trên địa bàn tỉnh Bến Tre. **Error! Reference source not found., Error! Reference source not found.** cho thấy ở tháng 1-2016 mặn 4g/l đã vượt quá Mỹ Hóa và mặn 1-2 g/l đã ảnh hưởng tới các huyện Chợ Lách và Châu Thành. Đến tháng 4 hơn 2/3 diện tích tỉnh Bến Tre ảnh hưởng bởi mặn lớn hơn 4g/l.

Độ mặn ở cửa sông là kết quả của sự pha trộn giữa nước ngọt từ thượng nguồn (độ mặn < 0,5‰) và nước biển. Độ mặn thay đổi theo thời gian, không gian, chịu ảnh hưởng bởi thủy triều và lưu lượng nước nguồn. Thủy triều đẩy nước mặn vào sâu khi nước nguồn yếu (mùa cạn), còn mùa lũ nước ngọt mạnh sẽ đẩy nước mặn ra xa hạ lưu.

Hiện nay, các yếu tố tác động đến quá trình nước ngọt vùng cửa sông đang có những thay đổi sâu sắc. Phía thượng lưu các hoạt động khai thác nguồn nước ngọt đang diễn ra mạnh mẽ. Xu thế giảm dòng chảy ở thượng lưu sông Mekong đang có những biến động phức tạp ngày càng bất lợi cho ĐBSCL nói chung và vùng nghiên cứu nói riêng. Xu thế đó còn trầm trọng hơn khi những hoạt động khai thác ở thượng lưu ngày càng mạnh. Dòng chảy mùa kiệt đang có xu thế tăng cao trong những năm gần đây. Đó là điểm thuận lợi, tuy nhiên cần lưu ý lượng dòng chảy cuối mùa lũ, đầu mùa kiệt (tháng 11, 12) có xu thế giảm mạnh. Điều này sẽ làm cho nhiễm mặn sớm hơn, tác động mạnh tới vụ Đông Xuân của các tỉnh ven biển trong đó Bến Tre là một địa bàn chịu tác động mạnh nhất.

Từ phía biển, quá trình nước biển dâng do biến đổi khí hậu (BĐKH) đang diễn ra một cách mạnh mẽ và đang ảnh hưởng toàn diện đến hệ thống đồng bằng ven biển. Trên vùng biển Đông (Vũng Tàu) mức nước biển trung bình gia tăng 3.18mm/năm. Trong đó xu thế mức nước đỉnh triều tăng nhanh hơn mức nước chân triều. Biên độ thủy triều tại đây cũng có xu thế gia tăng ở mức 3.72mm/năm. Đi vào cửa sông (Bến Trại) ngoài tác động của nước biển dâng thì các hoạt động khai thác bề mặt đã làm gia tăng khá nhanh các đặc trưng mức nước. Mức nước trung bình tại cửa sông Cổ Chiên (Bến Trại) gia tăng 5.38mm/năm, mức gia tăng này vẫn duy trì khi đi vào sâu trong lục địa. Các giá trị mức nước đỉnh triều và chân triều cũng tăng nhanh. Đặc biệt là xu thế mức nước chân triều gia tăng nhanh hơn đỉnh triều.

Những biến động đó đã làm cho quá trình nước ngọt tại đây biến động mạnh và diễn biến theo chiều hướng xấu đi. Tình trạng thiếu nước ngọt, nhiễm mặn gia tăng ngày càng nghiêm trọng. Đặc biệt là diễn biến thiếu nước ngọt, nhiễm mặn bất thường cuối năm 2015, đầu năm 2016 đã gây thiệt hại rất lớn cho nhân dân vùng ven biển ĐBSCL nói chung và Bến Tre nói riêng.

Về các đặc trưng khí tượng, khu vực Bến Tre có lượng mưa xếp vào mức trung bình thấp của ĐBSCL, nền nhiệt độ, biên độ bốc hơi, số giờ nắng ở mức cao. Chính vì vậy, ở những năm dòng chảy thượng nguồn về nhỏ thì vấn đề hạn hán cấp nước sẽ ảnh hưởng tới sản xuất.

Về nhiễm mặn, bên cạnh mặt thuận lợi có nhiều sông lớn trong hệ thống sông Cửu Long chảy qua, thì điểm yếu của đặc trưng này chính là nhiễm mặn vào mùa khô. Năm 2016, là năm cực trị mặn xâm nhập hơn 2/3 diện tích tỉnh, và do hệ thống thủy lợi chưa hoàn thiện, chính vì vậy thiệt hại nghiêm trọng đã xảy ra.

Tính đến tháng 3/2016, tổng diện tích lúa bị thiệt hại của tỉnh Bến Tre lên tới 19.774 ha. Trong đó, diện tích lúa vụ Đông Xuân 2015-2016 bị thiệt hại 13.844 ha trong tổng số 14.759 ha, chiếm 94% diện tích lúa xuống giống. Nặng nề nhất là 11206 lúa bị thiệt hại hoàn toàn tại huyện Ba Tri.

Huyện Thạnh phú chịu thiệt hại nặng với diện tích 407 ha hoa màu và rau màu chiếm 80% trên tổng số thiệt hại 503 diện tích hư hại của cả tỉnh. Số lượng hoa và cây cảnh bị thiệt hại tới 13.000 cây hoa cảnh các loại tập trung 100% tại huyện Chợ Lách. Trên địa bàn huyện Bình Đại và Giồng Trôm, cây ăn quả, chủ yếu là các loại cây có múi (chanh, cam, bưởi) chịu thiệt hại tới 1275 ha với 275 ha thiệt hại từ nặng tới hoàn toàn (50%-70%).

Nắng nóng kéo dài, trời lạnh vào ban đêm và độ mặn nước ngày càng tăng cao là một trong những nguyên nhân khiến diện tích nuôi trồng thủy sản bị thiệt hại không nhỏ. Tại xã Thừa Đức và Thới Thuận, huyện Bình Đại có tới khoảng 29/36 ha (chiếm hơn 80%) hào nuôi của gần gần 500 hộ dân bị chết, thiệt hại khoảng 2.600 tấn, ước tính giá trị hơn 45 tỷ đồng.

Tại huyện Ba Tri, các vật nuôi chủ lực như bò, lợn cũng bị ảnh hưởng nghiêm trọng bởi thiếu nước uống và thức ăn. Thiệt hại lớn do lúa vụ Đông Xuân mất mùa làm

giảm lượng rơm - thức ăn chủ yếu cho 80.000 con bò tại huyện không được đảm bảo. Đàn lợn tại xã Tân Hưng có khoảng 3.200 con chiếm gần 30% trong tổng số đàn lợn của toàn Huyện Ba Tri được ghi nhận có nhiều trường hợp bị tiêu chảy do uống nước bị nhiễm mặn, đàn lợn phát triển không đồng đều, chậm lớn và có dấu hiệu lở loét do người dân thiếu nước ngọt vệ sinh chuồng trại.

Tình hình đời sống người dân cũng bị ảnh hưởng không ít do tình trạng xâm nhập mặn tăng cao. Có tới 353.000 người trong 88.208 hộ dân thiếu nước ngọt sinh hoạt. Chịu ảnh hưởng lớn nhất là 3 huyện ven biển và những hộ nghèo thiếu điều kiện trang bị dụng cụ trữ nước. Huyện Thạnh Phú và huyện Mỏ Cày Nam có tới 40.000 hộ dân thiếu nước sạch sử dụng.

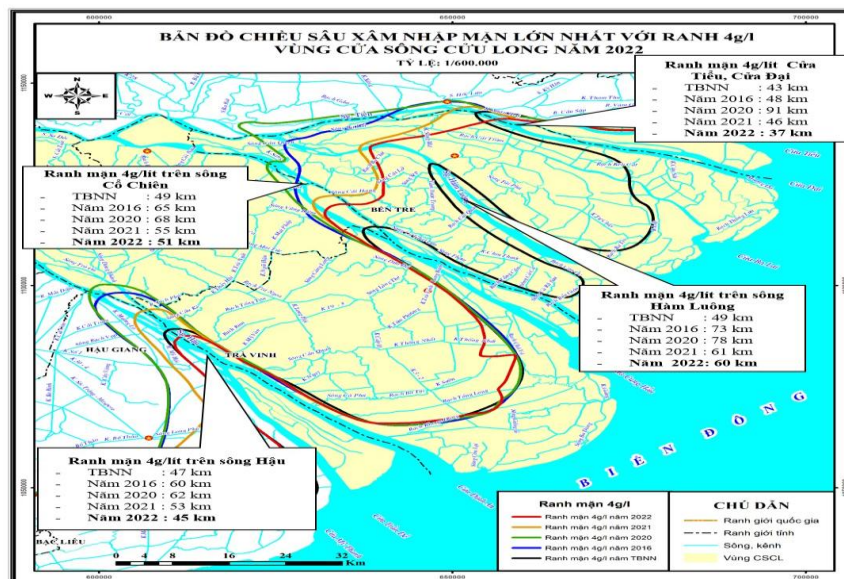
Xâm nhập mặn diễn ra ở đồng bằng sông Cửu Long không chỉ gây thiệt hại về đời sống sinh hoạt, các hoạt động kinh tế mà còn có tác động tới vệ sinh môi trường do thiếu nước ngọt trong thời gian kéo dài.

Từ năm 2002 đến 2010, ranh giới mặn 4‰ tại Bến Tre nhiều lần ghi nhận lên tới Phú Túc, Cái Môn, cách bờ biển 60 km. Các năm 2004, 2005 và 2010, mặn 4‰ xuất hiện ở Vàm Môn trên sông Hàm Luông. Độ mặn 1‰ phổ biến khắp tỉnh. Sự xâm nhập mặn gia tăng do mực nước biển dâng và hạn hán đã tác động tiêu cực đến nuôi tôm sú, ảnh hưởng cả nước mặt lẫn nước ngầm.

Năm 2017, mùa khô tại Bến Tre không diễn ra khốc liệt như năm 2016 nhưng vẫn gây ra thiệt hại không ít. Đến ngày 11/4/2017, trên các vùng cửa sông Bến Tre (Cửa Đại, Hàm Luông, Cổ Chiên) độ mặn đã đạt từ 23-26‰, độ mặn 4‰ xâm nhập lên sâu vào thượng nguồn từ 34-40 km, độ mặn 1‰ cách cửa sông khoảng 46-50 km (vượt qua khỏi trung tâm TP. Bến Tre). Cấp độ rủi ro thiên tai do xâm nhập mặn đạt cấp độ I.

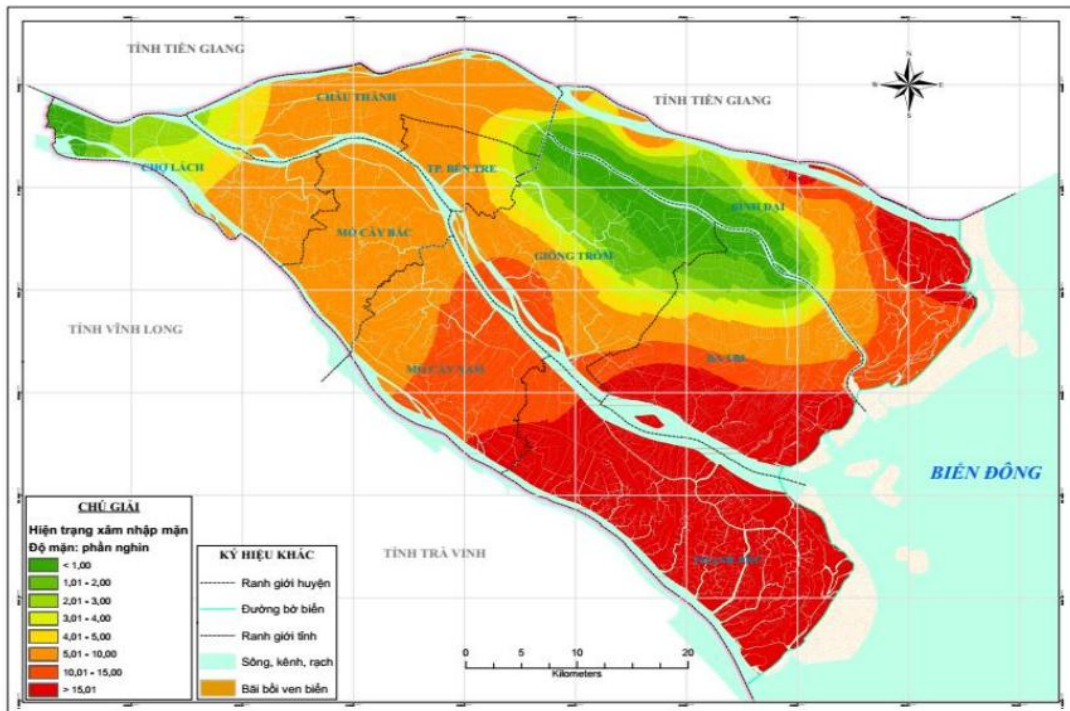
Phạm vi xâm nhập mặn lớn nhất mùa khô năm 2020 với ranh mặn 4 g/lít so với TBNN và năm 2016 vùng cửa sông Cửu Long như sau: Các cửa sông Cửa Tiểu, Cửa Đại: Chiều sâu xâm nhập mặn năm 2020 cao nhất ở mức 90 km (05/03/2020), sâu hơn khoảng 50 km so với TBNN và sâu hơn 40 km so với mức sâu nhất năm 2016 (29-30/03/2016); Sông Hàm Luông: Chiều sâu xâm nhập mặn năm 2020 đạt mức cao nhất là 78 km (toàn tuyến sông) duy trì từ tháng 2- 4/2020, sâu hơn 35 km so với TBNN và

sâu hơn khoảng 5km so với mức sâu nhất năm 2016 (29/3/2016); Sông Cổ Chiên: Chiều sâu xâm nhập mặn 2020 cao nhất đạt mức 68 km (10-11/1/2020), xâm nhập sâu hơn 24 km so với TBNN và sâu hơn khoảng 3km so với mức sâu nhất năm 2016; Sông Hậu (cửa Định An): Ranh mặn 4g/lít sâu nhất khoảng 65 km (11-12/2/2020), so với TBNN sâu hơn 24km và sâu hơn 6 km so với mức sâu nhất năm 2016 (09/03/2016). Xâm nhập mặn mùa khô năm 2020 có một số đặc điểm nổi bật, khác với quy luật của nhiều năm như sau: Xâm nhập mặn xuất hiện sớm hơn so với TBNN gần 3 tháng, sớm hơn mùa khô năm 2016 gần 1 tháng; thời gian xâm nhập mặn kéo dài hơn 2-2,5 lần so với mùa khô năm 2016. Xâm nhập mặn sâu hơn và kéo dài hơn so với năm 2016 và TBNN, phạm vi ảnh hưởng lớn hơn so với mùa khô năm 2016 và TBNN. Độ mặn tại các cửa sông Cửa Tiểu, Cửa Đại, Hàm Luông duy trì ở mức cao liên tục từ tháng 2 đến tháng 5, hầu như không giảm trong các kỳ triều thấp, khác với thông thường.

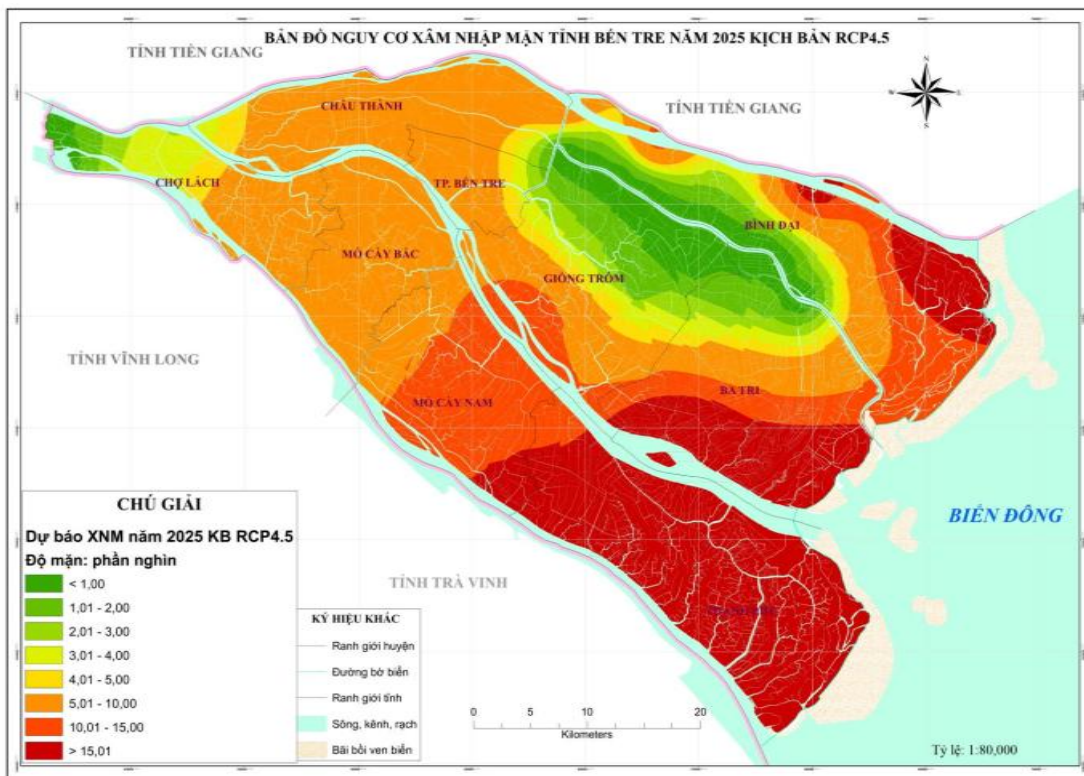


Hình 3-21. Phạm vi xâm nhập mặn (4g/l) lớn nhất

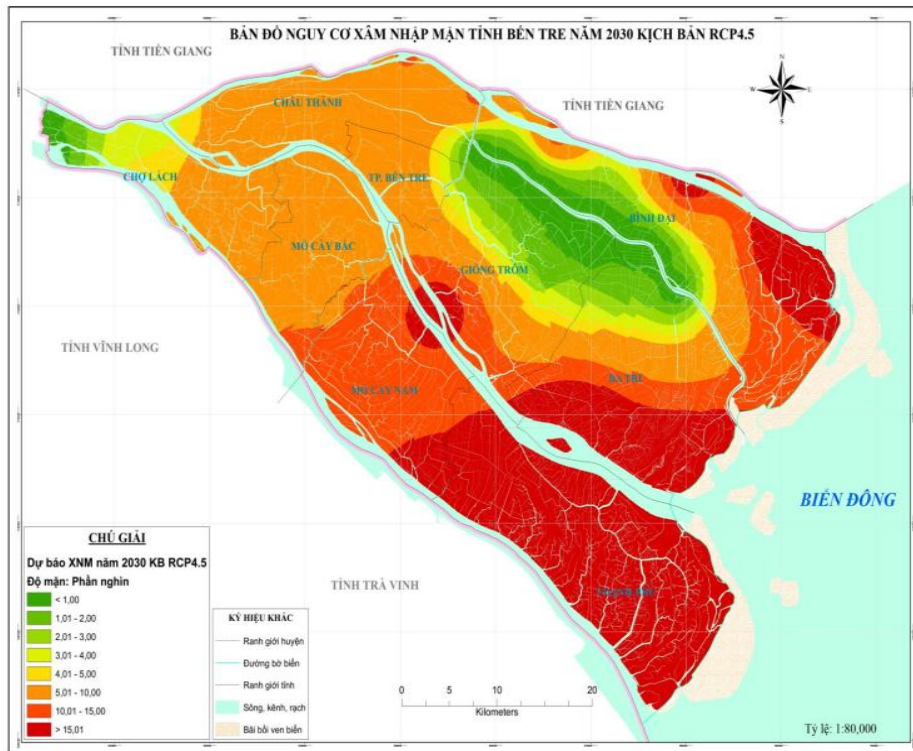
Cuối năm 2019 - đầu 2020, mặn xâm nhập sâu hơn mùa khô lịch sử 2015-2016, độ mặn >4% vào đến vùng cây ăn trái Chợ Lách, >2% phủ toàn tỉnh. Thiệt hại: 5.287 ha lúa ngoài kế hoạch, 168 ha rau màu, ảnh hưởng 27.985 ha cây ăn trái, 600 ha cây giống, 1,2 triệu hoa kiềng, 3.097,24 ha thủy sản; 5% nước máy không dùng được cho sinh hoạt, 86.896 hộ thiếu nước.



Hình 3-22. Bản đồ độ mặn năm 2016[82].



Hình 3-23. Dự báo XNM năm 2025[82].



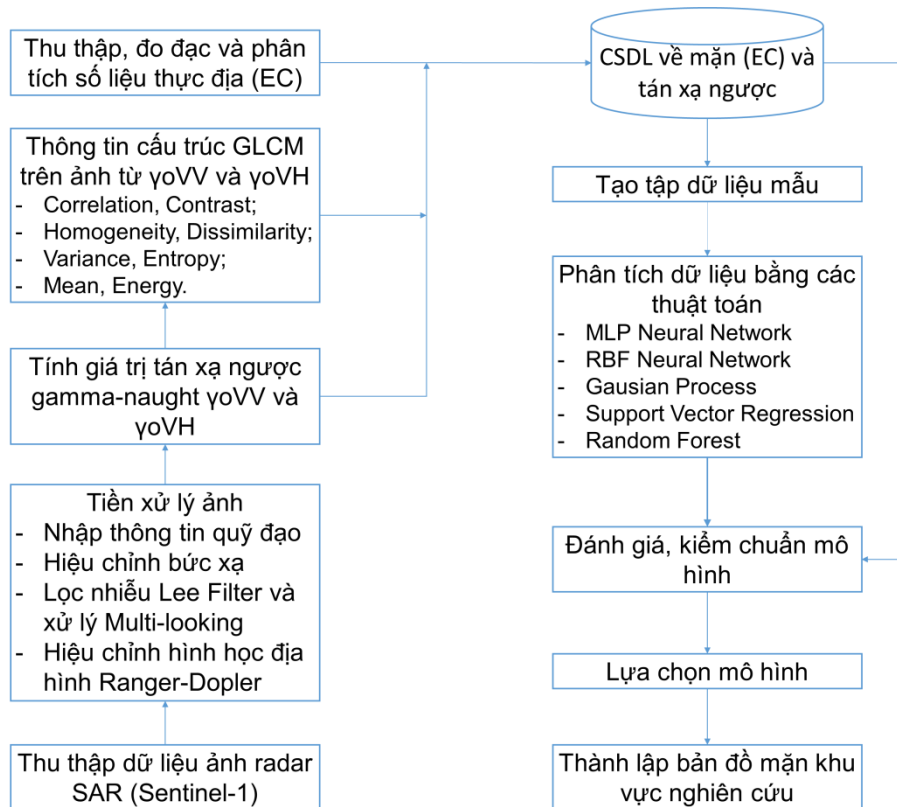
Hình 3-24. Dự báo XNM năm 2030[82].

Bến Tre đã và đang triển khai nhiều biện pháp ứng phó với BĐKH như triển khai nhiều mô hình canh tác, công trình trọng điểm ứng phó lâu dài BĐKH. Bên cạnh đó là các dự án giảm nhẹ BĐKH như các dự án trồng rừng ven biển, các hoạt động giảm nhẹ phát thải khí nhà kính, chuyển đổi hệ thống điện năng lượng nhưng Bến Tre vẫn đã đang và sẽ chịu nhiều ảnh hưởng của BĐKH và XNM. Theo kịch bản BĐKH Bến Tre năm 2020 chúng ta thấy diện tích chịu ảnh hưởng của XNM ngày càng tăng, độ mặn xâm nhập vào sâu trong nội đồng và tăng dần theo năm. Độ mặn xâm nhập sâu trong nội đồng, thời gian kéo dài sẽ gây ảnh hưởng ngày càng lớn đến nền nông nghiệp của tỉnh ngày càng nhiều. Bên cạnh đó việc xâm nhập mặn duy trì ở duy trì liên tục ở mức cao không giảm theo quy luật nên công tác ứng phó BĐKH và XNM còn nhiều khó khăn.

3.2. Nghiên cứu ứng dụng đánh giá và phân vùng nhiễm mặn bằng tư liệu viễn thám radar - thí điểm ở Bến Tre.

3.2.1. Quy trình phương pháp tiếp cận nghiên cứu đánh giá nhiễm mặn trên đất bằng tư liệu ảnh radar

Quy trình phương pháp đề xuất được sử dụng trong nghiên cứu này để thành lập bản đồ độ mặn của đất cho khu vực nghiên cứu được mô tả như trong hình. Tư liệu sử dụng là ảnh radar Sentinel-1 SAR. Ảnh được tiền xử lý bằng công cụ SNAP, trong khi mô hình hóa được thực hiện trong môi trường Matlab bằng công cụ học máy WEKA API.



Hình 3-25: Quy trình phân tích, thành lập bản đồ xâm nhập mặn trong đất bằng tư liệu ảnh radar Sentinel-1

3.2.1.1. Chuẩn bị cơ sở dữ liệu cho mô hình

Cơ sở dữ liệu (CSDL) đầu vào cho mô hình phân tích tính toán gồm dữ liệu EC thực địa, các kênh ảnh radar Sentinel-1 và các lớp thông tin cấu trúc tính từ ảnh. Các lớp thông tin trong cơ sở dữ liệu đều được xử lý chuẩn hóa trước khi sử dụng. Tập dữ liệu mẫu EC ở đây là bộ số liệu kết quả phân tích trong phòng thí nghiệm các mẫu đất thu thập tại các điểm khảo sát thực địa trong mùa khô, cùng thời điểm thu thập ảnh vệ tinh

radar Sentinel-1. Trong nghiên cứu tại Bến Tre, có 63 khu vực thực địa đã được khảo sát, lấy mẫu đất để phân tích. 70% mẫu được sử dụng để phát triển mô hình, 30% được sử dụng để kiểm chứng.

3.2.1.2. Tiền xử lý dữ liệu Sentinel-1

Dữ liệu Sentinel-1 IW GRDH (Ground Range Detected in High resolution) sau khi thu thập cần được tiền xử lý trước khi sử dụng phân tích. Ảnh ở dạng amplitude bao gồm 2 phân cực VV và VH được hiệu chỉnh về giá trị tán xạ ngược (backscattering) gamma-naught γ_{VV} và γ_{VH} do giá trị tán xạ gamma-naught có ưu điểm ít nhạy với những ảnh hưởng không mong muốn trên ảnh, chẳng hạn như: góc tới mặt trời. Ảnh này sau đó được lọc nhiễu bằng cách áp dụng phép lọc median Lee filter (5x5m) và xử lý multilooking trên ảnh radar. Sau đó, ảnh được hiệu chỉnh hình học Range-Doppler để loại bỏ các biến dạng, ảnh hưởng do địa hình bằng cách sử dụng kết hợp mô hình số độ cao SRTM DEM của NASA. Sau khi ảnh được tiền xử lý, các kênh γ_{VV} và γ_{VH} thu được được sử dụng làm hai biến đầu vào đầu tiên cho mô hình độ mặn của đất.

3.2.1.3. Phân tách thông tin cấu trúc

Nghiên cứu trước đây đã chỉ ra các thông tin cấu trúc trên tư liệu ảnh radar có tương quan với độ mặn của đất và có thể sử dụng trong phân tích đánh giá xâm nhập mặn [70]. Dựa trên đặc điểm này, các thông tin cấu trúc GLCM (Grey Level Co-occurrence Matrix) phân tích tính từ 2 kênh ảnh γ_{VV} và γ_{VH} cũng được sử dụng như các biến đầu vào cho mô hình phân tích thành lập bản đồ độ mặn của đất. Phương pháp phân tích cấu trúc GLCM dựa trên thông tin cường độ, độ sáng của các điểm ảnh để phân tách các lớp thông tin đặc trưng về cấu trúc và mối quan hệ với môi trường xung quanh của các đối tượng trên ảnh.

Trong nghiên cứu này, tám đặc trưng cấu trúc (Correlation, Contrast, Homogeneity, Dissimilarity, Variance, Entropy, Mean, Energy) được tính từ các kênh ảnh γ_{VV} và γ_{VH} bằng phương pháp phân tích GLCM, được sử dụng như các biến đầu vào cho mô hình ước tính độ mặn của đất. Đây là các lớp thông tin cấu trúc về tính tương quan (Correlation), độ tương phản (Contrast), tính đồng nhất (Homogeneity), sự khác biệt (Dissimilarity), sự biến thiên (Variance), sự nhiễu động (Entropy), lọc tổ hợp trung bình (Mean) và mức độ năng lượng (Energy). Công cụ phân tích GLCM này được tích hợp trong phần mềm SNAP của ESA. Phương pháp, công thức tính các thông tin

này được mô tả chi tiết trong nghiên cứu về phân tích tính tương quan giữa các phân cực SAR và độ mặn của đất của tác giả Taghadosi [83]. Tổng cộng có 16 chỉ số cấu trúc có thể được tạo ra từ ảnh Sentinel-1 trên 2 phân cực γ_{VV} và γ_{VH} (8 chỉ số cấu trúc từ mỗi kênh).

3.2.1.4. Lựa chọn mẫu

Các biến đưa vào mô hình để thành lập mô hình ước tính EC gồm 2 kênh ảnh (γ_{VV} và γ_{VH}) và 16 kênh chỉ số được tính từ hai kênh này. Do vậy, cần kiểm tra, đánh giá tập mẫu sử dụng về khả năng tương quan cộng tuyến, dư thừa dữ liệu hay gây nhiễu, giảm độ chính xác của mô hình ước tính EC. Trong nghiên cứu này, thuật toán Random Forests (RF) đã được sử dụng để phân tích các biến đầu vào, đánh giá tầm quan trọng của mỗi biến và mối quan hệ tương hỗ giữa các biến.

3.2.1.5. Thiết lập mô hình

Năm mô hình thuật toán machine learning được thiết lập dựa trên tập mẫu đầu vào bao gồm 2 kênh phân cực, 16 ảnh chỉ số cấu trúc và tập dữ liệu mẫu EC thực địa (70% mẫu phân tích).

+ Đối với mô hình Gaussian Processes (GP), tham số kernel σ tốt nhất được xác định dựa trên phân tích kiểm thử (trial-and-test analysis). Sự dao động của σ được đánh giá dựa trên 3 đại lượng thống kê sai số trung phương (RMSE), sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và hệ số tương quan (r). Với nghiên cứu này, $\sigma = 1.205$ cho thấy phù hợp nhất.

+ Với mô hình Support Vector Regression, ba tham số $\nu = 0.579$, $C = 1.971$ và $\gamma = 3.77$ được xác định dựa trên phương pháp đánh giá ô lưới (grid search method).

+ Trong mô hình Random Forest (RF), tất cả các biến được đưa vào để thành lập cây phân loại. 1000 cây phân loại thứ cấp (sub-decision tree) được xác định để đảm bảo tính đa dạng của mô hình.

+ Mô hình Multilayer Perceptron Neural Networks (MLP-NN) hoạt động tốt nhất với 6 điểm hidden neuron theo phương pháp phân tích kiểm thử (trial-and-test analysis).

+ Với Mô hình Radial Basis Function Neural Networks (RBF-NN), số lượng tối ưu là 20 nhóm (clusters) được xác định dựa trên sai số tuyệt đối trung bình (MAE) và hệ số tương quan (r).

3.2.1.6. Đánh giá mô hình

Các mô hình ước tính độ mặn của đất được đánh giá dựa trên ba chỉ số RMSE - sai số trung phương, MAE - sai số tuyệt đối trung bình và r - hệ số tương quan (Bảng 5.3, Hình 5.2).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i|$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}$$

Trong đó \hat{y}_i và y_i lần lượt là các giá trị EC mô hình và EC đo đạc của mẫu thứ i ; \bar{y} và $\bar{\hat{y}}$ là giá trị trung bình EC đo được và EC mô hình; n là tổng số mẫu được sử dụng.

3.2.1.7. Kiểm chuẩn, lựa chọn mô hình

Sau khi năm mô hình độ mặn của đất được thực hiện thành công, chúng được kiểm chuẩn và so sánh bằng cách sử dụng tập dữ liệu kiểm định (30% dữ liệu thực địa) để xác định mô hình tốt nhất cho khu vực nghiên cứu. Mô hình tốt nhất này được lựa chọn để triển khai tính toán các giá trị độ mặn của đất cho tất cả các pixel của khu vực nghiên cứu.

3.2.2. Kết quả ứng dụng tư liệu viễn thám radar Sentinel-1 trong đánh giá, phân vùng nhiễm mặn tại Bến Tre

3.2.2.1. Đánh giá, lựa chọn mô hình

Các phương pháp, thuật toán đã đề cập được áp dụng phát triển và đánh giá sử dụng ảnh vệ tinh radar Sentinel-1b chụp cuối mùa khô, ngày 6 tháng 4 năm 2018 và đối chiếu với tập dữ liệu thực địa thu thập cùng thời kỳ, ngày 4-6 tháng 4 năm 2018.

Kết quả thiết lập và đánh giá mô hình thuật toán Multilayer Perceptron Neural Network ước tính độ mặn (EC) của đất dựa trên 18 lớp thông tin đầu vào được thể hiện trong bảng thống kê dưới đây. Số lượng các phần tử hidden neuron của thuật toán sử

dụng dao động từ 1 đến 30. Các giá trị sai số RMSE, MAE và hệ số tương quan r được sử dụng để đánh giá mô hình đã phát triển dựa trên tập dữ liệu mẫu (training dataset) và kết quả đánh giá độ chính xác dựa trên tập dữ liệu kiểm chứng (validating dataset).

Nhìn chung, mức độ phù hợp của mô hình MLP-NN với tập dữ liệu mẫu tăng lên khi số lượng hidden neuron tăng lên. Tuy nhiên, nhìn vào tập dữ liệu kiểm định, hiệu suất dự đoán của mô hình MLP-NN tăng từ cấu trúc $18 \times 1 \times 1$ (RMSE = 4.226, MAE = 3.077 và $r = 0.523$) lên cấu trúc $18 \times 6 \times 1$ (RMSE = 3.450, MAE = 2.646, và $r = 0,624$), và sau đó, hiệu suất dự đoán của mô hình giảm dần khi số hidden neuron tiếp tục tăng. Do đó, cấu trúc tốt nhất của mô hình MLP-NN là $18 \times 6 \times 1$ khi hệ số tương quan r của tập dữ liệu kiểm định cao nhất.

Bảng 3-2: Kết quả mô hình thuật toán Multilayer Perceptron Neural Network (IN: Input neuron; HN: Hidden neuron; OP: Output).

No	MLP-NN (IN \times HN \times OP)	Training Set			Validating Set		
		RMSE	MAE	r	RMSE	MAE	r
1	$18 \times 1 \times 1$	3.925	2.998	0.848	4.226	3.077	0.523
2	$18 \times 2 \times 1$	3.919	2.994	0.848	4.214	3.074	0.525
3	$18 \times 3 \times 1$	3.923	3.008	0.847	4.207	3.068	0.526
4	$18 \times 4 \times 1$	3.704	2.864	0.845	3.846	2.929	0.553
5	$18 \times 5 \times 1$	3.724	2.893	0.841	3.792	2.892	0.56
6	$18 \times 6 \times 1$	3.744	2.936	0.839	3.450	2.646	0.624
7	$18 \times 7 \times 1$	3.775	2.969	0.838	3.484	2.687	0.620
8	$18 \times 8 \times 1$	4.246	3.457	0.831	4.103	3.45	0.354
9	$18 \times 9 \times 1$	3.910	3.002	0.846	4.147	3.036	0.532
10	$18 \times 10 \times 1$	4.567	3.736	0.834	4.286	3.372	0.513
11	$18 \times 11 \times 1$	4.563	3.699	0.837	4.332	3.363	0.504
12	$18 \times 12 \times 1$	4.413	3.840	0.818	4.030	3.579	0.558
13	$18 \times 14 \times 1$	4.637	3.821	0.829	4.354	3.439	0.507
14	$18 \times 16 \times 1$	4.030	3.219	0.836	3.891	3.162	0.562
15	$18 \times 18 \times 1$	4.618	3.825	0.833	4.388	3.561	0.481
16	$18 \times 20 \times 1$	4.581	3.823	0.830	4.327	3.620	0.479
17	$18 \times 22 \times 1$	2.413	1.829	0.904	4.643	3.615	0.320
18	$18 \times 24 \times 1$	2.206	1.519	0.913	4.427	3.079	0.565
19	$18 \times 26 \times 1$	2.251	1.592	0.912	4.079	3.019	0.558
20	$18 \times 28 \times 1$	2.512	1.878	0.901	4.423	3.052	0.542
21	$18 \times 30 \times 1$	2.211	1.523	0.912	4.070	2.862	0.551

Cách thức đánh giá tương tự được thực hiện với mô hình Radial Basis Function Neural Network để xác định số lượng cluster tốt nhất cho mô hình. Nói chung, mức độ phù hợp của mô hình RBF-NN với tập mẫu tăng khi số lượng nhóm cluster tăng. Tuy nhiên, khi đánh giá với tập dữ liệu kiểm định, hiệu suất dự đoán tăng của thuật toán dần

từ mô hình RBF-NN với 2 cluster (RMSE = 4.136, MAE = 3.022 và $r = 0.121$) tới mô hình RBF-NN với 21 cluster. Độ tương quan của mô hình giảm khi tiếp tục tăng từ 21 lên 30 cluster. Do vậy, cấu trúc tốt nhất của mô hình RBF-NN là $18 \times 21 \times 1$ với hệ số tương quan cao nhất $r = 0.772$ và RMSE = 2.732, MAE = 1.586.

Bảng 3-3. Kết quả mô hình thuật toán Radial Bases Function Neural Network (IN: Input neuron; CL: Number of clusters; OP: Output)

No	RBF-NN (IN \times CL \times OP)	Training Set			Validating Set		
		RMSE	MAE	r	RMSE	MAE	r
1	18 \times 2 \times 1	5.302	3.247	0.005	4.136	3.022	0.121
2	18 \times 3 \times 1	5.247	3.068	0.144	4.211	3.096	-0.051
3	18 \times 4 \times 1	5.160	2.962	0.230	4.308	3.134	0.006
4	18 \times 5 \times 1	5.043	2.829	0.309	3.747	2.608	0.431
5	18 \times 6 \times 1	4.649	2.691	0.481	5.011	3.309	-0.226
6	18 \times 7 \times 1	4.663	2.741	0.476	4.730	3.012	-0.115
7	18 \times 8 \times 1	4.663	2.736	0.476	4.823	3.223	-0.114
8	18 \times 9 \times 1	4.640	2.744	0.484	4.339	3.092	0.187
9	18 \times 10 \times 1	4.680	2.684	0.470	4.112	2.832	0.291
10	18 \times 11 \times 1	4.554	2.517	0.512	4.324	2.836	0.218
11	18 \times 12 \times 1	4.299	2.539	0.585	4.103	2.855	0.301
12	18 \times 14 \times 1	4.217	2.452	0.606	4.775	3.123	0.045
13	18 \times 16 \times 1	4.402	2.414	0.557	4.556	3.052	0.178
14	18 \times 17 \times 1	3.833	2.096	0.691	2.981	1.924	0.729
14	18 \times 18 \times 1	3.833	2.087	0.691	3.210	2.074	0.692
15	18 \times 19 \times 1	3.825	2.08	0.693	3.187	2.008	0.707
16	18 \times 20 \times 1	3.760	1.934	0.705	3.249	2.059	0.698
17	18 \times 21 \times 1	3.702	1.822	0.716	2.732	1.586	0.772
18	18 \times 22 \times 1	3.510	1.655	0.750	7.225	3.417	0.327
19	18 \times 24 \times 1	3.508	1.612	0.750	7.142	3.362	0.323
20	18 \times 26 \times 1	3.344	1.492	0.776	7.130	3.382	0.191
21	18 \times 28 \times 1	3.370	1.489	0.772	7.353	3.593	0.118
22	18 \times 30 \times 1	3.330	1.364	0.778	7.558	3.746	0.072

Đối với ba mô hình thuật toán còn lại, kết quả tối ưu đạt được khi tham số $\sigma = 1.205$ là tốt nhất cho mô hình Gaussian Process; trong khi với mô hình Support Vector Regression, $\nu = 0,579$, $C = 1.971$ và $\gamma = 3.77$ là phù hợp nhất; và đối với mô hình Random Forest, 500 cây phân loại đã được sử dụng.

Kết quả tổng hợp phát triển và kiểm định các mô hình thuật toán ước tính độ mặn của đất được thể hiện trong bảng thống kê tổng hợp và đồ thị so sánh tương quan kết quả của các mô hình thuật toán. Trong nghiên cứu này, NCS xác định ngưỡng $r = 0.7$ để xem xét đánh giá. Mô hình thuật toán có kết quả đánh giá $r > 0.7$ được cho là có tương quan cao, mô hình thuật toán có $r < 0.7$ là tương quan thấp. Mô hình thuật toán

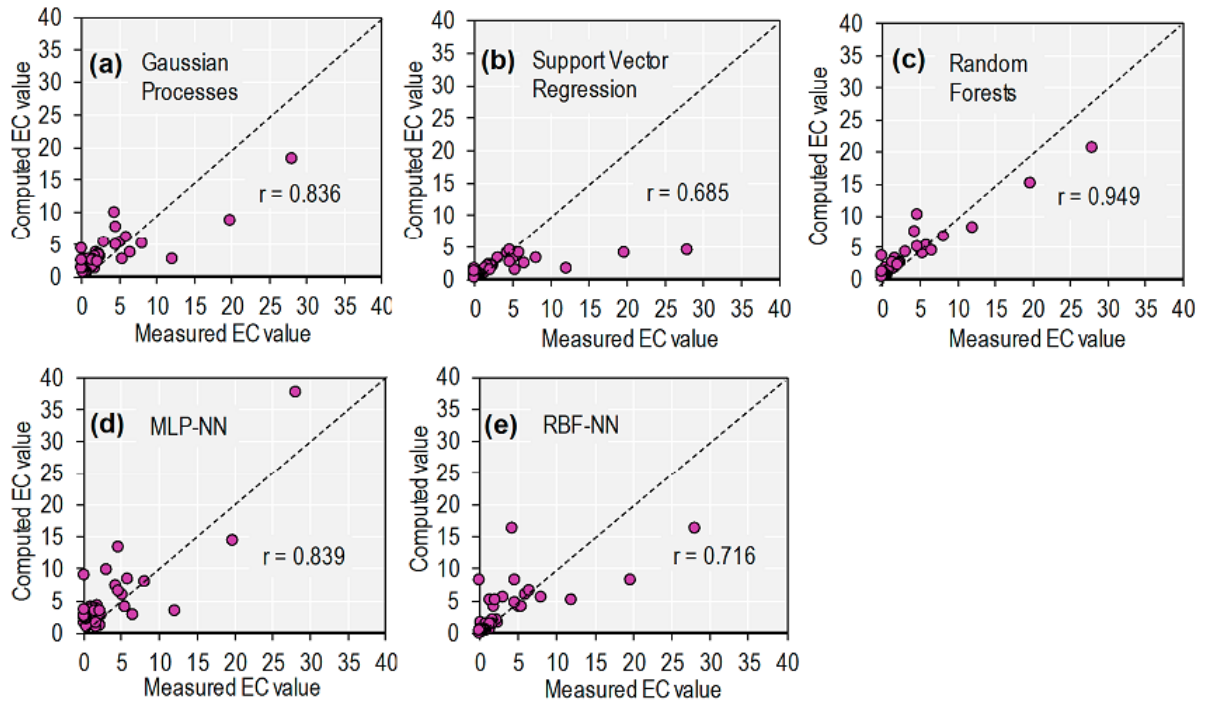
được lựa chọn để áp dụng cho toàn tỉnh sẽ là phương pháp tối ưu, có hệ số tương quan r của mô hình phát triển và kết quả kiểm định đều cao.

Có thể thấy rằng bốn mô hình RF, GP, MLP-NN, RBF-NN được phát triển sử dụng tập mẫu đầu vào (training dataset) có hệ số tương quan tương đối cao. Mức phù hợp cao nhất được chỉ ra là mô hình RF (RMSE = 2.008, MAE = 1.252 và $r = 0.949$), tiếp theo là mô hình GP (RMSE = 3.170, MAE = 1.860 và $r = 0.839$), mô hình MLP-NN (RMSE = 3.744, MAE = 2.936 và $r = 0.836$) và mô hình RBF-NN (RMSE = 3.702, MAE = 1.822 và $r = 0.716$). Mô hình SVR có mức độ tương quan thấp nhất trong 5 thuật toán sử dụng (RMSE = 4.784, MAE = 1.868 và $r = 0.685$).

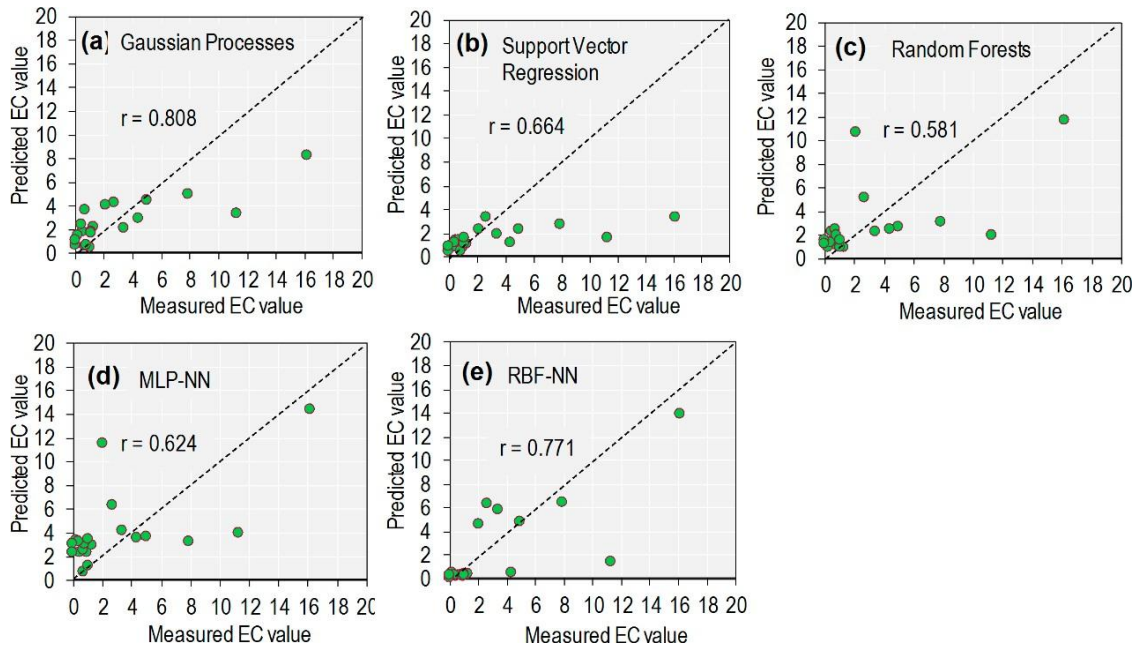
Liên quan đến kết quả kiểm định, mô hình GP có độ tương quan cao nhất (RMSE = 2.885, MAE = 1.897 và $r = 0.808$), tiếp theo là mô hình RBF-NN (RMSE = 2.732, MAE = 1.586 và $r = 0.772$). Ba mô hình còn lại, mô hình SVR (RMSE = 3.946, MAE = 2.091 và $r = 0.664$), mô hình MLP-NN (RMSE = 3.450, MAE = 2.646 và $r = 0.624$) và mô hình RF (RMSE = 3,417, MAE = 2,269 và $r = 0,581$), có hiệu suất dự đoán thấp.

Bảng 3-4. Bảng tổng hợp kết quả của 5 mô hình thuật toán machine learning ở khu vực nghiên cứu

Soil Salinity Model	Training Set			Validation Set		
	RMSE	MAE	r	RMSE	MAE	r
Multilayer Perceptron Neural Networks (MLP-NN)	3.744	2.936	0.836	3.450	2.646	0.624
Radial Basis Function Neural Networks (RBF-NN)	3.702	1.822	0.716	2.732	1.586	0.772
Gaussian Processes (GP)	3.170	1.860	0.839	2.885	1.897	0.808
Support Vector Regression (SVR)	4.784	1.868	0.685	3.946	2.091	0.664
Random Forests (RF)	2.008	1.252	0.949	3.417	2.269	0.581



Hình 3-26. Hệ số tương quan (r) giữa EC đo đạc và EC tính toán sử dụng tập dữ liệu huấn luyện (training dataset)

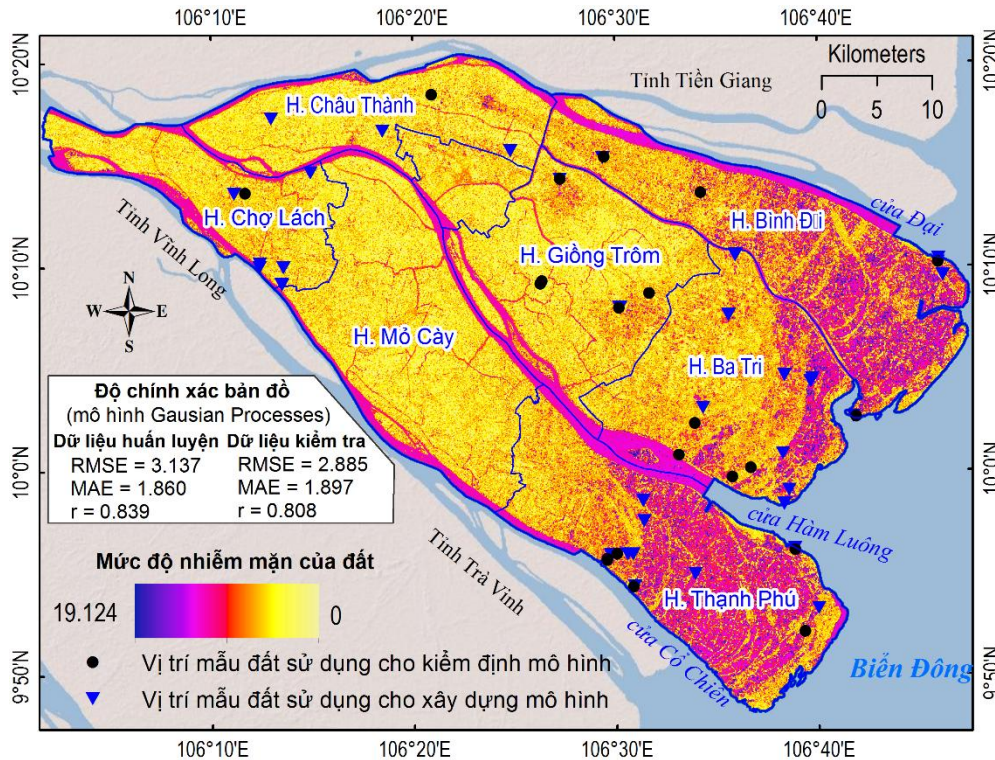


Hình 3-27. Hệ số tương quan (r) giữa EC đo đạc và EC tính toán sử dụng tập dữ liệu kiểm định (validation dataset)

3.2.3.2. Ứng dụng thành lập bản đồ độ mặn đất

Dựa vào các kết quả phân tích trên, có thể kết luận rằng mô hình Gaussian Processes (GP) là tốt nhất cho lập bản đồ độ mặn của đất trong khu vực nghiên cứu. GP có hệ số tương quan cao thứ 2 trong nhóm mô hình phát triển dựa trên tập dữ liệu mẫu

training dataset, và đứng thứ nhất khi kiểm định mô hình. Mô hình RF phát triển tuy có hệ số tương quan cao, nhưng khi kiểm định độ chính xác, kết quả lại thấp nhất trong 5 phương pháp. Do vậy, mô hình GP đã được sử dụng để ước tính giá trị độ mặn (EC) của đất cho từng pixel ảnh Sentinel-1 trên địa bàn tỉnh Bến Tre.



Hình 3-28. Bản đồ độ mặn đất tỉnh Bến Tre sử dụng mô hình Gaussian Processes (GP)

Bản đồ ước tính độ mặn trên đất cho thấy các khu vực tại ba huyện ven biển là Bình Đại, Ba Tri và Thạnh Phú có độ mặn cao. Điều này là do ba huyện nằm gần biển nơi nước mặn dễ có điều kiện xâm nhập vào đất liền khi triều cường dâng cao, nước biển đi sâu vào nội địa qua các cửa sông Đại, sông Hàm Lương và sông Cổ Chiên. Quan trọng hơn, đây cũng là 3 huyện có diện tích đất làm muối và nuôi trồng thủy sản lớn nhất của tỉnh Bến Tre. Việc lấy nước mặn vào để nuôi tôm gây nên những ảnh hưởng nhất định tới sự mặn hóa của đất, đặc biệt ở nhóm đất lợ, thường xuyên (hàng năm) sử dụng hình thức canh tác 1 vụ tôm, 1 vụ lúa. Ở chiều ngược lại, các khu vực tại huyện Châu Thành, huyện Chợ Lách và huyện Mỏ Cày đất không mặn (có giá trị EC ước tính ~ 0) do đặc điểm vị trí địa lý, nằm cách xa biển, loại hình canh tác nông nghiệp chủ yếu là trồng cây ăn quả.

3.3. Nghiên cứu ứng dụng đánh giá và phân vùng nhiễm mặn bằng tư liệu viễn thám quang học - thí điểm ở Bến Tre.

3.3.1. Dữ liệu ảnh viễn thám quang học trong nghiên cứu nhiễm mặn

Có nhiều loại tư liệu viễn thám quang học có thể sử dụng trong nghiên cứu đánh giá xâm nhập mặn. Việc lựa chọn tư liệu sử dụng cần cân nhắc đến số lượng kênh phổ, độ phân giải phổ, độ phân giải không gian, độ phủ trùm, phân giải thời gian (tần suất chụp lặp lại), tính đồng bộ và khả năng ứng dụng trong nghiên cứu đa thời gian. Dữ liệu sử dụng trong luận án bao gồm ảnh đa phổ Sentinel-2, ảnh LANDSAT5, 7, 8 và 9. Đây là nguồn dữ liệu ảnh được sử dụng miễn phí có độ phân giải không gian từ trung bình (Landsat: 30m) đến cao (Sentinel-2: 10m) cho nghiên cứu toàn tỉnh Bến Tre.

Ảnh Sentinel-2 là có độ phân giải không gian của các kênh ảnh trong dải sóng nhìn thấy (VIS) và cận hồng ngoại (NIR) là 10x10m, vùng hồng ngoại sóng ngắn (SWIR) là 20x20m, và hồng ngoại nhiệt (TIRS) là 100x100m. Ảnh được sự quản lý của Cơ quan hàng không vũ trụ Châu Âu (ESA), có thiết kế đồng bộ quỹ đạo mặt trời, ở độ cao 786km, độ phủ trùm 290km/cảnh với chu kỳ chụp 5 ngày/cảnh trên cùng 1 khu vực. Ảnh LANDSAT 7 hoạt động trên quỹ đạo từ tháng 4/1999, LANDSAT 8 từ tháng 2/2013, LANDSAT 9 từ tháng 9/2021 của Cơ quan hàng không vũ trụ Mỹ (NASA) có quỹ đạo đồng bộ mặt trời, ở độ cao 705km, độ phủ trùm 185km/cảnh, chu kỳ chụp 16 ngày tại cùng 1 khu vực. Các kênh ảnh chụp trong dải sóng nhìn thấy đến hồng ngoại sóng ngắn có độ phân giải không gian 30x30m.

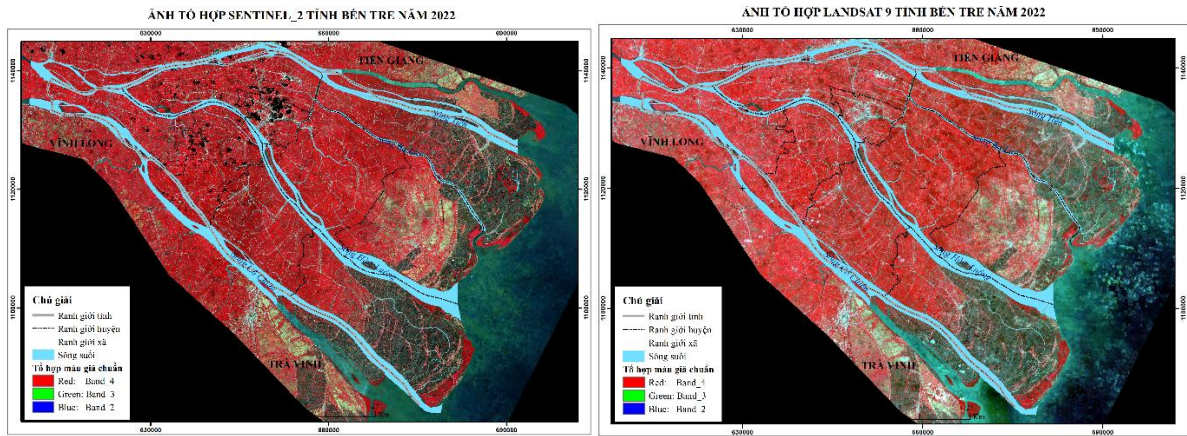
Bảng 3-5. Các tham số của ảnh Sentinel-2 và LANDSAT

Kênh phổ	Bước sóng (nm)				Độ phân giải không gian (m)			
	Sentinel-2	LANDSAT9	LANDSAT8	LANDSAT7	Sentinel-2	LANDSAT9	LANDSAT8	LANDSAT7
Ultra Blue (coastal/aerosol)	0.44	0.435 - 0.451	0.43 - 0.45		60	30	30	30
B1 Blue	0.49	0.452–0.512	0.45 - 0.51	0.45 - 0.52	10	30	30	30
B2 Green	0.56	0.533–0.590	0.53 - 0.59	0.52 - 0.60	10	30	30	30

B3	Red	0.66	0.636– 0.673	0.63 - 0.67	0.63 - 0.69	10	30	30	30
B4	Near Infrared (NIR)	0.83	0.851– 0.879	0.85 - 0.87	0.76 - 0.90	10	30	30	30
B5	Shortwave Infrared (SWIR)1	1.613	1.566– 1.651	1.56 - 1.65	1.55 - 1.75	20	30	30	30
B6	Shortwave Infrared (SWIR)2	2.202	2.107– 2.294	2.10 - 2.29	2.08 - 2.35	20	30	30	30
	Panchromatic		0.503– 0.676	0.50 - 0.67	0.5-0.9		15	15	
	Cirrus		1.363– 1.384	1.36 - 1.38			30	30	
	Thermal Infrared (TIRS) 1		10.60– 11.19	10.6 - 11.2	10.40- 12.50			100	120
	Thermal Infrared (TIRS) 2		11.50– 12.51	11.5 - 12.5				100	

Bến Tre là tỉnh giáp biển, hiện tượng xâm nhập mặn diễn ra mạnh nhất vào thời điểm mùa khô, nên để phân vùng được xâm nhập mặn chính xác thì nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh cũng được thu thập vào khoảng thời gian này. Do vị trí địa lý đặc thù của khu vực nghiên cứu là giáp biển nên ảnh vệ tinh quang học ở khu vực này thường bị ảnh hưởng bởi mây che phủ, việc lựa chọn 1 cảnh ảnh không bị ảnh hưởng bởi mây là rất hiếm, nên cần phải tổng hợp rất nhiều các cảnh ảnh tại nhiều thời điểm khác nhau trong mùa khô (từ tháng 3- tháng 5), ảnh này được gọi là ảnh tổ hợp mùa khô. Để giám sát và theo dõi, phân vùng xâm nhập mặn của toàn tỉnh theo thời gian, thì các ảnh Landsat mùa khô theo các thời điểm được thu thập như sau: 2005, 2010, 2015, 2018, 2020 và 2022. Dữ liệu ảnh đa phổ Sentinel-2 tuy có độ phân giải không gian cao (10m) nhưng chỉ có sẵn từ năm 2018-2022 (trước đó dữ liệu vệ tinh chưa sẵn sàng). Bên cạnh đó, mặc dù ảnh Sentinel_2 có chu kỳ chụp lặp ngắn hơn so với ảnh Landsat, số lượng cảnh ảnh lớn hơn nhiều nhưng ảnh lại bị bao phủ mây rất lớn, do đó không phù hợp cho nghiên cứu

toàn tỉnh Bến Tre. Do đó, ảnh tổ hợp mùa khô Sentinel_2 được sử dụng trong nghiên cứu xâm nhập mặn của vùng diện tích đất trồng lúa của tỉnh Bến Tre.

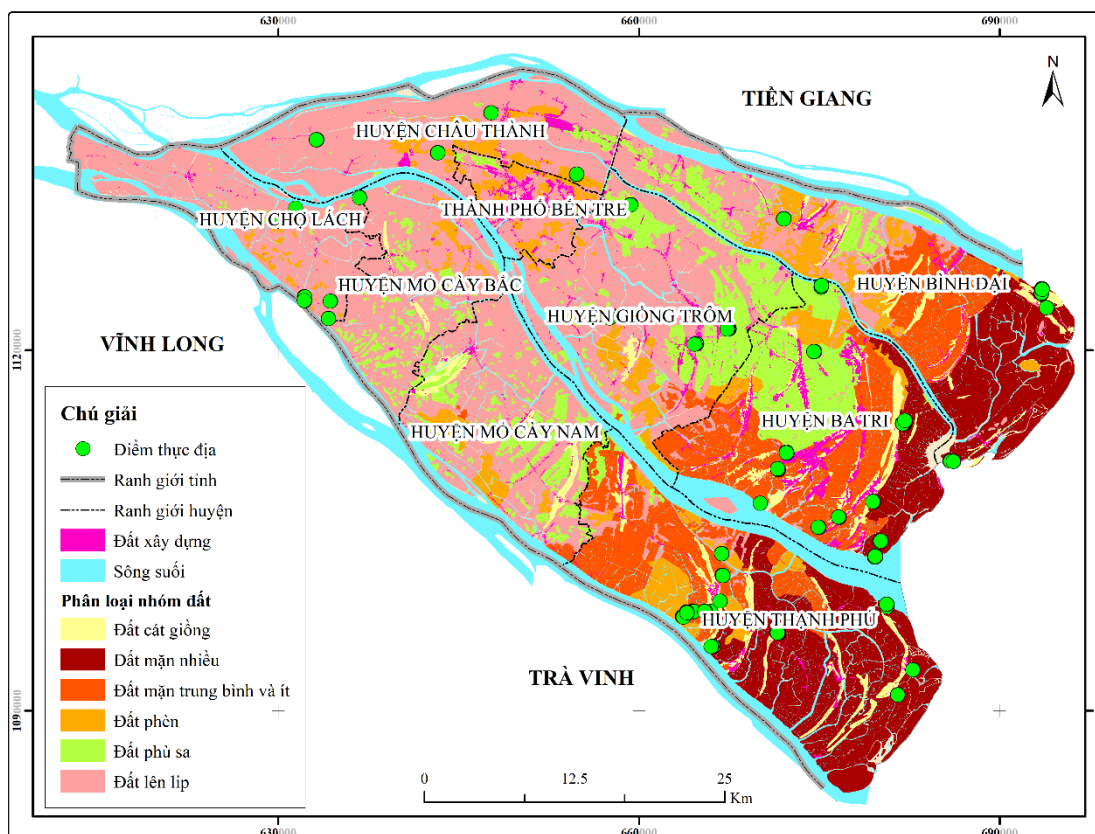


Hình 3-29. Ảnh tổ hợp màu khu vực nghiên cứu năm 2022

Chi tiết số lượng các cảnh ảnh thu thập và xử lý được trình bày ở phần phụ lục 7. Dữ liệu ảnh vệ tinh sau khi thu thập được tiền xử lý ảnh bao gồm: hiệu chỉnh bức xạ, hiệu chỉnh khí quyển, chuyển ảnh thành ảnh phản xạ mặt đất. Với ảnh Sentinel2, NCS thực hiện hiệu chỉnh ảnh trên phần mềm mã nguồn mở SNAP, còn ảnh LANDSAT được hiệu chỉnh bằng phần mềm mã nguồn mở QGIS.

3.3.2. Xử lý và đồng bộ dữ liệu thực địa

Để thu thập dữ liệu độ mặn và giá trị độ dẫn điện ngoài môi trường thực tế, NCS đã sử dụng hai phương pháp: máy đo trực tiếp EC ngoài thực địa EM31-Mk2 và phân tích mẫu đất trong phòng. Trong đó, dữ liệu EC đo trực tiếp được dùng để phân tích và đánh giá hồi quy, còn dữ liệu EC trong phòng được dùng để kiểm chứng và đánh giá độ chính xác. Dữ liệu đo đạc mặt đất này được thu thập trong khoảng thời gian từ 02/04/2018-10/04/2018, và phân bố đều trên tất cả các loại hình sử dụng đất khác nhau trên toàn tỉnh Bến Tre. Đây là thời điểm mùa khô, diện tích trồng lúa đã được gặt và là thời điểm nước mặn có thể đi sâu vào trong đất liền. Ngoài giá trị EC, tổng lượng muối hòa tan, PH của đất, và thành phần cơ giới của các mẫu đất cũng được phân tích, đo đạc.



Hình 3-30. Bản đồ vị trí các điểm thực địa tỉnh Bến Tre năm 2018

Dữ liệu EC ngoài thực địa được đo trực tiếp bằng thiết bị đo cảm ứng điện từ EM31-Mk2 với thời gian ghi nhận 2 giây một lần, tương ứng với 1 số liệu được thu thập. Số liệu này được xử lý và chuẩn hóa trong phần mềm chuyên dụng tham chiếu với kết quả phân tích mẫu đất để xác định kết quả đo EC cho lớp đất mặt, đơn vị là dS/m. Dựa trên diện tích và tuyến điểm khảo sát đo được có tọa độ GPS đã được tích hợp sẵn, giá trị EC sẽ được tính toán để gán cho mỗi đơn vị điểm ảnh (pixel) tương ứng với độ phân giải không gian 10x10m của ảnh Sentinel-2 và 30x30m của ảnh LANDSAT. Kết quả với ảnh LANDSAT thu được tổng số 556 điểm mẫu pixel đo EC trên với các loại lớp phủ sử dụng đất khác nhau, và với Sentinel-2 là 1649 điểm.

Bảng 3-6. Giá trị EC tổng quát hóa theo các loại lớp phủ trên ảnh Sentinel-2

Loại lớp phủ	Số điểm	EC trung bình	Cấp độ mặn
Đất làm muối	54	19,6178	Mặn nặng
Rừng ngập mặn	13	17,7692	Mặn nặng
Bãi bồi (đất cát ven biển)	202	12,1565	Mặn vừa
Nuôi trồng thủy hải sản	6	12,2965	Mặn vừa
Đất lúa tôm	115	11,8372	Mặn vừa
Đất lúa 1 vụ	132	9,6015	Mặn vừa
Đất lúa 2 vụ	276	8,0172	Mặn vừa

Đất lúa 3 vụ	307	7,5836	Mặn nhẹ
Hoa màu	211	3,8589	Không mặn
Đất trồng cây lâu năm/ăn trái	333	3,5466	Không mặn

Bảng 3-7. Giá trị EC tổng quát hóa theo các loại lớp phủ trên ảnh LANDSAT

Loại lớp phủ	Số điểm	EC trung bình	Cấp độ mặn
Đất làm muối	18	19,3739	Mặn nặng
Rừng ngập mặn	7	17,8200	Mặn nặng
Bãi bồi (đất cát ven biển)	67	12,7965	Mặn vừa
Nuôi trồng thủy hải sản	1	12,0464	Mặn vừa
Đất lúa tôm	47	11,8714	Mặn vừa
Đất lúa 1 vụ	49	9,0753	Mặn vừa
Đất lúa 2 vụ	103	8,1309	Mặn vừa
Đất lúa 3 vụ	96	7,5258	Mặn nhẹ
Hoa màu	77	3,8513	Không mặn
Đất trồng cây lâu năm/ăn trái	91	3,4208	Không mặn

Theo kết quả phân tích thống kê, giá trị EC trung bình giảm dần từ ngoài biển vào trong đất liền. Trong đó, giá trị EC cao nhất thuộc khu vực đất làm muối, thấp nhất là đất trồng cây lâu năm/cây ăn trái và hoa màu tương ứng với nhóm đất phù sa và đất lên líp trên bản đồ thổ nhưỡng.

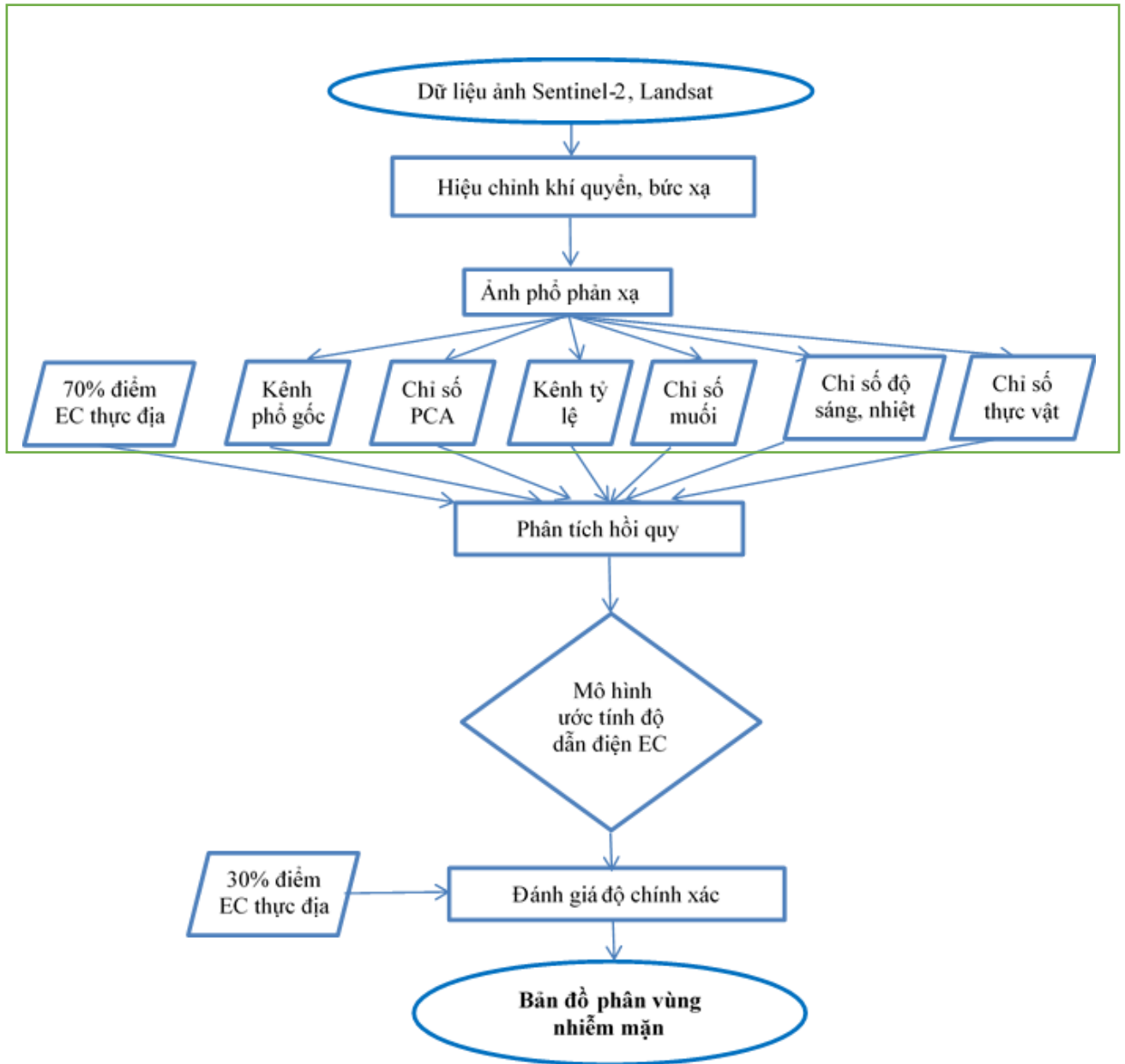
3.3.3. Quy trình tích hợp dữ liệu và phân vùng nhiễm mặn

Quy trình tiếp cận nghiên cứu đánh giá xâm nhập mặn trên đất được mô tả trong sơ đồ dưới đây. Dữ liệu ảnh vệ tinh và kết quả đo EC mặt đất là nguồn dữ liệu đầu vào chính của mô hình. Các ảnh vệ tinh được thu thập và tiền xử lý bằng công cụ GoogleEarthEngine (GEE) với các tham số: ranh giới tỉnh Bến Tre, lọc mây <50%, theo thời gian mùa khô: t3-t5. Ảnh cuối cùng là ảnh tổ hợp theo mùa khô của từng thời điểm. Ảnh tổ hợp này sau đó được tạo mặt nạ (masking) hệ thống sông ngòi và dân cư để loại bỏ hai nhóm này trong bước tính toán phân tích các chỉ số vật lý của ảnh.

Từ ảnh phổ phản xạ, các chỉ số vật lý được tính toán và chia thành các nhóm: phổ góc, PCA, tỷ lệ, muối, thực vật, độ sáng và nhiệt (chỉ trên LANDSAT).

Quá trình thu thập, tiền xử lý ảnh, tạo ảnh tổ hợp và tính toán các kênh chỉ số vật lý của ảnh Sentinel_2 và ảnh Landsat được thực hiện trên công cụ GoogleEarthEngine (GEE). Đây là một nền tảng đám mây để truy cập và xử lý liền mạch số lượng lớn ảnh

vệ tinh và ảnh trên không có sẵn miễn phí như ảnh Landsat-8, Sentinel, MODIS... Người dùng có thể truy cập và phân tích dữ liệu từ danh mục công cộng cũng như dữ liệu riêng tư. Google Earth Engine làm việc thông qua Giao Diện Trực tuyến của Ứng Dụng JavaScript (API) được gọi là Code Editor: <https://code.earthengine.google.com/>.



Hình 3-31. Quy trình phân vùng nhiễm mặn từ dữ liệu viễn thám và thực địa

Nguồn dữ liệu ảnh trên nền tảng GEE được sử dụng trong luận án bao gồm ảnh Sentinel 2 có mã ImageCollection ID là COPERNICUS/S2, và ảnh Landsat có mã là LANDSAT/LC09, LC08 & LE7. Thuật toán trung vị (median) được sử dụng để tạo ra ảnh tổ hợp đa phổ đa thời gian (thời gian mùa khô: tháng 3-tháng 5), không bị mây che

phủ, lưu giữ được giá trị phản xạ phổ đặc trưng của các đối tượng trên ảnh. Ảnh tổ hợp này có đặc tính ổn định theo mùa, cho phép so sánh, phân tích biến động theo mùa giữa các năm khác nhau.

Các nhóm kênh chỉ số vật lý tính từ ảnh tổ hợp là biến độc lập và giá trị EC thực địa (70% tổng số điểm) sẽ là biến phụ thuộc trong mô hình phân tích hồi quy. Nghiên cứu thử nghiệm với các nhóm kênh, chỉ số ảnh khác nhau để xác định giải pháp tối ưu. Kết quả mô hình được so sánh với 30% tổng số điểm thực địa còn lại để kiểm chứng độ tin cậy của mô hình.

3.3.3.1. Các chỉ số viễn thám trong nghiên cứu xâm nhập mặn tại Bến Tre

Tùy thuộc vào loại dữ liệu ảnh vệ tinh khác nhau mà các chỉ số vật lý được ứng dụng khác nhau. Luận án hướng tới sử dụng hai loại tư liệu vệ tinh quang học phổ biến, phù hợp cho nghiên cứu cấp tỉnh là LANDSAT và Sentinel-2. Dữ liệu Sentinel-2 có ưu thế về độ phân giải trong khi LANDSAT lại có chuỗi thời gian chụp ảnh quan sát Trái đất dài, hỗ trợ cho nghiên cứu đánh giá đa thời gian.

Trong bài toán phân vùng xâm nhập mặn của tỉnh Bến Tre, NCS chia các chỉ số vật lý thành 5 nhóm bao gồm: nhóm kênh phổ gốc, nhóm chỉ số phân tích thành phần chính PCA, nhóm chỉ số độ sáng, nhóm chỉ số thực vật, chỉ số muối/độ mặn và chỉ số tỷ lệ. Riêng chỉ số nhiệt được tính cho ảnh LANDSAT8 và LANDSATTM.

Bảng 3-8. Các kênh chỉ số sử dụng trong nghiên cứu tại Bến Tre

Nhóm chỉ số	Công thức	Các loại ảnh		
		Sentinel-2	LANDSAT8	LANDSATTM
Kênh phổ gốc	Các kênh phổ gốc	4 kênh (B, G, R, NIR)	6 kênh	6 kênh
Chỉ số PCA	Các kênh chỉ số PCA	4 kênh PCA	6 kênh	6 kênh
Chỉ số độ sáng	$BI = \sqrt{G^2 + NIR^2}$	x	x	x
	$BI2 = \sqrt{R^2 + NIR^2}$	x	x	x
	$INT = \frac{G + R}{2}$		x	x

Chỉ số nhiệt			X	X
Chỉ số thực vật	$NDVI = \frac{(NIR-R)}{(NIR+R)}$	X	X	X
	$SAVI = (1+L) \frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)}$	X	X	X
	$EVI = G \frac{(NIR-R)}{(NIR+C_1R-C_2B+L)}$	X	X	X
	$GDVI = \frac{(NIR^n - R^n)}{(NIR^n + R^n)}$	X	X	X
Chỉ số muối	$SI1 = \sqrt{G * R}$	X		
	$SI2 = \sqrt{G^2 + R^2 + NIR^2}$	X		
	$SI3 = \sqrt{G^2 + R^2}$	X		
	$SI4 = \sqrt{\frac{(NIR * R) - (G * B)}{(NIR * R) + (G * B)}}$	X	X	X
	$SI5 = \frac{(R - NIR)}{(R + NIR)}$	X	X	X
	$SI6 = \sqrt{R * NIR}$	X	X	X
Chỉ số tỷ lệ	B/G	X	X	X
	B/NIR	X	X	X
	B/R	X	X	X
	B/SWIR1		X	X
	B/SWIR2		X	X
	G/R	X	X	X
	G/NIR	X	X	X
	G/SWIR1		X	X
	G/SWIR2		X	X
	R/NIR	X	X	X
	R/SWIR1		X	X

	R/SWIR2		x	x
	NIR/SWIR1		x	x
	NIR/SWIR2		x	x
	SWIR1/SWIR2		x	x

3.3.3.2. Mô hình phân tích hồi quy đa biến

Các kênh chỉ số vật lý sau khi tính toán được chiết xuất theo dữ liệu điểm đo EC sẽ là biến đầu vào cho các mô hình phân tích hồi quy. Trong đó, dữ liệu EC là biến phụ thuộc, còn các kênh chỉ số là các biến độc lập. Các tiêu chí để đánh giá hồi quy bao gồm hệ số sig (P-value), hệ số tương quan Pearson (r) và hệ số xác định R^2 , hệ số xác định hiệu chỉnh R^2_{adj} . Trong đó:

- Sig (P-value) cung cấp mức độ chắc chắn của giả thuyết đưa ra, là điều kiện để các biến được đưa vào các mô hình nghiên cứu.
- Hệ số tương quan Pearson (r) đo lường mức độ tương quan tuyến tính giữa hai biến. Hệ số r có giá trị từ -1 đến 1. Điều kiện để tương quan có ý nghĩa là giá trị sig < 0.05.
 - $r < 0$ cho biết một sự tương quan nghịch giữa hai biến, nghĩa là nếu giá trị của biến này tăng thì sẽ làm giảm giá trị của biến kia.
 - $r = 0$ cho thấy không có sự tương quan.
 - $r > 0$ cho biết một sự tương quan thuận giữa hai biến, nghĩa là nếu giá trị của biến này tăng thì sẽ làm tăng giá trị của biến kia.

Hệ số xác định R^2 và hệ số xác định hiệu chỉnh R^2_{adj} thể hiện mức độ phù hợp của mô hình với tập dữ liệu, có giá trị từ 0-1. Hay nói cách khác, tham số này cho biết mức độ biến thiên (%) của biến phụ thuộc được giải thích bởi biến độc lập.

Loại bỏ các biến có giá trị sig > 0,05 và hệ số tương quan $r \approx 0$. Hệ số R^2 và R^2_{adj} dao động từ 0 đến 1, càng gần tới 1 thì mô hình càng phù hợp với bộ dữ liệu, thông thường $R^2 > 0,5$ thì mô hình có tính phù hợp và có thể được áp dụng (theo Allen, 1997 [84]).

Để ước tính độ mặn trong đất trong mối tương quan với lớp phủ thực vật, nhiều nghiên cứu đã xây dựng mối quan hệ hồi quy khác nhau giữa giá trị EC đo đạc với các nhóm chỉ số lần lượt theo ba nhóm dữ liệu: từng kênh chỉ số riêng biệt, nhóm theo tiêu

chỉ NDVI $<0,35$ (đất trống) và NDVI $>0,35$ (đất có thực vật), và nhóm dữ liệu theo kênh tỷ lệ NIR/SWIR1 của ảnh LANDSAT (Mehdi Rahmati [2]). Bên cạnh đó, để chia tách vùng thực vật và không thực vật, có tác giả đã sử dụng ngưỡng của chỉ số NDVI 0,2 là vùng có thực vật và NDVI $<0,2$ là vùng không có thực vật (Wu 2014 [33]), hoặc sử dụng ngưỡng NDVI $<0,13$ để tách riêng vùng đất trống và theo dõi diễn biến độ mặn ở vùng đất trống này (Fan 2016 [85]). Những nghiên cứu này cho thấy ở mỗi khu vực nghiên cứu khác nhau, tùy đặc điểm lớp phủ và tư liệu ảnh sử dụng, ngưỡng giá trị áp dụng cho các chỉ số tính từ ảnh vệ tinh có thể được áp dụng khác nhau để phản ánh được đặc điểm khu vực nghiên cứu.

Trong nghiên cứu này, NCS thực hiện phân tích hồi quy theo phương pháp Stepwise nhằm tìm ra mô hình ước tính EC có độ tương quan cao nhất. Trong đó, bước đầu tiên là tính hồi quy đơn biến giữa giá trị EC với tất cả các chỉ số bao gồm các kênh phổ gốc, các kênh tỷ lệ, các kênh phân tích PCA, nhóm chỉ số thực vật và nhóm chỉ số muối. Phân tích tương quan Pearson được áp dụng trong bước này để tìm hiểu mối tương quan giữa EC với các kênh chỉ số. Các mô hình hồi quy bao gồm tuyến tính, ln() và đa thức bậc hai được thực hiện ở mức độ tin cậy 95%. Các biến có tương quan thấp có thể được loại bỏ, không sử dụng cho những bước tính tương quan tiếp theo. Nói cách khác là giảm bớt số lượng biến đầu vào ít ý nghĩa, có thể gây “nhiều” cho mô hình phân tích hồi quy tổng thể. Các biến bị loại bỏ là các biến có hệ số sig $>0,05$ và $r \approx 0$ tương quan thấp, có khả năng và làm ảnh hưởng đến độ chính xác của mô hình.

Tiếp theo, phép phân tích hồi quy đa biến theo từng nhóm chỉ số riêng biệt được thực hiện nhằm tìm ra mô hình ước tính EC tốt nhất theo từng nhóm chỉ số (chỉ số muối/độ mặn, chỉ số thực vật, độ sáng, kênh phổ, thành phần chính PCA). Để đảm bảo khai thác đầy đủ thông tin về phổ và các chỉ số phù hợp trong nghiên cứu xâm nhập mặn, NCS thực hiện phân tích hồi quy đa biến với tất cả các chỉ số đã được lựa chọn có tương quan cao và tìm ra được mô hình hồi quy phù hợp. Mô hình hồi quy đa biến của nhóm chỉ số nào thể hiện tốt đặc trưng phân bố đất mặn với hệ số tương quan r và hệ số hồi quy R^2 cao sẽ được lựa chọn.

Số liệu đo EC tại mỗi khu khảo sát thực địa được gán tọa độ và liên kết với các pixel (điểm ảnh) tương ứng trên ảnh vệ tinh và các ảnh chỉ số. Dữ liệu điểm để đưa vào trong các mô hình tính toán được phân chia làm 2 phần theo tỷ lệ 70/30. Trong đó, 70%

điểm được dùng để phân tích thành lập mô hình tương quan, 30% dữ liệu còn lại để dùng đánh giá độ chính xác của mô hình. Các điểm có giá trị EC thực địa được gán với các điểm ảnh Sentinel-2, độ phân giải 10x10m, tổng cộng 1649 điểm, trong đó có 1154 điểm dùng cho tính toán và 495 điểm để đánh giá độ chính xác. Với ảnh LANDSAT, phân giải 30x30m, tổng số điểm phân tích tương quan EC là 556 điểm, trong đó 389 điểm dùng tính toán và 167 điểm để đánh giá độ chính xác.

Độ chính xác của bản đồ phân vùng xâm nhập mặn cũng được thực hiện bằng phân tích hồi quy tuyến tính ở mức độ tin cậy 95% giữa EC tính toán được với 30% dữ liệu điểm EC thực địa. Điều này nhằm đảm bảo EC tính toán được có độ chính xác không chỉ ở trên một tập dữ liệu cụ thể mà còn mang lại kết quả chính xác trên các tập dữ liệu khác. Hai tiêu chí định lượng để đánh giá độ chính xác của mô hình là R^2 biểu thị cường độ của mối quan hệ tuyến tính giữa EC đo đạc ngoài thực địa và EC tính toán; và sai số toàn phương trung bình RMSE để đo lường sai số giữa hai bộ dữ liệu [86]. Giá trị RMSE càng nhỏ thì có nghĩa EC tính toán càng gần với EC đo được ngoài thực địa và ngược lại.

Bảng 3-9. Số điểm dùng để phân tích hồi quy

Loại lớp phủ	Với ảnh LANDSAT		Với ảnh Seninel-2	
	Tổng	Số điểm phân tích	Tổng	Số điểm phân tích
Đất làm muối	18	12	54	38
Rừng ngập mặn	7	5	13	9
Nuôi trồng thủy hải sản	1	1	6	4
Đất lúa tôm	47	33	115	81
Đất lúa 3 vụ	96	67	307	215
Đất lúa 2 vụ	103	72	276	193
Đất lúa 1 vụ	49	34	132	92
Hoa màu	77	54	211	148
Đất trồng cây lâu năm	91	64	333	233
Bãi bồi (bãi cát)	67	47	202	141
Tổng	556	389	1649	1154

3.3.4. Ứng dụng đánh giá phân vùng nhiễm mặn bằng ảnh Sentinel-2 khu vực Bến Tre

Các mô hình hồi quy khác nhau được xây dựng giữa giá trị EC đo đạc với các kênh chỉ số khác nhau. Bước đầu tiên trong phân tích hồi quy là đánh giá mối quan hệ đơn biến của từng biến chỉ số với giá trị EC thông qua các hàm thống kê cơ bản: hàm tuyến tính, hàm ln() và hàm đa thức bậc 2.

Như đã trình bày ở trên, với nguồn dữ liệu ảnh Sentinel-2, luận án tập trung nghiên cứu phân tích hiện tượng xâm nhập mặn cho khu vực đất trồng lúa của tỉnh Bến Tre. Vào thời điểm tháng 3-tháng 5 là thời điểm lúa vụ Đông Xuân vừa gặt, nên đất lúa đã gặt được tạm thời gọi là đất lúa trống, trên ảnh viễn thám cũng hiển thị rõ đất lúa trống, và do đó việc đánh giá hiện tượng xâm nhập mặn vào đất lúa trở nên dễ dàng hơn hơn các thời điểm có cây lúa, ít bị ảnh hưởng bởi phản xạ của thực vật và nước. Dữ liệu EC đo ngoài thực địa trên các vùng đất lúa khác nhau và ảnh Sentinel-2 dùng để đánh giá tương quan được lựa chọn có cùng thời điểm là năm 2018. Trong đó, số điểm dữ liệu EC đầu vào dùng để phân tích là 830 điểm. Với các biến chỉ số có sig >0.05 cho thấy biến đó không có ý nghĩa trong mô hình và $r \approx 0$ chỉ ra hai biến gần như không có sự tương quan tuyến tính, do đó biến độc lập này sẽ bị loại bỏ khỏi quá trình tính toán trong các bước tiếp theo. Trong đó, cụ thể bao gồm các biến PCA4 ($r = 0,013$, sig=0,657), SI6 ($r = -0,020$, sig=0,508) bị loại bỏ.

Bảng 3-10. Số lượng điểm thực địa trên đất trồng lúa

Loại lớp phủ	Số điểm	EC trung bình	Cấp độ mặn
Đất lúa tôm	115	11,8372	Mặn vừa
Đất lúa 1 vụ	132	9,6015	Mặn vừa
Đất lúa 2 vụ	276	8,0172	Mặn vừa
Đất lúa 3 vụ	307	7,5836	Mặn nhẹ

Bảng 3-11. Hệ số tương quan giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Sentinel-2

Chỉ số	Kênh phổ	r	sig	Hệ số xác định R ²		
				Hàm tuyến tính	Hàm ln()	Hàm đa thức bậc 2
	B1	-0,312	0	0,098	0,092	0,109

Kênh phổ	B2	-0,076	0	0,006	0,014	0,089
	B3	0,322	0	0,103	0,093	0,111
	B4	-0,452	0	0,204	0,231	0,246
PCA	PCA1	-0,144	0	0,021		0,024
	PCA2	0,479	0	0,230		0,256
	PCA3	-0,498	0	0,248		0,249
	PCA4	0,013	0,657	0,000		0,033
Chỉ số độ sáng	BI	-0,309	0	0,095	0,102	0,101
	BI2	-0,251	0	0,063	0,089	0,147
Chỉ số thực vật	EVI	-0,647	0	0,418		0,477
	GDVI	0,162	0	0,026		0,061
	NDVI	-0,614	0	0,377		0,485
	SAVI	-0,611	0	0,373		0,498
Chỉ số muối	SI1	0,165	0	0,027	0,016	0,092
	SI2	-0,242	0	0,059	0,084	0,159
	SI3	0,222	0	0,049	0,033	0,114
	SI4	0,269	0	0,072	0,087	0,151
	SI5	0,616	0	0,377		0,485
	SI6	-0,020	0,508	0,000	0,005	0,102
Kênh tỷ số	R/NIR	0,652	0	0,425	0,356	0,488
	B/G	-0,425	0	0,181	0,164	0,252
	B/NIR	0,120	0	0,014	0,016	0,019
	B/R	-0,499	0	0,249	0,257	0,262
	G/NIR	0,439	0	0,193	0,152	0,270
	G/R	-0,484	0	0,234	0,235	0,238

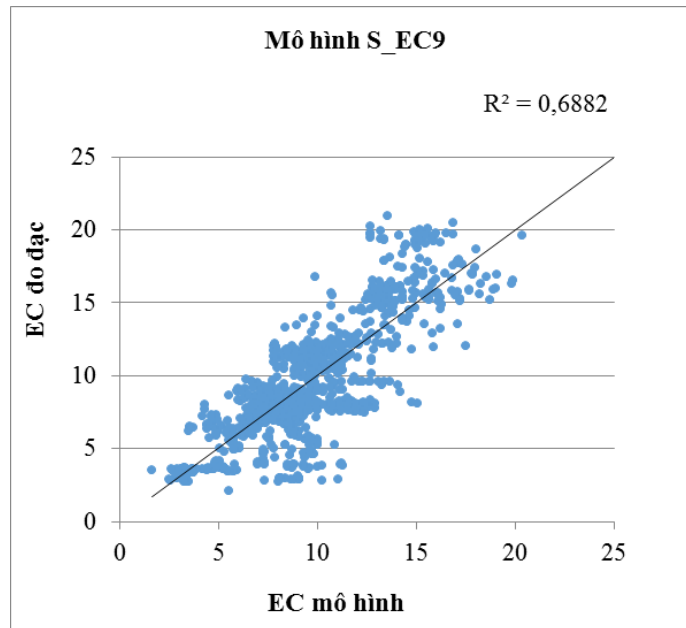
Từ bảng kết quả thống kê ở trên cho thấy tương quan giữa các kênh phổ gốc của ảnh Sentinel-2 và EC đo đạc là không cao. Tương tự như vậy là các kênh chỉ số độ sáng và PCA có $r < 0.4$. Cũng trong bảng này, khi áp dụng các hàm hồi quy khác nhau thì hệ số xác định của các mô hình được cải thiện hơn. Trong đó, đáng kể nhất là mối quan hệ với kênh tỷ lệ R/NIR ($R^2 = 0.488$), chỉ số thực vật EVI ($R^2 = 0.477$) và chỉ số muối SI5 ($R^2 = 0.485$). Các chỉ số thực vật luôn có mối tương quan nghịch với độ dẫn điện EC, hay nói cách khác khi giá trị EC càng cao thì giá trị sinh trưởng thực vật càng thấp.

Tỷ số kênh R/NIR có tương quan cao nhất với EC thực địa. Điều cho thấy, tỷ số kênh phản xạ giữa R và NIR của ảnh Sentinel-2 có độ nhạy cao với độ mặn so với các kênh phổ khác. Với hàm đa thức bậc 2 thì mối quan hệ này thể hiện rõ hơn $R^2 = 0.488$ ($Y = 25,905 R/NIR^2 - 18,094 R/NIR + 9,7243$). Tuy nhiên, đây là hàm thống kê đơn giản

và mối tương quan này chưa đủ để có thể áp dụng ước tính được độ mặn toàn diện tích đất trồng lúa của tỉnh. Do vậy, phân tích hồi quy đa biến với tất cả các lớp dữ liệu đầu vào và từng nhóm kênh chỉ số được sử dụng trong bước tiếp theo để cải thiện mức độ tương quan.

Bảng 3-12. Mô hình hồi quy đa biến giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Sentinel-2

Nhóm dữ liệu	Mô hình	r	R²	R²_{adj}	F-Static	DF
Kênh phổ	$S_{EC1} = 17,646 - 48,068B4 - 183,068B1 + 202,223B2$	0,719	0,517	0,515	307.125	3:1153
PCA	$S_{EC2} = 9,137 + 8,400PCA1 + 26,386PCA2 - 86,629PCA3$	0,589	0,347	0,345	203.440	3:1153
Chỉ số độ sáng	$S_{EC3} = 15,837 - 16,890BI - 6,302BI2$	0,314	0,099	0,097	63.038	2:1153
Chỉ số thực vật	$S_{EC4} = 12,985 - 19,318EVI + 0,014GDVI$	0,650	0,423	0,422	421.784	2:1153
Chỉ số muối	$S_{EC5} = 16,066 + 19,364SI1 + 20,632SI2 - 66,593SI3 + 4,838SI4 + 27,556SI5$	0,665	0,442	0,44	182.218	5:1153
Kênh tỷ số	$S_{EC6} = -59,195 + 25,723R/NIR + 50,225B/G + 71,586G/R - 56,939B/R - 53,401B/NIR + 33,084G/NIR$	0,741	0,549	0,547	233.065	6:1153
Tổng hợp chỉ số	$S_{EC9} = -119,726 + 56,883R/NIR + 250,285NDVI + 17,740EVI - 36,116G/R - 15,471PCA1 + 115,630G/NIR - 174,195SAVI + 42,839SI4 + 14,112BI + 25,299PCA2$	0,830	0,688	0,686	252.316	10:1153

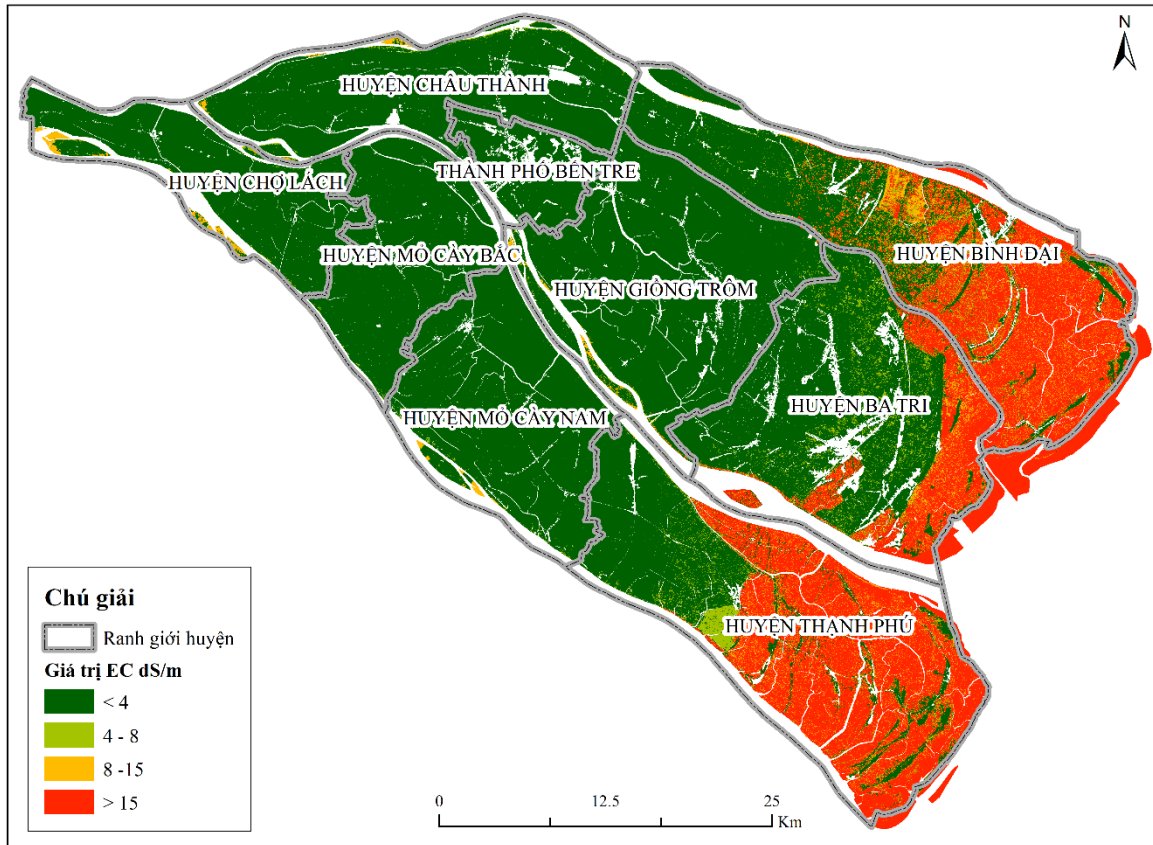


Hình 3-32. Tương quan giữa EC và các mô hình của ảnh Sentinel-2

Kết quả thống kê cho thấy tương quan giữa các kênh ảnh Sentinel-2 và số liệu EC thực địa tăng lên đáng kể $R^2 = 0,517$ so với đánh giá tương quan đơn biến. Hay như với nhóm kênh tỷ số, nhóm chỉ số muối, R^2 cũng tăng lên. Nhóm chỉ số độ sáng tính từ ảnh Sentinel-2 có quan hệ hồi quy thấp nhất. Nổi bật hơn cả là sự tương quan giữa các chỉ số tổng hợp với giá trị EC thực địa thể hiện bằng mô hình S_EC9 với hệ số tương quan cao $r = 0,83$ và hệ số hồi quy $R^2 = 0,688$. Kết quả sử dụng mô hình này để ước tính độ mặn trong đất trên toàn tỉnh Bến Tre được thể hiện trong hình dưới. Đất mặn nhiều phân bố phần lớn ở huyện Bình Đại, Ba Tri và Thạnh Phú.

Chính vì vậy, để ước tính giá trị EC cho toàn tỉnh Bến Tre trên các loại hình hiện trạng lớp phủ khác nhau, NCS đã tiến hành phân tích EC với tất cả các kênh phổ và các kênh chỉ số. Kết quả được thể hiện bằng mô hình S_EC9 với hệ số hồi quy cao $R^2 = 0,688$.

PHÂN BỐ ĐỘ DẪN ĐIỆN EC TỈNH BẾN TRE NĂM 2018 TÍNH TỪ ẢNH SENTINEL-2



Hình 3-33. Sự phân bố của EC tính từ ảnh Sentinel-2 năm 2018

3.3.5. Ứng dụng đánh giá phân vùng nhiễm mặn bằng ảnh LANDSAT khu vực Bến Tre

Với dữ liệu tính từ ảnh LANDSAT, NCS thực hiện các bước tương tự như với ảnh Sentinel-2. Số điểm mẫu thực địa sử dụng để phát triển mô hình là 389 điểm. Kết quả của bước đầu tiên nhằm đánh giá mức độ tương quan của từng biến là các kênh, ảnh chỉ số riêng lẻ được thể hiện trong bảng thống kê. Biến PCA4 ($\text{sig}=0,081$, $r=0,088$) bị loại bỏ trong các tính toán tiếp theo. Nhìn chung, mối tương quan giữa các kênh ảnh và chỉ số tính từ ảnh LANDSAT với giá trị EC thực địa cao hơn so với ảnh Sentinel-2.

Bảng 3-13. Hệ số tương quan giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Landsat8

Nhóm	Chỉ số	r	sig	Hệ số xác định R ²		
				Hàm tuyến tính	Hàm ln()	Hàm đa thức bậc 2
	B1	0,528	0	0,2783		0,2824
	B2	0,516	0	0,2665	0,2299	0,2666

	B3	0,537	0	0,2882	0,2536	0,2882
	B4	-0,411	0	0,1685	0,1648	0,1691
	B5	0,194	0	0,0376	0,0223	0,0658
	B6	0,394	0	0,1556	0,1284	0,1696
	Pca1	-0,619	0	0,3834		0,3939
	Pca2	0,393	0	0,1548		0,1553
	Pca3	0,305	0	0,0928		0,1267
	Pca4	0,088	0,081	0,0078		0,0204
	Pca5	-0,437	0	0,1906		0,1947
	Pca6	0,425	0	0,1803		0,184
Chỉ số độ sáng	Bi	-0,305	0	0,0932	0,0972	0,0964
	Bi2	-0,242	0	0,0587	0,066	0,0749
	Int	0,534	0	0,2851	0,2496	0,2851
Kênh nhiệt	T	0,331	0	0,1099	0,11	0,1099
Chỉ số thực vật	Evi	-0,626	0	0,3916	0,4342	0,4183
	Gdvi	-0,678	0	0,4597	0,4786	0,4739
	Ndvi	-0,650	0	0,423	0,4737	0,4567
	Savi	-0,654	0	0,4283	0,4811	0,4649
Chỉ số muối	Si1	0,535	0	0,2861	0,2488	0,2861
	Si2	-0,148	0,004	0,0218	0,0312	0,0781
	Si3	0,535	0	0,284	0,2501	0,284
	Si4	0,159	0,002	0,0253		0,1962
	Si5	0,650	0	0,423		0,4567
	Si6	0,361	0	0,1304	0,1129	0,1426
Kênh tỷ số	B/G	0,483	0	0,2329		0,2415
	B/NIR	0,637	0	0,4057		0,4057
	B/R	0,365	0	0,1331		0,1503
	B/SWIR1	0,562	0	0,3161		0,3236
	B/SWIR2	0,486	0	0,2357		0,2374
	G/R	-0,391	0	0,153	0,1502	0,1562
	G/NIR	0,697	0	0,4858	0,3969	0,4986

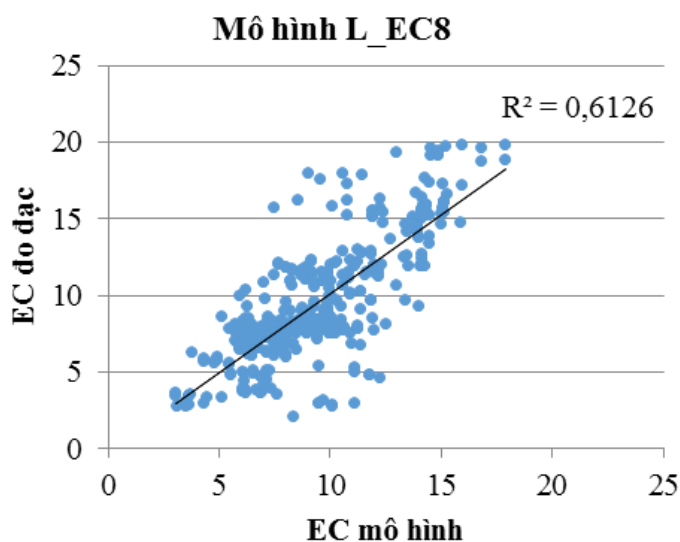
	G/SWIR1	0,573	0	0,3284	0,3069	0,3364
	G/SWIR2	0,344	0	0,1182	0,1059	0,1211
	R/NIR	-0,275	0	0,0754	0,0063	0,1142
	R/SWIR1	0,659	0	0,4337	0,3513	0,4349
	R/SWIR2	0,545	0	0,2967	0,2483	0,297
	NIR/SWIR1	-0,434	0	0,188	0,2182	0,2526
	NIR/SWIR2	-0,483	0	0,2329	0,2989	0,3231
	SWIR1/SWIR2	-0,628	0	0,395	0,4255	0,4578

Với các hàm đơn lẻ, thì hệ số hồi quy xác định của hàm đa thức bậc 2 cũng cho kết quả tốt nhất, tương tự với dữ liệu Sentinel-2. Trong đó, nhóm chỉ số độ sáng và kênh nhiệt có mối tương quan trung bình thấp nhất. Nhóm kênh tỷ lệ và chỉ số thực vật có hệ số cao hơn. Hệ số tương quan r giữa chỉ số tỷ lệ G/NIR với EC là cao nhất: $r = 0,697$, mức độ phù hợp của mô hình này đạt $R^2 = 0,4986$ (hàm đa thức bậc 2). Tiếp đến là chỉ số thực vật GDVI có tương quan nghịch với giá trị EC có hệ số tương quan $r = -0,678$, theo hàm đa thức bậc 2 với $R^2 = 0,4739$. Tuy nhiên, những mối tương quan ban đầu này chỉ là cơ sở để xác định và loại bỏ các biến ít tương quan, có khả năng gây nhiễu (sai số) cho những mô hình tiếp cận toàn diện hơn ở những bước tiếp theo.

Bảng 3-14. Mô hình hồi quy đa biến giữa EC với các kênh chỉ số từ ảnh Landsat8

Nhóm dữ liệu	Mô hình	r	R^2	R^2_{adj}	F-Static	DF
Kênh phổ	$L_EC1 = 11,609 + 40,220B3 - 82,156B5 + 87,971B6$	0,750	0,563	0,559	137,955	3:388
PCA	$L_EC2 = 13,223 - 30,522PCA1 + 50,068PCA3 + 7,836PCA2$	0,675	0,455	0,451	97,042	3:388
Chỉ số thực vật	$L_EC3 = 18,822 - 13,088GDVI$	0,696	0,484	0,483	307,650	1:388

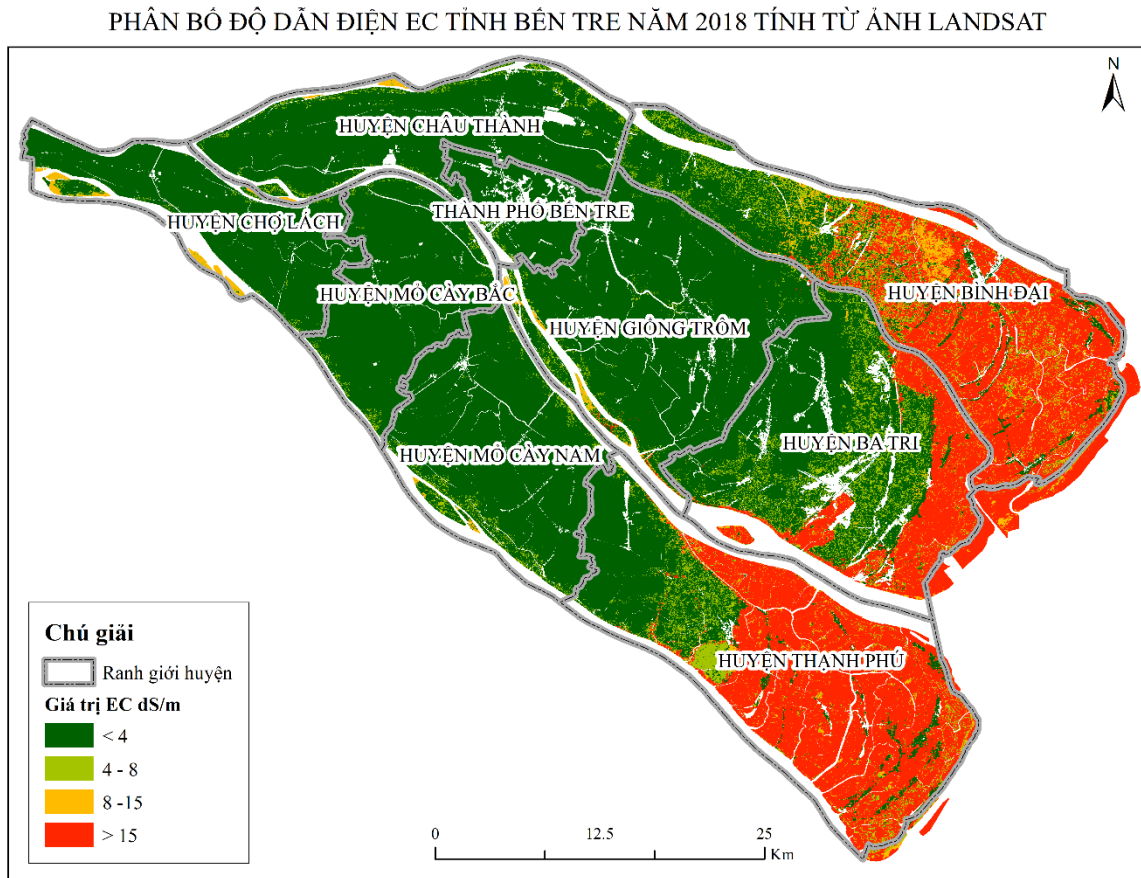
Chỉ số muối	$L_EC4 = 16,816 + 8,475SI5 - 65,088SI6 + 533,248SI1 - 314,669SI3 + 0,594SI4$	0,741	0,549	0,544	76,716	5:388
Kênh tỷ số	$L_EC5 = 17,970 + 22,547G/NIR - 2,638G/R - 10,087SWIR1/SWIR2 + 2,304NIR/SWIR2 - 3,879B/G$	0,767	0,588	0,583	95,958	5:388
Tất cả các chỉ số	$L_EC8 = -6,489 + 20,492G/NIR + 0,383T + 28,615B6 + 6,247NIR/SWIR1 - 20,053SI2 - 3,505SWIR1/SWIR2$	0,783	0,613	0,607	75,305	6:388



Hình 3-34. Tương quan giữa EC với các mô hình của ảnh Landsat

Với các hàm hồi quy đa biến, hệ số tương quan xác định theo từng nhóm dữ liệu cho kết quả khả quan hơn. Nhóm kênh tỷ số có hệ số tương quan r và hệ số hồi quy R^2 tương đối cao. Tuy nhiên, tương quan đánh giá tổng hợp các chỉ số L_EC8 cho thấy có độ tương quan và hồi quy cao nhất ($r = 0,783$ và $R^2 = 0,613$). Do vậy, kết quả của mô

hình này được lựa chọn sử dụng để tính toán giá trị EC cho toàn tỉnh Bến Tre và cũng là kết quả để phân tích sự biến đổi diện tích đất bị xâm nhập mặn của tỉnh qua các năm.

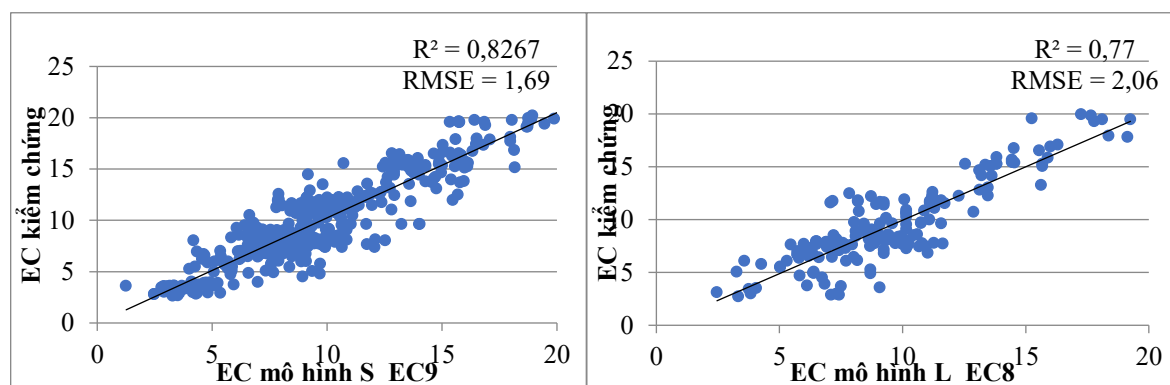


Hình 3-35. Sự phân bố của EC tính từ ảnh Landsat năm 2018

3.4. Thành lập bản đồ phân vùng nhiễm mặn các thời kỳ

Để đánh giá độ chính xác của các mô hình ước tính độ mặn thông qua chỉ số độ dẫn điện EC từ ảnh Sentinel-2 (S_EC9) và ảnh LANDSAT (L_EC8), NCS sử dụng 30% dữ liệu EC đo đạc ngoài thực địa. Kết quả đánh giá tương quan giữa EC mô hình và số liệu EC kiểm chứng được thể hiện qua hệ số xác định R^2 và RSME. Trong cả hai mô hình tính từ Landsat và Sentinel-2, hệ số xác định đều đạt $R^2 > 0,7$ và RMSE lần lượt là 2,06 và 1,69. Điều này cho thấy cả hai mô hình đều phù hợp để ước tính độ dẫn điện EC hay độ mặn trong đất ở khu vực nghiên cứu. Trong đó, mô hình S_EC9 tính từ ảnh Sentinel-2 có hệ số tương quan cao hơn so với mô hình L_EC8 tính từ ảnh LANDSAT, với R^2 tương ứng là 0,826 và 0,77. Tuy nhiên, do mới được phóng lên quỹ đạo năm 2015, tư liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2 không phù hợp để đánh giá diễn biến xâm nhập mặn qua các năm. Do đó, mô hình L_EC8 của ảnh LANDSAT được áp dụng cho tính toán

độ mặn khu vực nghiên cứu tỉnh Bến Tre trong các năm 2005, 2010 và 2015, 2018, 2020, 2022 theo 4 mức phân cấp độ mặn tương ứng với giá trị EC (dS/m) của Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn.



Hình 3-36. Tương quan giữa EC trong phòng và các mô hình

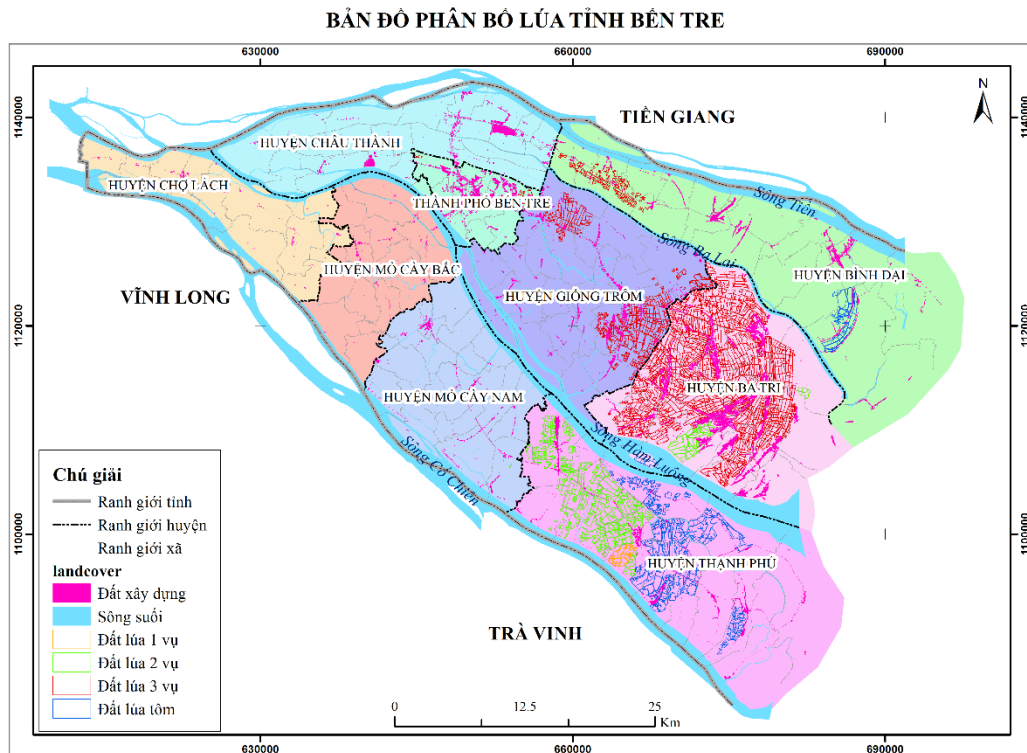
Bảng 3-15. Phân cấp giá trị độ mặn

STT	Mức độ mặn	Giá trị EC (dS/m)
1	Không mặn	<4
2	Mặn nhẹ	4 - 8
3	Mặn vừa	8 - 15
4	Mặn nặng	>15

3.4.1. Phân vùng nhiễm mặn đất trồng lúa

Toàn tỉnh Bến Tre có 47.522ha đất trồng lúa năm 2019 (Niên giám thống kê tỉnh Bến Tre năm 2019). Trong đó, các huyện Châu Thành, Chợ Lách, Mỏ Cày Nam, Mỏ Cày Bắc là những huyện không có diện tích trồng lúa hoặc diện tích rất nhỏ như thành phố Bến Tre (37ha). Diện tích lớn nhất thuộc về huyện Ba Tri: 33.356ha, chiếm tới 70% tổng diện tích trồng lúa toàn tỉnh, tiếp đến là huyện Thạnh Phú: 7.325ha, huyện Giồng Trôm là 5.117ha và Bình Đại là 1.687ha. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và xâm nhập mặn diễn ra hàng năm, diện tích đất trồng lúa của toàn tỉnh ngày càng giảm đi. Năm 2010 là 80.209ha đến năm 2019 chỉ còn 47.522ha. Sự ảnh hưởng nặng nề của xâm nhập mặn đã làm cho cơ cấu nông nghiệp của toàn tỉnh có sự chuyển đổi rõ rệt: chuyển đổi mục đích sử dụng đất như: đất lúa-tôm sang nuôi tôm công nghiệp, đất lúa sang trồng

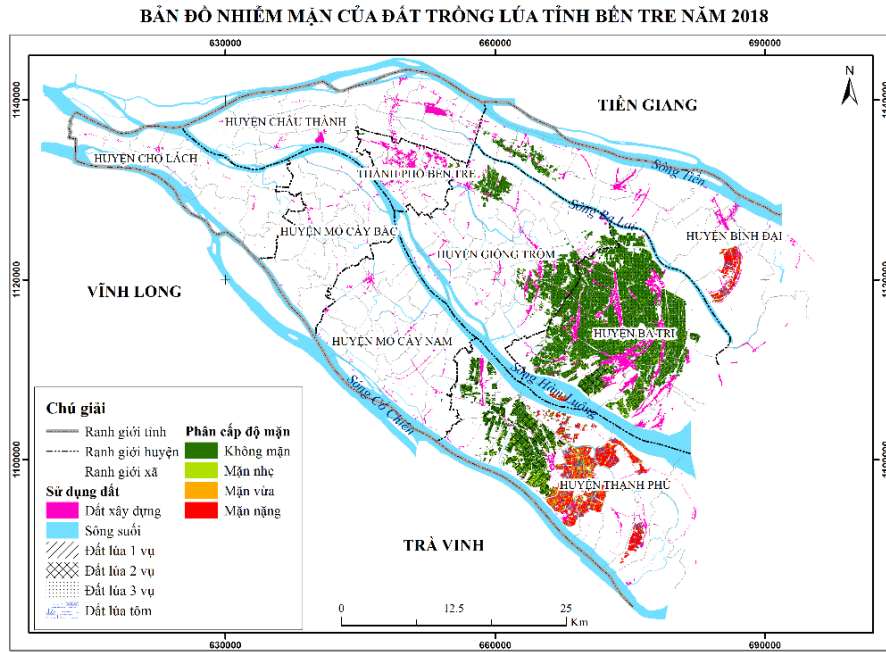
cỏ nuôi bò, hay chuyển đổi các mô hình sản xuất như mô hình tôm-lúa sạch từ đất nhiễm mặn, sử dụng các giống lúa chịu mặn,...



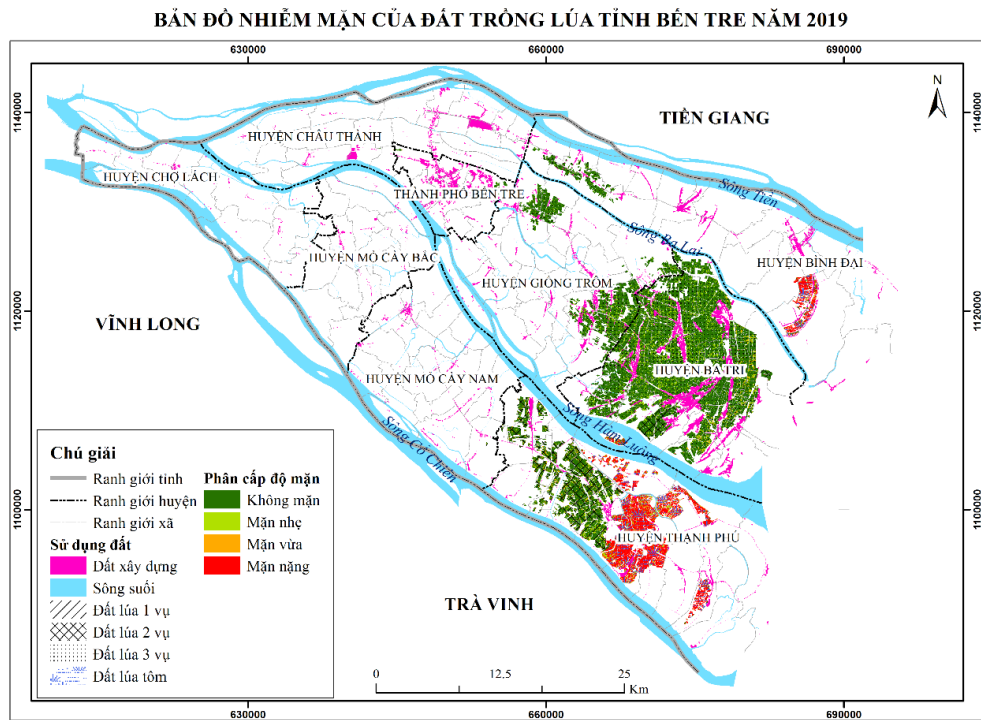
Hình 3-37. Bản đồ phân bố đất lúa tỉnh Bến Tre

Sự phân bố đất trồng lúa của tỉnh Bến Tre được hiển thị ở hình trên. Huyện Ba Tri có diện tích đất trồng lúa chủ yếu là lúa 3 vụ trên nền thổ nhưỡng là đất gley, có 1 phần nhỏ đất lúa 2 vụ ở phía Nam giáp sông Hàm Luông. Huyện Bình Đại có diện tích lúa 3 vụ là chính. Huyện Bình Đại và Thạnh Phú có diện tích đất lúa- tôm xen kẽ nằm giáp với vùng nuôi trồng thủy hải sản.

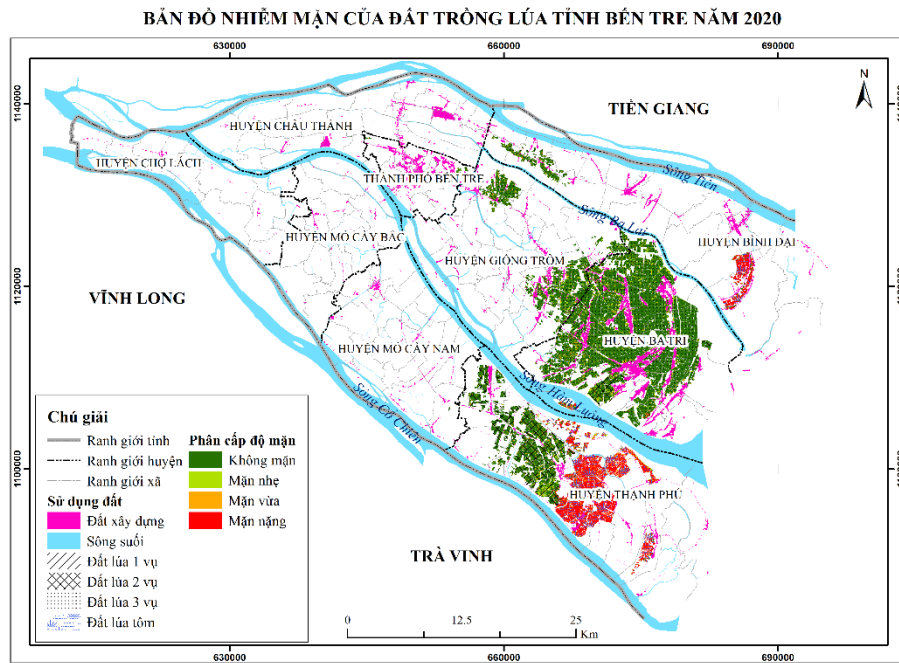
Giám sát và theo dõi sự xâm nhập mặn trên đất trồng lúa của tỉnh Bến Tre sử dụng ảnh Sentinel-2 trong giai đoạn 2018-2022. Giá trị độ dẫn điện EC được xác định từ mô hình S_EC7, từ đó phân cấp các giá trị EC để đưa ra được bản đồ phân cấp độ mặn trên đất trồng lúa của tỉnh Bến Tre.



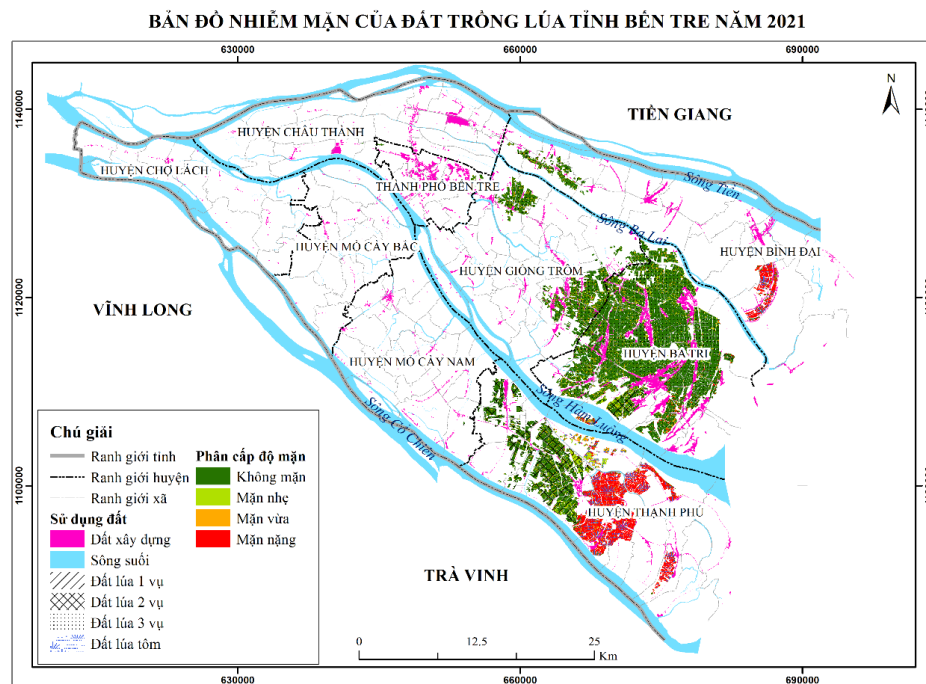
Hình 3-38. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2018



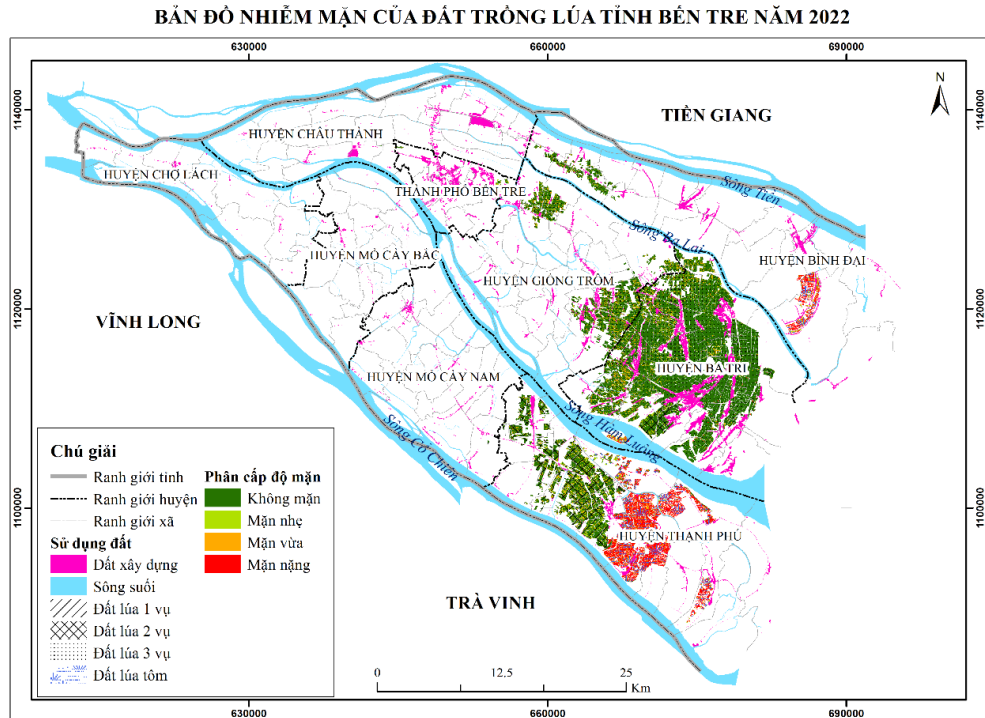
Hình 3-39. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2019



Hình 3-40. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2020



Hình 3-41. Bản đồ nhiễm mặn của đất lúa năm 2021



Hình 3-42. Bản đồ phân bố nhiễm mặn trên đất lúa tỉnh Bến Tre năm 2022

Các bản đồ phân bố mức độ xâm nhập mặn trên đất lúa của tỉnh Bến Tre từ năm 2018-2022 chiết xuất từ ảnh Sentinel_2 tổ hợp mùa khô cho thấy sự thay đổi của các loại đất bị nhiễm mặn trên các diện tích đất trồng lúa khác nhau.

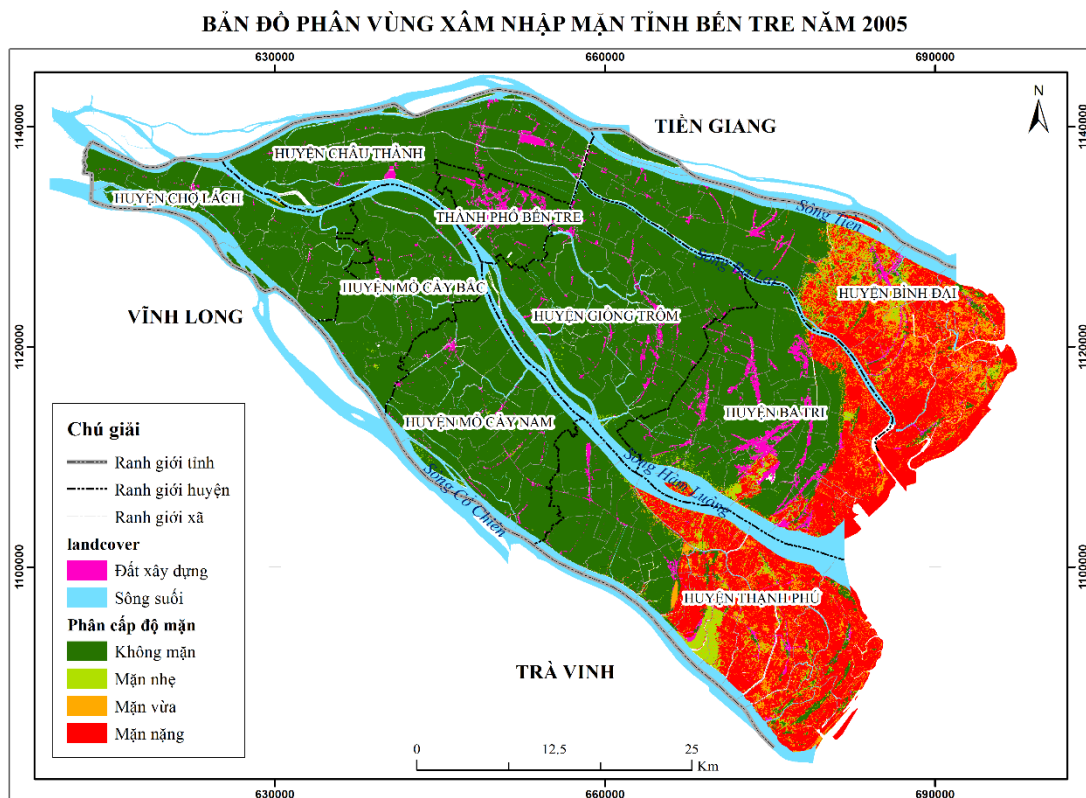
Trên vùng đất một vụ lúa một vụ tôm thì đất mặn nặng và mặn vừa là chiếm chủ yếu. Lúa được trồng ở khu vực này vào mùa mưa, là giống lúa chịu mặn ngắn ngày. Mùa khô sẽ được hiện tượng xâm nhập mặn diễn ra mạnh mẽ thì chuyển sang nuôi tôm cá nước mặn như tôm càng xanh, tôm sú, tôm thẻ. Huyện Thạnh Phú là vùng có diện tích đất lúa tôm nhiều nhất, tương ứng với phần đất mặn nặng và vừa chiếm diện tích lớn trong toàn tỉnh: 4.535,8ha. Huyện Bình Đại có diện tích đất lúa tôm là 705ha. Nhiều diện tích đất lúa tôm sản xuất không hiệu quả, người dân đã tự phát chuyển sang nuôi tôm công nghiệp nên đã bơm nước mặn vào đồng ruộng, do đó diện tích đất này ngày càng bị nhiễm mặn nặng.

Với vùng đất trồng 3 vụ lúa/năm thì chủ yếu là đất không bị nhiễm mặn thuộc hai huyện Giồng Trôm và Ba Tri. Huyện Ba Tri có diện tích đất trồng lúa 3 vụ lớn nhất: 13.979,36ha, huyện Giồng Trôm là 2.919,8ha. Năm 2020, do bị xâm nhập mặn nên diện tích đất lúa 3 vụ năm này bị chuyển sang đất nhiễm mặn nhẹ, do đó, người dân đã bỏ

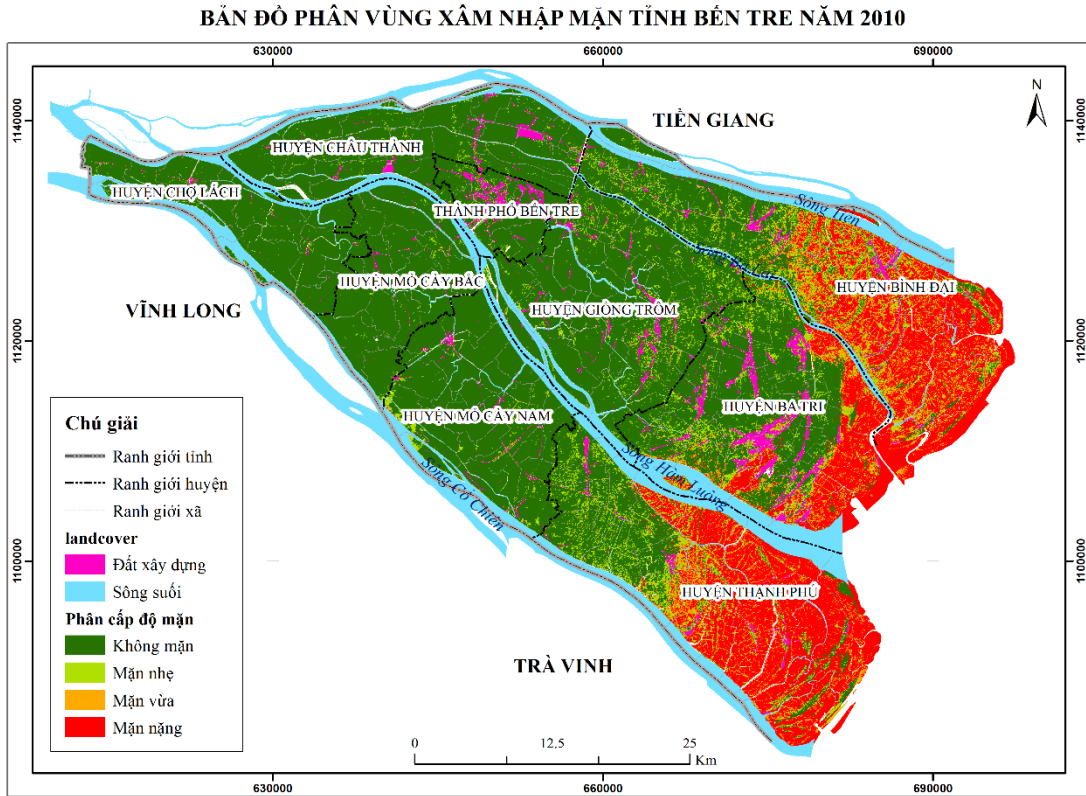
trồng 1 vụ lúa để đến mùa mưa tiếp theo thì rửa mặn mới trồng lúa tiếp. Riêng phần đất lúa 1 vụ ở huyện Thạnh Phú thì phần lớn là đất phèn, nên người dân đã dần chuyển sang đất trồng cỏ nuôi bò.

3.4.2. Phân vùng nhiễm mặn toàn tỉnh Bến Tre

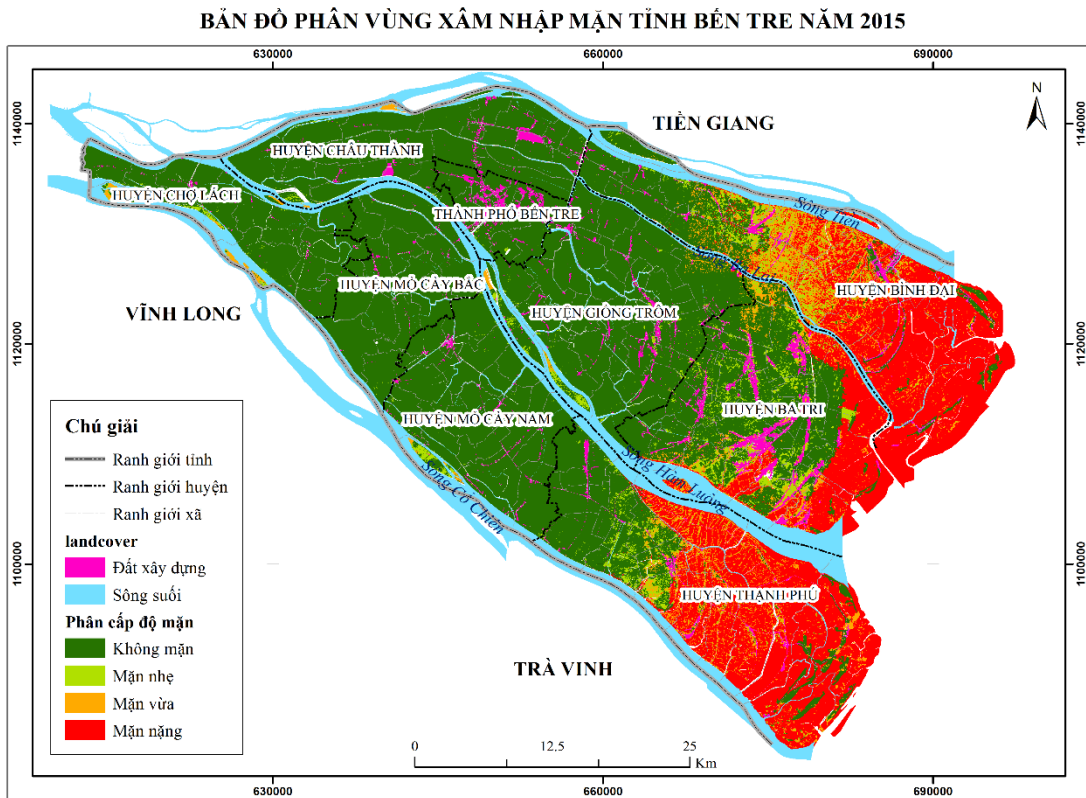
Mô hình ước tính L_EC8 của ảnh LANDSAT được áp dụng để xác định giá trị EC của toàn tỉnh Bến Tre theo các năm. Thang phân cấp độ mặn của đất dựa trên sự phân cấp giá trị EC. Bản đồ phân vùng xâm nhập mặn của toàn tỉnh Bến Tre từ năm 2005-2022 được thể hiện như các hình ở dưới.



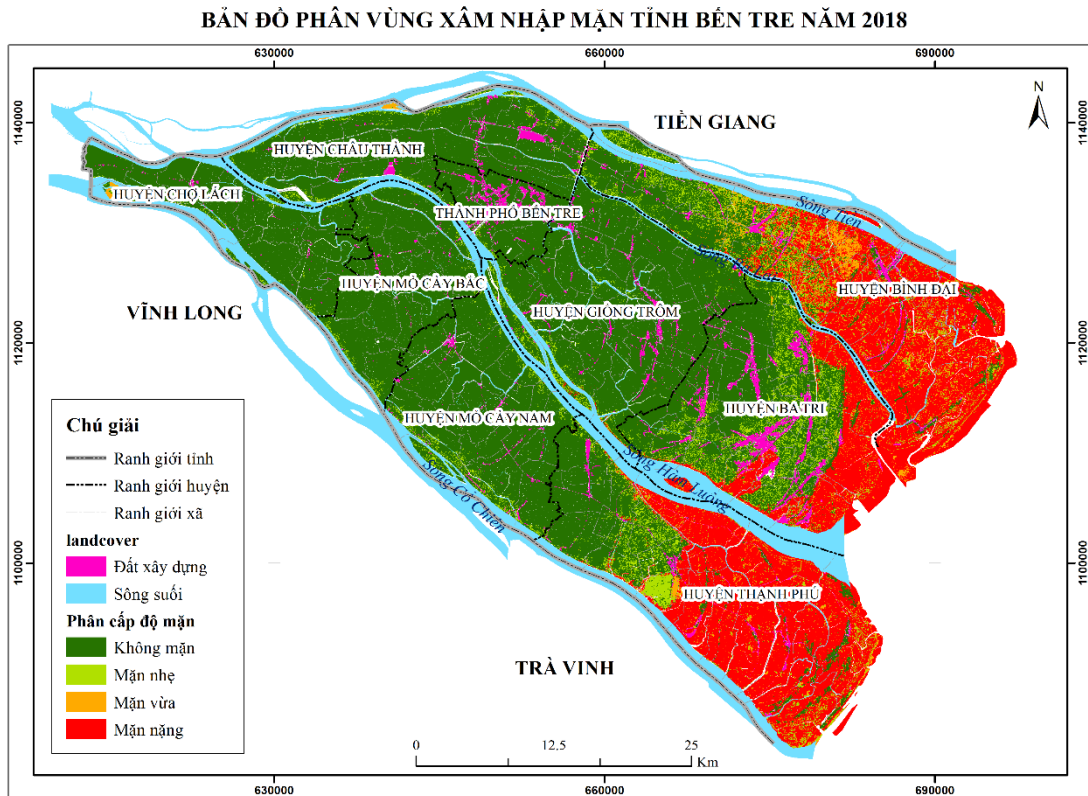
Hình 3-43. Bản đồ phân vùng nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2005



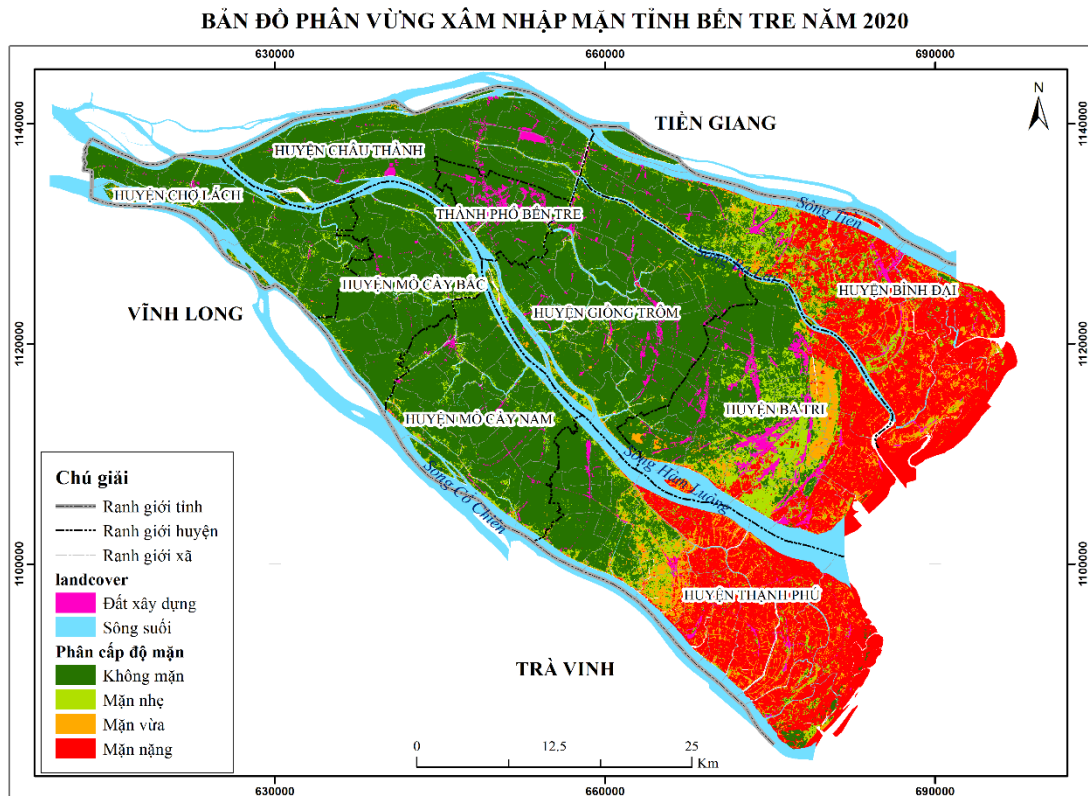
Hình 3-44. Bản đồ phân vùng xâm nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2010



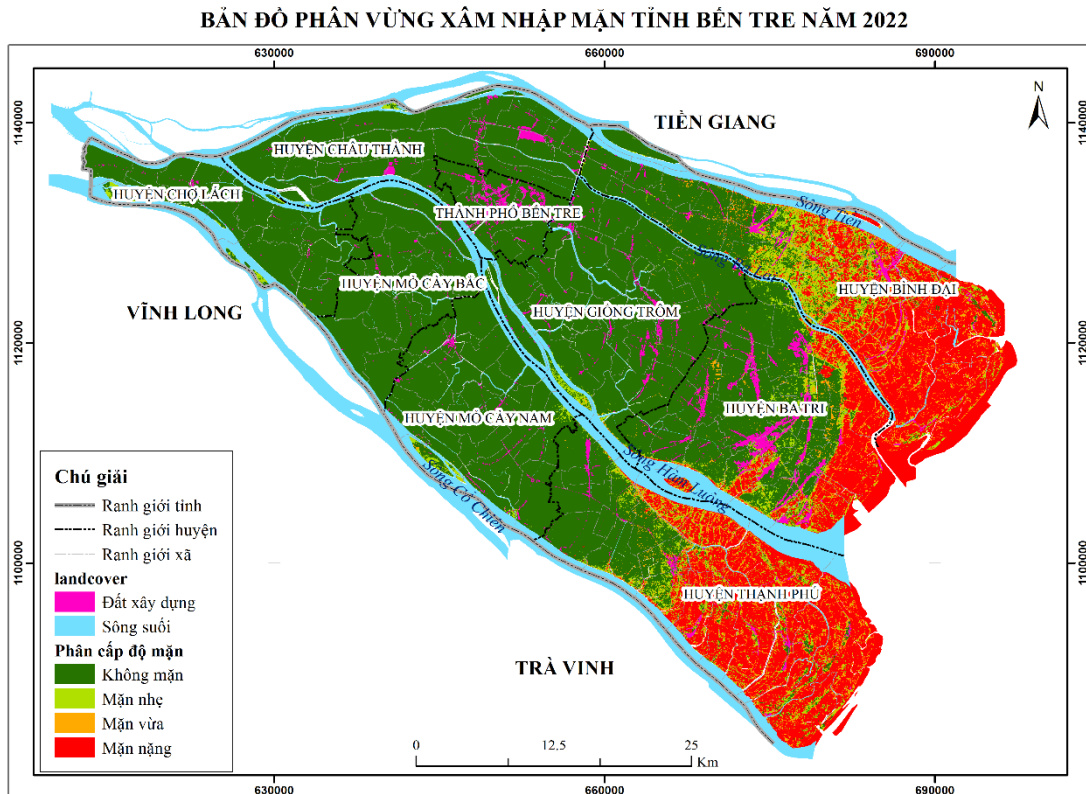
Hình 3-45. Bản đồ phân vùng xâm nhiễm tỉnh Bến Tre năm 2015



Hình 3-46. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2018



Hình 3-47. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2020



Hình 3-48. Bản đồ phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre năm 2022

Hình trên hiển thị bản đồ phân vùng xâm nhập mặn của tỉnh Bến Tre tại các thời điểm mùa khô của năm: 2005, 2010, 2015, 2018, 2020 và 2022. Trong đó, mùa khô các năm 2015 và năm 2020 là những năm mặn lịch sử của tỉnh. Thiệt hại do xâm nhập mặn tại hai thời điểm này rất lớn, tác động tới tất cả các lĩnh vực kinh tế, xã hội và đời sống sinh hoạt của người dân trên toàn tỉnh. Bến Tre là tỉnh có vị trí giáp biển, hệ thống sông ngòi kênh mương chằng chịt cùng với 4 cửa sông lớn nên rất dễ dàng xảy ra tình trạng nước mặn từ biển xâm nhập sâu vào đất liền.

Diện tích đất mặn nặng phân bố dọc theo đường bờ biển từ Bắc xuống Nam với hiện trạng sử dụng đất chủ yếu là rừng ngập mặn, khu vực nuôi trồng thủy sản nước mặn và vùng đất làm muối của tỉnh, tập trung ở ba huyện Bình Đại, Ba Tri và Thạnh Phú. Trong đó, huyện Thạnh Phú có nền thổ nhưỡng là diện tích đất mặn nhiều lớn nhất, tiếp đến là huyện Bình Đại và cuối cùng là huyện Ba Tri.

Diện tích đất mặn vừa cũng nằm tập trung chủ yếu ở ba huyện ven biển này. Hiện trạng sử dụng chính của đất này là nuôi trồng thủy hải sản nước lợ và đất lúa tôm (1 vụ lúa -1 vụ tôm). Diện tích đất mặn vừa cũng phân bố nhiều hơn ở huyện Thạnh Phú và

Bình Đại. Còn với diện tích đất mặn nhẹ là những khu vực nuôi trồng thủy hải sản nằm dọc theo các bãi bồi của các sông và khu vực trồng lúa 2 vụ của các huyện Giồng Trôm và Mỏ Cà Nam.

Các huyện Chợ Lách, Châu Thành, thành phố Bến Tre, Mỏ Cà Bắc nằm sâu trong đất liền nên diện tích đất không mặn là chủ yếu và là đất trồng cây ăn quả, cây lâu năm. Ở các huyện ven biển, nơi có các giồng cát được xác định là đất không mặn và được trồng hoa màu, cây hàng năm.

Sự phân bố của các loại đất mặn chiết xuất từ ảnh Landsat cho toàn tỉnh Bến Tre cho thấy sự thay đổi liên tục của diện tích các đất nhiễm mặn qua các năm khác nhau. Năm 2015, phần diện tích đất trồng lúa của tỉnh bị nhiễm mặn và chuyển sang đất mặn nhẹ, đến năm 2020 thì một phần diện tích này bị chuyển sang đất mặn vừa, dẫn đến việc người dân không sản xuất được lúa và phải bỏ trống đất trong nhiều mùa. Các huyện nằm sâu trong đất liền như Chợ Lách, Châu Thành, Mỏ Cà Bắc cũng bị nhiễm mặn vào đất trồng cây lâu năm.

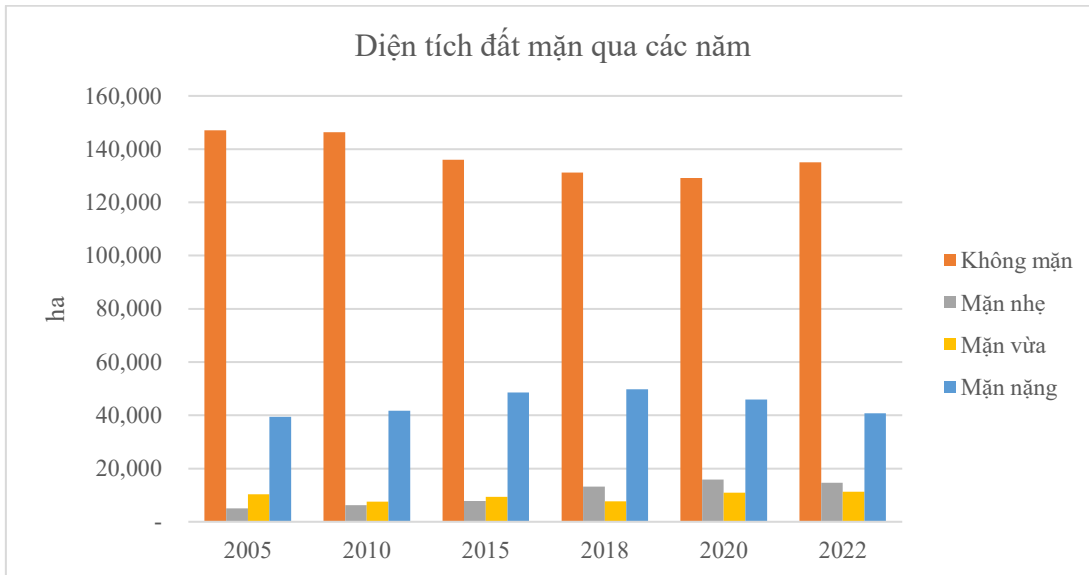
3.5. Đánh giá thực trạng và diễn biến nhiễm mặn

Hiện trạng nhiễm mặn của tỉnh Bến Tre qua các thời kỳ thay đổi theo xu hướng tăng diện tích đất nhiễm mặn và giảm diện tích đất không mặn, đặc biệt là ở ven biển. Trong bối cảnh biến đổi khí hậu đang diễn ra, mùa khô đến sớm và kéo dài hơn, dẫn đến việc thiếu nước từ thượng nguồn, đã làm cho hiện tượng nước biển xâm nhập sâu vào trong nội đồng, tác động trực tiếp đến cây trồng và nước sinh hoạt của người dân. Bên cạnh đó, việc chuyển đổi mục đích sử dụng đất từ trồng lúa sang nuôi trồng thủy hải sản một cách tự phát của người dân là một trong những nguyên nhân gây ra hiện tượng nhiễm mặn trong đất.

Từ năm 2005-2022, diện tích đất không bị nhiễm mặn của tỉnh ngày càng giảm và đất mặn có xu hướng tăng lên, nhiều nhất là đất mặn nhẹ. Trong vòng 17 năm, diện tích không mặn giảm đi 11.985ha; trung bình mỗi năm giảm đi 705ha/năm. Còn diện tích đất mặn tăng lên tương ứng: tăng nhiều nhất là diện tích đất mặn nhẹ: 9.648ha, tiếp đến là đất mặn nặng 1.337 ha, đất mặn vừa là 999ha.

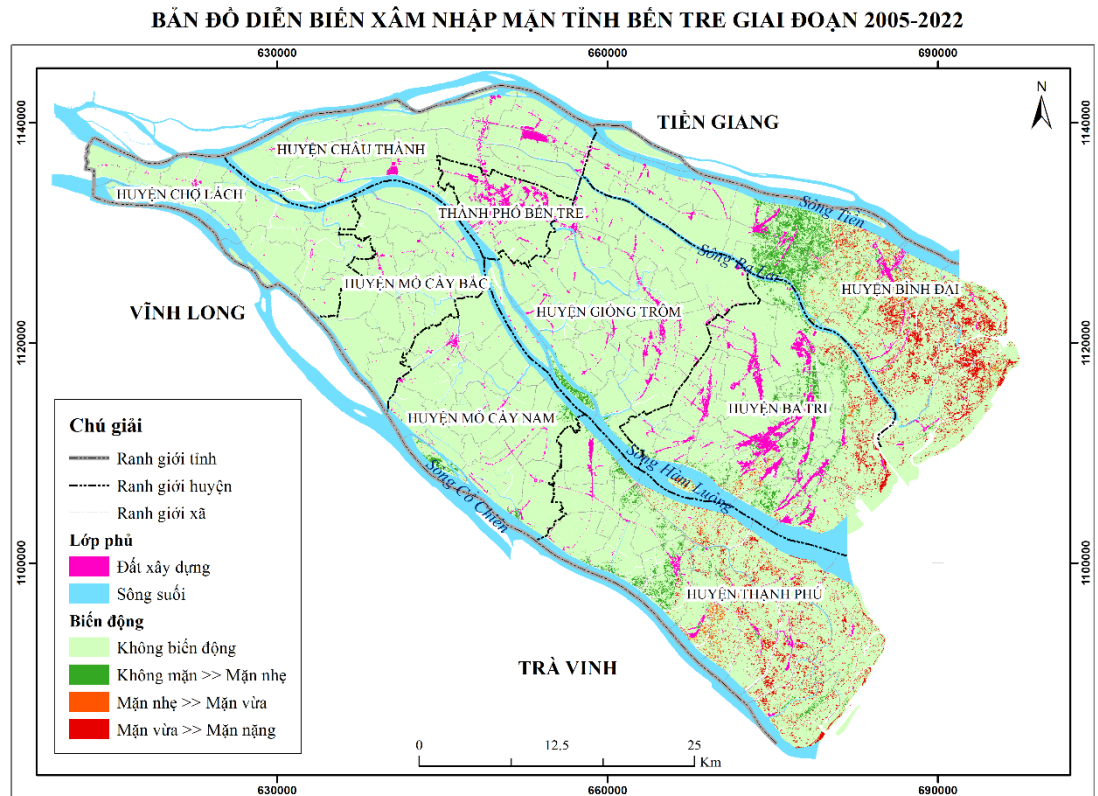
Giai đoạn 2010-2015, diện tích đất không mặn bị giảm nhiều nhất: 10.312,84ha, trung bình: 2.062,57ha/năm, do vùng đất bãi bồi giữa các sông lớn như Hàm Luông, Cỏ

Chiên, sông Tiền cũng được người dân chuyển đổi mục đích từ trồng cây ăn quả sang nuôi trồng thủy hải nước lợ. Bên cạnh đó, đây cũng là giai đoạn diện tích đất mặn nặng tăng lên rất nhiều 6.861,46ha, nguyên nhân là bởi diện tích đất lúa tôm sản xuất không hiệu quả đã bị chuyển đổi sang nuôi tôm công nghiệp.



Hình 3-49: Sự thay đổi diện tích đất mặn tỉnh Bến Tre qua các năm

Khi diện tích nuôi tôm công nghiệp được mở rộng sâu vào trong các vùng đất canh tác nông nghiệp, nước mặn được lấy từ các kênh dẫn trực tiếp vào sâu hơn trong đất liền dẫn đến đất mặn xâm nhập sâu hơn từ biển. Đây là nguyên nhân chính dẫn đến hiện tượng xâm nhập mặn trên đất của tỉnh Bến Tre. Hơn nữa, hệ thống kênh rạch chằng chịt trong khi hệ thống thủy lợi vẫn chưa khép kín nên một số nơi trở thành “túi chứa nước mặn” trong mùa khô. “Nhu ở huyện Thạnh Phú, mặc dù có hệ thống đê bao nhưng hàng năm nước mặn vẫn từ huyện Mỏ Cày Nam theo sông Cái Qua chảy ngược về huyện Thạnh Phú, hay nước mặn từ kênh Chệt Sậy (chảy từ phía sông Hàm Luông) và kênh Giao Hòa (phía sông Tiền) chảy ngược vào sông Ba Lai trong mùa khô” [87]. Chính vì vậy, hiện tượng xâm nhập mặn của tỉnh Bến Tre diễn ra hàng năm không chỉ dọc các sông mà cả trên diện tích đất sản xuất nông nghiệp. Năm 2020, tỉnh Bến Tre bị thiệt hại nặng nề nhất trong lịch sử, độ mặn 2‰ bao phủ toàn tỉnh trong một thời gian đã làm cho diện tích đất cả trong nội đồng bị nhiễm mặn. Diện tích mặn nhẹ tăng lên tới 15.880ha, trong khi diện tích đất không mặn chỉ còn 129.110ha.



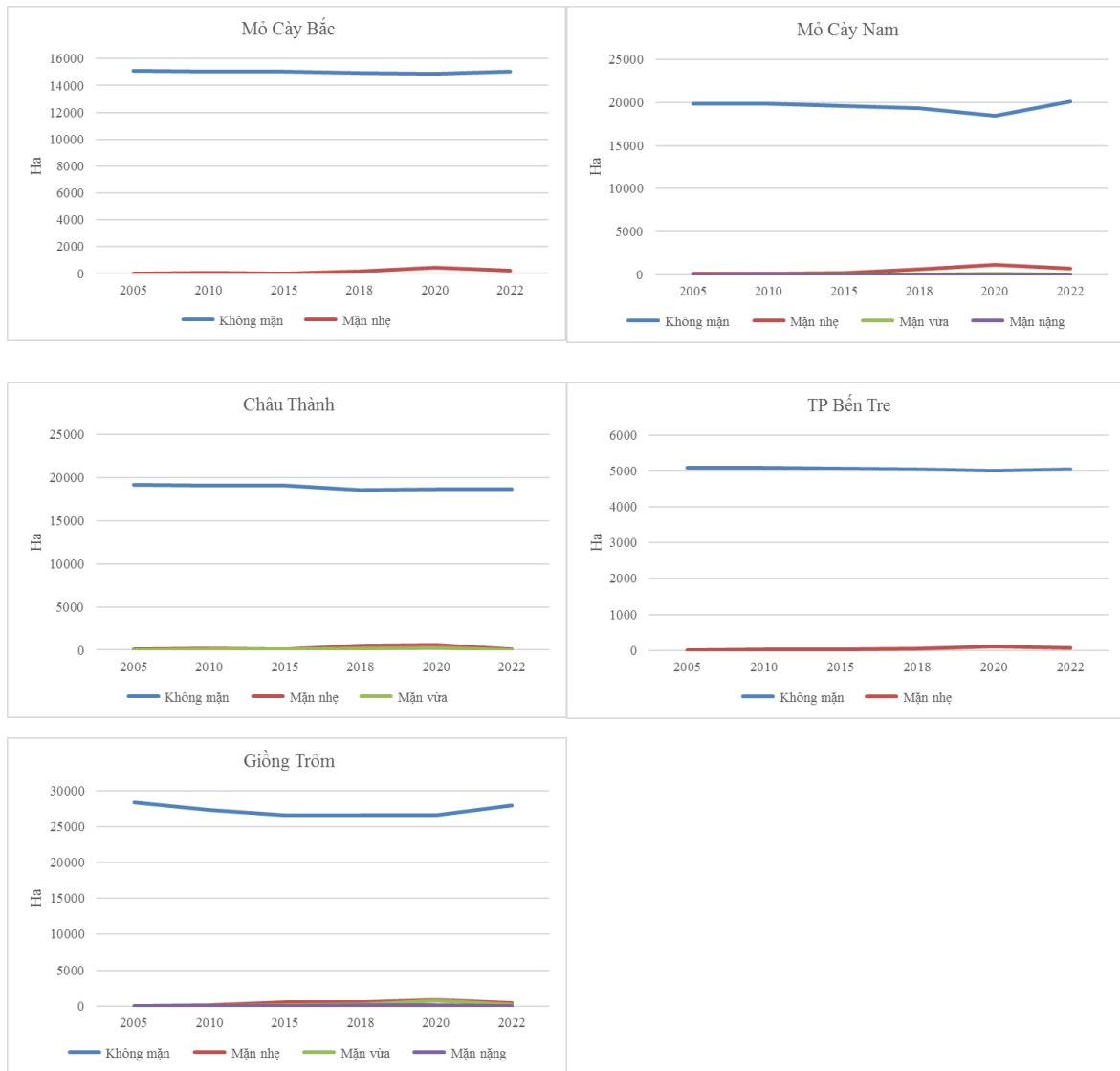
Hình 3-50: Bản đồ diễn biến nhiễm mặn tỉnh Bến Tre giai đoạn 2005-2022

Hình trên thể hiện sự thay đổi của các loại đất mặn của tỉnh Bến Tre từ năm 2005-2022. Sự biến động của các loại đất này là chuyển từ đất không mặn sang mặn nhẹ, đất mặn nhẹ sang mặn vừa và từ đất mặn vừa sang mặn nặng. Trong đó ở các huyện ven biển: Bình Đại, Ba Tri và Thạnh Phú thì quá trình chuyển đổi này diễn ra mạnh mẽ nhất. Sự chuyển đổi của đất không mặn sang mặn nhẹ là nhiều nhất: 8000ha, còn mặn vừa sang mặn nặng là 5.535ha. Diện tích đất chuyển từ mặn vừa sang mặn nặng là chủ yếu là những vùng nuôi trồng thủy hải sản nước lợ, vùng trồng 1 vụ lúa-1 vụ tôm chuyển sang nuôi tôm công nghiệp, người dân bơm trực tiếp nước mặn vào. Mùa khô năm 2015 và 2020, nước mặn xâm nhập sâu vào đất liền lên đến 82km, nắng nóng gay gắt, tình trạng thiếu nước ngọt cả trong sinh hoạt và sản xuất diễn ra khốc liệt, hiện trạng này đã làm cho đất bị nhiễm mặn. Sự chuyển đổi từ đất không mặn sang đất mặn nhẹ do quá trình nhiễm mặn, người dân đã chuyển đổi cây trồng từ cây ăn quả lâu năm sang các loại cây ngắn ngày khác.

Các hệ thống công trình thủy lợi của tỉnh Bến Tre như cống (91 cống, tính đến tháng 4/2017), kênh mương, đê điều đã và đang được xây dựng dọc theo hệ thống sông và kênh mương trên toàn tỉnh nhằm mục đích đảm bảo phục vụ tưới tiêu, trữ ngọt và ngăn mặn cho các đối tượng diện tích sản xuất nông nghiệp, dân sinh kinh tế và kết hợp phục vụ nuôi trồng thủy sản. Các trạm đo mặn (10 trạm) cũng như trạm khảo sát (3 trạm) được Trung tâm Khí tượng Thủy văn của tỉnh Bến Tre lắp đặt dọc theo hệ thống sông Hàm Luông và Cổ Chiên để đo đạc và kịp thời cập nhật tình hình nhiễm mặn cho chính quyền và người dân phòng chống. Tuy nhiên, hệ thống thủy lợi này vẫn chưa khép kín nên ảnh hưởng mặn vẫn diễn ra, gây khó khăn cho các vùng sản xuất.

Sự phân bố diện tích đất bị nhiễm mặn trong mùa khô của từng huyện cũng có sự thay đổi qua các thời kỳ. Tùy thuộc vào từng loại thổ nhưỡng và loại hình sử dụng đất khác nhau mà mỗi huyện có diễn biến thay đổi các loại đất khác nhau. Với các huyện giáp biển thì có xu hướng tăng diện tích đất mặn vừa và nặng, còn với các huyện khác thì tăng diện tích đất mặn nhẹ và giảm diện tích đất không mặn.





Hình 3-51: Sự thay đổi diện tích đất mặn của các huyện qua các năm

Bình Đại, Ba Tri và Thạnh Phú là ba huyện giáp biển của tỉnh Bến Tre, là các huyện có sự biến động về đất mặn diễn ra phức tạp nhất. Thổ nhưỡng của 3 huyện có nguồn gốc từ đất mặn chiếm nhiều nhất và ngày càng tăng, trong khi diện tích đất không mặn ít (chủ yếu là đất dân cư, đất trồng lúa và hoa màu) và giảm liên tục. Đất mặn nặng của 3 huyện đều tăng bởi diện tích đất làm muối tăng, diện tích nuôi tôm công nghiệp cũng tăng. Ba Tri là huyện có diện tích đất trồng lúa 3 vụ trên nền đất phù sa nhiều nhất trong toàn tỉnh, đồng thời đây cũng là vùng thiệt hại nặng nề nhất về trồng lúa trong đợt nhiễm mặn cuối năm 2015, đầu 2016 và mùa khô năm 2020. Đất không mặn giảm liên tục qua các năm và thay vào đó là đất mặn nhẹ và mặn nặng tăng lên. Diện tích đất mặn nhẹ tăng lên nhiều nhất và nhanh nhất ở huyện Ba Tri, tập trung ở vùng diện tích đất trồng lúa 3 vụ, một diện tích nhỏ đất trồng lúa 2 vụ giáp các vùng làm muối cũng bị

nhiễm mặn nặng và người dân bắt đầu bỏ cấy và chuyển dần sang trồng lúa 1 vụ sau mùa mưa. Năm 2020, diện tích đất mặn nhẹ lên tới 4016ha, mặn vừa là 848 ha, chủ yếu là do phần diện tích đất trồng lúa 2 vụ và 1 vụ bị nhiễm mặn.

Bình Đại là huyện có diện tích đất không mặn giảm nhiều nhất 4697ha và diện tích mặn nặng tăng nhanh nhất: 2.317ha. Đây là huyện có sự chuyển đổi mục đích sử dụng đất diễn ra rất nhanh chóng. Các vùng đất sản xuất không hiệu quả, kinh tế thấp như đất lúa tôm, cây ăn quả xen lẫn vùng nuôi trồng thủy hải sản được người dân chuyển hẳn sang chuyên nuôi tôm nước lợ và tôm nước mặn.

Thanh Phú là huyện cuối cùng nằm giáp biển về phía Nam của tỉnh Bến Tre. Đây là huyện duy nhất có diện tích lúa 1 vụ: 1000ha. Tuy nhiên nhiều diện tích canh tác này hiện đang bị bỏ trống do hàm lượng phèn lên quá cao, sản xuất không hiệu quả. Từ bản đồ thổ nhưỡng cho thấy, khu vực này có diện tích đất mặn nhiều lớn nhất trong toàn tỉnh. Huyện cũng có diện tích đất không mặn giảm rất lớn: 4.371ha, trong khi diện tích đất mặn vừa là tăng lên 1.725ha. Nguyên nhân là do người dân đã chuyển đổi phần diện tích đất lúa tôm sang nuôi tôm công nghiệp.

Huyện Châu Thành nằm giữa sông Tiền và sông Hàm Luông, phần lớn là diện tích đất gley được sử dụng để trồng cây lâu năm, cây ăn quả, do đó phần diện tích đất không mặn của huyện chiếm tới trên 99% tổng diện tích đất tự nhiên, chỉ có 1 phần nhỏ diện tích đất bị nhiễm mặn nằm ở dọc sông Tiền do nuôi trồng thủy hải. Tuy nhiên, từ năm 2005-2022, diện tích đất không mặn cũng bị giảm, thay vào đó là diện tích đất mặn nhẹ tăng lên.

Huyện Chợ Lách nằm ở ngã ba sông Cổ Chiên, Hàm Luông và sông Tiền có vị trí cách xa bờ biển, chủ yếu là đất phù sa, hiện trạng sử dụng đất chính là trồng cây lâu năm, cây ăn quả, do đó, đây là vùng đất không mặn. Diện tích này gần như không thay đổi qua các năm và không có đất bị nhiễm mặn nặng, vừa. Một phần nhỏ diện tích đất mặn nhẹ tăng lên nằm ở các cồn, bãi giữa và vùng ven hai bờ sông Cổ Chiên và Hàm Luông. Tương tự như vậy với huyện Mỏ Cày Bắc loại hình thổ nhưỡng chính của huyện là đất phù sa và một phần rất nhỏ là đất phèn lên líp, gần như toàn bộ diện tích là trồng cây ăn quả. Diện tích đất mặn nhẹ xuất hiện thuộc các vùng đất ven sông.

Mỏ Cày Bắc và Mỏ Cày Nam là hai huyện có đặc điểm thổ nhưỡng tương đối giống nhau, phần lớn là đất phù sa và một phần nhỏ là diện tích đất phèn và chủ yếu là trồng ăn cây quả, không có diện tích đất mặn nặng. Phần diện tích đất không mặn gần như không thay đổi qua các năm. Diện tích đất mặn nhẹ thuộc về vùng nuôi trồng thủy sản ở các cồn giữa sông Cổ Chiên, Hàm Lương và vùng ven sông.

Thành phố Bến Tre có tổng diện tích đất tự nhiên nhỏ nhất so với các huyện còn lại, dân cư tập trung đông đúc và diện tích đất trồng cây ăn quả chiếm phần lớn. Thành phố được hình thành từ nền đất phù sa và đất phèn lại nằm sâu trong đất liền nên gần như không có diện tích đất bị nhiễm mặn.

Huyện Giồng Trôm cũng được hình thành chủ yếu từ đất phù sa và đất phèn, thích hợp để trồng cây ăn quả (diện tích dừa nhiều nhất tỉnh) và trồng lúa. Đây là huyện có diện tích đất không mặn lớn nhất toàn tỉnh. Tuy nhiên, diện tích đất không mặn này cũng giảm đi cùng với xu hướng của toàn tỉnh, giảm 511ha, tăng diện tích đất mặn nhẹ 365ha. Sự biến đổi đất tập trung từ đất không nhiễm mặn thành đất mặn nhẹ, nằm ở các cù lao trên sông Hàm Luông.

Bến Tre là một trong những tỉnh cuối nguồn của sông Cửu Long, tiếp giáp biên cùng với hệ thống kênh rạch chằng chịt nên hiện tượng nhiễm mặn diễn ra hàng năm. Để giảm thiểu tác hại của ảnh hưởng nhiễm mặn, tỉnh Bến Tre đã và đang triển khai nhiều giải pháp khác nhau để ứng phó với sự xâm nhập của nước mặn như xây dựng hệ thống đê bao, cống đập ở các sông lớn và rất nhiều các cống nhỏ ở nội đồng, cùng với các hồ chứa nước ngọt. Tuy nhiên, hệ thống thủy lợi này vẫn chưa hoàn toàn khép kín cùng với sự chuyển đổi mục đích sử dụng đất tự phát của người nên hiện tượng xâm nhập mặn vẫn đang diễn ra, đặc biệt là vào mùa khô. Tỉnh tiếp tục đầu tư hoàn thiện hệ thống các công trình thủy lợi, kết hợp cùng với các công trình đập tạm, bờ bao cục bộ để tạo thành hệ thống khép kín nhằm kiểm soát được nguồn nước từ các sông, phục vụ cho việc ngăn mặn và trữ ngọt, góp phần phục vụ nhu cầu sản xuất và sinh hoạt của người dân địa phương.

Xuất phát từ nhu cầu thực tiễn, người dân của tỉnh Bến Tre đã chuyển đổi mục đích sử dụng đất từ trồng lúa- tôm (1 vụ lúa- 1 vụ tôm), lúa 1 vụ sang nuôi trồng thủy hải sản, nuôi tôm công nghiệp. Ở những vùng trồng lúa- tôm và vùng trồng lúa 1 vụ hiệu

quả sản xuất kinh tế không cao, thu nhập của người dân thấp, do đó, việc chuyển đổi mục đích sử dụng đất đã thúc đẩy sự phát triển kinh tế, giúp đời sống người dân cao hơn. Tuy nhiên, xu thế chuyển đổi này không chỉ diễn ra ở riêng tỉnh Bến Tre, mà xuất hiện phổ biến ở các tỉnh ven biển khác của đồng bằng sông Cửu Long. Đây là một trong những nguyên nhân trực tiếp làm cho đất ngày càng bị nhiễm mặn và rất khó có khả năng cải tạo lại.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Kết quả thực hiện luận án “Nghiên cứu diễn biến và phân vùng nhiễm mặn tỉnh Bến Tre bằng công nghệ viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian” đã rút ra một số kết luận và kiến nghị sau đây:

KẾT LUẬN

1. Đất nhiễm mặn vẫn là một vấn đề nghiêm trọng trên toàn thế giới, ảnh hưởng đến môi trường tự nhiên, gây thiệt hại cho nông nghiệp, và an ninh lương thực. Do đó, việc thành lập bản đồ độ mặn của đất là rất quan trọng, nhằm cung cấp thông tin hữu ích về mức độ mặn của đất, có thể hữu ích cho việc lập kế hoạch và quản lý sử dụng đất. Công nghệ viễn thám đã và đang có những bước phát triển nhanh chóng mang lại những ứng dụng thiết thực cho cộng đồng. Các nguồn tư liệu viễn thám ngày càng đa dạng đòi hỏi có những nghiên cứu phát triển với phương pháp phù hợp để khai thác tối ưu thông tin viễn thám có thể mang lại.

Đánh giá diễn biến và phân vùng xâm nhập mặn ở khu vực nghiên cứu, cụ thể là đất sản xuất bị ảnh hưởng bởi mặn trên cơ sở khai thác công nghệ, dữ liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian. Bên cạnh đó, sử dụng dữ liệu viễn thám đa phổ, đa thời gian kết hợp với số liệu thực địa cho phép ta theo dõi được xu thế biến động lớp phủ, theo dõi năng suất cây trồng, xác định các khu vực có phân bố cây chịu mặn, chịu lợ. Sự xuất hiện của các loại cây trồng hay thảm thực vật khác nhau cũng có những phản xạ riêng, đặc thù trên ảnh vệ tinh và các chỉ số tính toán được từ ảnh. Từ đó, tính toán được những ảnh chỉ số gián tiếp, giúp khoanh vùng ảnh hưởng và đánh giá được diễn thế của hiện tượng xâm nhập mặn hay sự mặn hóa của đất trên địa bàn nghiên cứu. Ngoài ra việc sử dụng ảnh vệ tinh để theo dõi năng suất cây trồng cũng giúp nhà quản lý đánh giá chính xác được ảnh hưởng do xâm nhập mặn đến nền nông nghiệp của khu vực nghiên cứu.

2. Nghiên cứu đã ứng dụng thành công công nghệ tích hợp viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian này trong phân tích, đánh giá diễn thế và phân vùng xâm nhập mặn, thí điểm tại tỉnh Bến Tre. Đánh giá diễn thế xâm nhập mặn tại khu vực nghiên cứu, khoanh vùng được những khu vực xâm nhập mặn tại tỉnh Bến Tre.

Nghiên cứu ứng dụng viễn thám radar, thông qua 5 thuật toán học máy Multilayer perceptron neural network, Radial Basis Function neural networks, Gaussian Process, Support Vector Regression và Random Forest để phân tích tư liệu viễn thám radar Sentinel-1 SAR ước tính độ mặn của đất. Kết quả cho thấy mô hình sử dụng thuật toán Gaussian Process trên ảnh radar Sentinel-1 SAR cho kết quả có độ tương quan tốt nhất.

Nghiên cứu đánh giá xâm nhập mặn bằng viễn thám đa phổ sử dụng mô hình hồi quy đa biến khai thác 2 loại tư liệu ảnh vệ tinh LANDSAT và Sentinel-2 cho thấy kết quả tương quan tương đối cao. Mô hình hồi quy đa biến trên ảnh Sentinel-2 có hệ số tương quan R^2 cao hơn chút ít so với mô hình hồi quy từ ảnh LANDSAT. Tuy nhiên, ảnh vệ tinh Sentinel-2 chỉ bắt đầu có từ năm 2015, trong khi vệ tinh LANDSAT đã có thời gian dài hoạt động liên tục, nối tiếp nhau, ảnh LANDSAT 5 có từ 1984, LANDSAT 8 có từ 2013. Do đó, nghiên cứu sinh đã ứng dụng khai thác tư liệu vệ tinh LANDSAT để đánh giá được diễn biến xâm nhập mặn khu vực Bến Tre từ năm 2005 đến năm 2022.

3. Kết quả đánh giá diễn thế xâm nhập mặn tại Bến Tre cho thấy sự thay đổi về không gian và thời gian. Tổng diện tích đất mặn có xu thế tăng dần từ năm 2005 đến 2022. Diễn biến đất mặn của tỉnh diễn ra theo quy luật tăng dần theo chiều từ đất liền ra bờ biển, từ đất không mặn sang đất mặn, từ đất mặn ít sang mặn nhiều.

KIẾN NGHỊ

1. Từ năm 2015, việc sử dụng đất tại Bến Tre có những thay đổi đáng kể, cụ thể là chuyển đổi mục đích sử dụng đất từ trồng lúa sang chuyên tôm, từ đất trồng lúa sang nuôi trồng thủy hải hay nuôi tôm công nghiệp khiến nên diện tích đất mặn của tỉnh tăng. Bên cạnh đó, hệ thống thủy lợi của tỉnh vẫn chưa hoàn thiện và đồng bộ, nên vào mùa khô, thủy triều dâng cao kết hợp với gió chướng, nước từ thượng nguồn ít đã làm cho nước mặn có khả năng xâm nhập sâu vào đất liền theo các con sông, kênh. Ứng dụng kết quả của đề tài kết hợp phân vùng ảnh hưởng của xâm nhập mặn để dự báo xu hướng xâm nhập mặn. Từ đó có các biện pháp ứng phó và lập các kế hoạch giảm tác hại của hiện tượng xâm nhập mặn và biến đổi khí hậu. Trong công tác quản lý việc cập nhật dữ liệu theo các năm cùng với các mục tiêu phát triển kinh tế xã hội của địa phương có thể giúp nhà quản lý có các định hướng phát triển phù hợp với xu thế của xâm nhập mặn trên địa bàn tỉnh Bến Tre

2. Nghiên cứu, đánh giá xâm nhập mặn trên cơ sở ứng dụng công nghệ viễn thám là một phương pháp khoa học hiệu quả cho phép theo dõi và đánh giá diễn biến xâm nhập mặn qua các thời kỳ trên một khu vực địa lý rộng lớn. NCS tiếp cận sử dụng tư liệu viễn thám đa tầng, đa độ phân giải, đa thời gian là một phương pháp mới, hiện đại cho phép kết hợp được tính ưu việt của nhiều nguồn, nhiều loại dữ liệu với nhau nhằm bổ sung những hạn chế và tăng tính hiệu quả trong nghiên cứu, điều tra tài nguyên. Kết quả nghiên cứu và phương pháp khoa học của luận hoàn toàn có thể triển khai, ứng dụng cho những vùng địa lý khác nhau (như đồng bằng Sông Cửu Long, các tỉnh miền Trung) trong vấn đề nghiên cứu xâm nhập mặn.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Lê Minh Hằng, Vũ Văn Trường, **Lê Vũ Hồng Hải** (2020); Nghiên cứu kết hợp tư liệu ảnh viễn thám quang học và ảnh Sentinel-1A đa thời gian trong phân loại lớp phủ khu vực Hà Nội; Tạp chí Khoa học - Trường Đại học Sư phạm TP Hồ Chí Minh Tập. 15 Số. 11(b) (2018); ISSN: 1859-3100.
2. Pham Viet Hoa, Nguyen Vu Giang ,Nguyen An Binh ,Le Vu Hong Hai ,Tien Dat Pham ,Mahdi Hasanlou, Dieu Tien Bui (2019); Soil Salinity Mapping Using SAR Sentinel-1 Data and Advanced Machine Learning Algorithms: A Case Study at Ben Tre Province of the Mekong River Delta (Vietnam); Remote Sens., EISSN 2072-4292, Published by MDPI.
3. Lê Minh Hằng , Lê Vũ Hồng Hải , Nguyễn Văn Dũng (2026); Đánh giá khả năng sử dụng chỉ số RVI(radar vegetation index) trên ảnh vệ tinh sentinel-1 trong giám sát lớp phủ thực vật, thử nghiệm tại tỉnh thanh hóa, việt nam; Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất; Số 1(2026); ISSN; 1859-1469

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. IMHEN & UNDP, *Báo cáo đặc biệt của Việt Nam về quản lý rủi ro thiên tai và các hiện tượng cực đoan nhằm thúc đẩy thích ứng với biến đổi khí hậu*. Nhà xuất bản Tài nguyên - Môi trường và Bản đồ Việt Nam, 2015
2. UBND tỉnh Bến Tre. Trung tâm Thông tin điện tử Bến Tre [www.https://bentre.gov.vn/](https://bentre.gov.vn/)
3. K.D Shepherd and M.G Walsh, *Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties*. Soil Sci.Soc. Am. 66 2002
4. F.M Howari, P.C Goodell, and S Miyamoto, *Spectral proper-ties of salt crusts formed on saline soils*. J. Environ. Qual, 2002. **31** p. 1453–1461
5. J Farifteh, A Bouma, and van der Meijde, *A new approach in the detection of salt affected soils: integrating surface and subsurface measurements*. 2004: p. 59
6. D.C. Weindorf, et al., *Direct soil gypsum quantification via portable x-ray fluorescence spectrometry*. Soil Sci. Soc. Am. J, 2013. **77 (2013)**: p. 2071–2077
7. Ting-Ting Zhanga, *Detecting soil salinity with MODIS time series*. VI data, 2015
8. D. B. Lobell, et al., *Regional-Scale Assessment of Soil Salinity in the Red River Valley Using Multi-Year MODIS EVI and NDVI*. Journal of Environmental Quality, 2010. **39**: p. 35-41
9. Shahbaz Khan Akhtar Abbas, Nisar Hussain, Munir A. Hanjra, Saud Akbar *Characterizing soil salinity in irrigated agriculture using a remote sensing approach*. 2011
10. K Gobinath K Narmada, G Bhaskaran, *Monitoring and evaluation of soil salinity in terms of spectral response using geoinformatics in Cuddalore environs*. International Journal of Geomatics and Geosciences, 2015. **5(4)**: p. 536-543
11. Weicheng Wu, et al., *Mapping soil salinity changes using remote sensing in Central Iraq*. Geoderma Regional, 2014. **2-3**: p. 21-31.10.1016/j.geodrs.2014.09.002
12. F Evans and P Caccetta, *Broad-scale spatial prediction of areas at risk from dryland salinity*. Cartography, 2000. **29(33–40)**
13. R. S. Dwivedi, *Soil Resources Mapping: A Remote Sensing Perspective*. Remote Sensing Reviews, 2001. **20**: p. 89-122
14. B. Mougenot, M. Pouget, and G.F. Epema, *Remote Sensing of Salt Affected Soils*. Remote Sensing Reviews, 1993. **7**: p. 241-259
15. M Mulders, *Remote sensing in soil science. development in soil science*. Amsterdam, The Netherlands. 1987: p. 379
16. N. H. Abu-Hamde and R. C. Reeder, *Soil thermal conductivity effects of density, moisture, salt concentration, and organic matter*. Soil Sci. Soc. Amer. J. (SSSAJ), 2000. **64**: p. 1285–1290

17. Jingwei Wu, et al., *Remote Sensing Monitoring of Changes in Soil Salinity: A Case Study in Inner Mongolia, China*. *Sensors*, 2008. **8**(11): p. 7035-7049.10.3390/s8117035
18. Elhaddad and L. Garcia, *Detecting Soil Salinity Levels in Agricultural Lands Using Satellite Imagery*. Proceedings of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, 2006
19. R. Setia, *Severity of Salinity Accurately Detected and Classified on a Paddock Scale with High Resolution Multispectral Satellite Imagery*. *Land Degradation & Development*, 2011. **24**: p. 375-384
20. Luis Garcia, Ahmet Eldeiry, and Ayyman Elhaddad, *Estimating soil salinity using remote sensing data*. .
21. Dutkiewicz, *Evaluating Hyperspectral Imagery for Mapping the Surface Symptoms of Dryland Salinity*. 2006
22. R.N Clark, et al., *earth and planetary remote sensing with theUSGS Tetracorder and expert systems*. 2003. **108**: p. 5131
23. P.T Hick, Russell, and W.G.R, *Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity*. 1990. **28**: p. 417–431
24. G Taylor and R Dehaan, *Salinity mapping with hyperspectral imagery*. 2000
25. J. Farifteh, et al., *Quantitative analysis of salt-affected soil reflectance spectra: A comparison of two adaptive methods (PLSR and ANN)*. *Remote Sensing of Environment*, 2007. **110**(1): p. 59-78.10.1016/j.rse.2007.02.005
26. O. Satir, et al., *Soil Salinity Mapping Using Chris-Proba Hyperspectral Data*. Proceedings of Hyperspectral Workshop, 2010
27. S. Hamzeh, et al., *Mapping Salinity Stress in Sugarcane Fields with Hyperspectral Satellite Imagery*. Proceedings SPIE 8531, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIV, 2012: p. pp. 85312B-1.
28. SHAO, Hong-Bo, and Li-Ye CHU, *Plant molecular biology in China: opportunities and challenges*. *Plant Molecular Biology Reporter*, December 2005, 2005. **23**, no.4: p. 345-358
29. D. Bell, Menges, Ahmad C., and W. Van Zyl. J, *Remote Sensing of Environment*. The application of dielectric retrieval algorithms for mapping soil salinity in a tropical coastal environment using airborne polarimetric SAR, 2001. **75**: p. 375–384
30. G Taylor, et al., *Remote Sensing of Environment*. Characterization of saline soils using airborne radar imagery, 1996. **57**: p. 127–142.
31. J.A. Zinck G.I. Metternicht, *Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints*. . *remote Sensing of Environment*, 2002. **85**: p. 1-20.10.3390/su10082826
32. Kaighin A. McColl, et al., *Salinity effects on l-band microwave remote sensing of soil moisture*.

33. D. Bell, Menges, Ahmad C., and W. Van Zyl. J, *The application of dielectric retrieval algorithms for mapping soil salinity in a tropical coastal environment using airborne polarimetric SAR*. Remote Sensing of Environment, 2001. **75**: p. 375–384
34. Stogryn A., *Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water (Correspondence)*. 1971. **19**.10.1109/TMTT.1971.1127617
35. A. Dutkiewicz, M. Lewis and B. Ostendorf *Evaluation and comparison of hyperspectral imagery for mapping surface symptoms of dryland salinity*. International Journal of Remote Sensing, 2009. **30**: p. 693-719
36. Brian and Woodgate Spies, Peter, F.a.F. The Department of the Environment and Heritage; and Agriculture, *Salinity mapping methods in the Australian context*.2005
37. William J. Wilson and, et al., *Passive active {L-} and S-band (PALS)microwave sensor for ocean salinity and soil moisture measurements*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001. **39**(5): p. 1039-1048.10.1109/36.921422
38. C.W. and Wiegand Robbins, C.L. , *Field and laboratory measurements Agricultural Salinity Assessment and Management*. Vol. 71. 1990: Agricultural Salinity Assessment and Management
39. Trương Thị Hòa Bình, Phạm Việt Hòa, and và nnk, *Ứng dụng viễn thám đa thời gian đánh giá biến động rừng tràm và quỹ đất than bùn do nguyên nhân cháy rừng tại Vườn Quốc gia U Minh Thượng*. Đề tài cấp Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam năm 2003 – 2005. Viện Địa lý, Viện KH&CN VN., 2005
40. Nguyễn Vũ Giang, Phạm Việt Hòa, and và nnk, *Đánh giá biến động lớp phủ các tỉnh ven biển đồng bằng sông Cửu Long bằng công nghệ viễn thám - GIS, giai đoạn 2005-2010*. Tuyển tập báo cáo Hội nghị Địa lý toàn quốc lần thứ VI, tháng 9/2012, 2012
41. Nguyễn Vũ Giang, Phạm Việt Hòa, and và nnk, *Land cover classification and change detection in Ngoc Hien, Ca Mau using multi-temporal satellite images*. Technical report, IUCN & STI., 2015
42. Phạm Việt Hòa and và nnk, *Nghiên cứu xây dựng hệ thống thông tin phục vụ quản lý giám sát lớp phủ rừng Tây Nguyên bằng công nghệ viễn thám đa độ phân giải, đa thời gian*. . Báo cáo tổng hợp đề tài, Chương trình Tây Nguyên 3., 2016
43. Phạm Ngọc Lăng, *Đề tài Chế tạo tổ hợp máy bay không người lái phục vụ nghiên cứu khoa học*. Hà Nội: Viện Công nghệ không gian - HTI. Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam., 2013
44. Phạm Việt Hòa, *Dự án điều tra cơ bản: Điều tra, xây dựng thư viện phổ phản xạ phục vụ công tác điều tra, thành lập bản đồ rừng ngập mặn từ ảnh vệ tinh*. Hanoi: Viện Công nghệ Vũ trụ, 2015
45. Vũ Văn Chất, *Sử dụng ảnh viễn thám chụp từ vệ tinh, máy bay và thiết bị bay không người lái trong bảo đảm cơ sở dữ liệu địa hình 3D đa tỷ lệ*. Báo cáo tại hội thảo Công nghệ Vũ trụ và Ứng dụng, Hà Nội, 2015

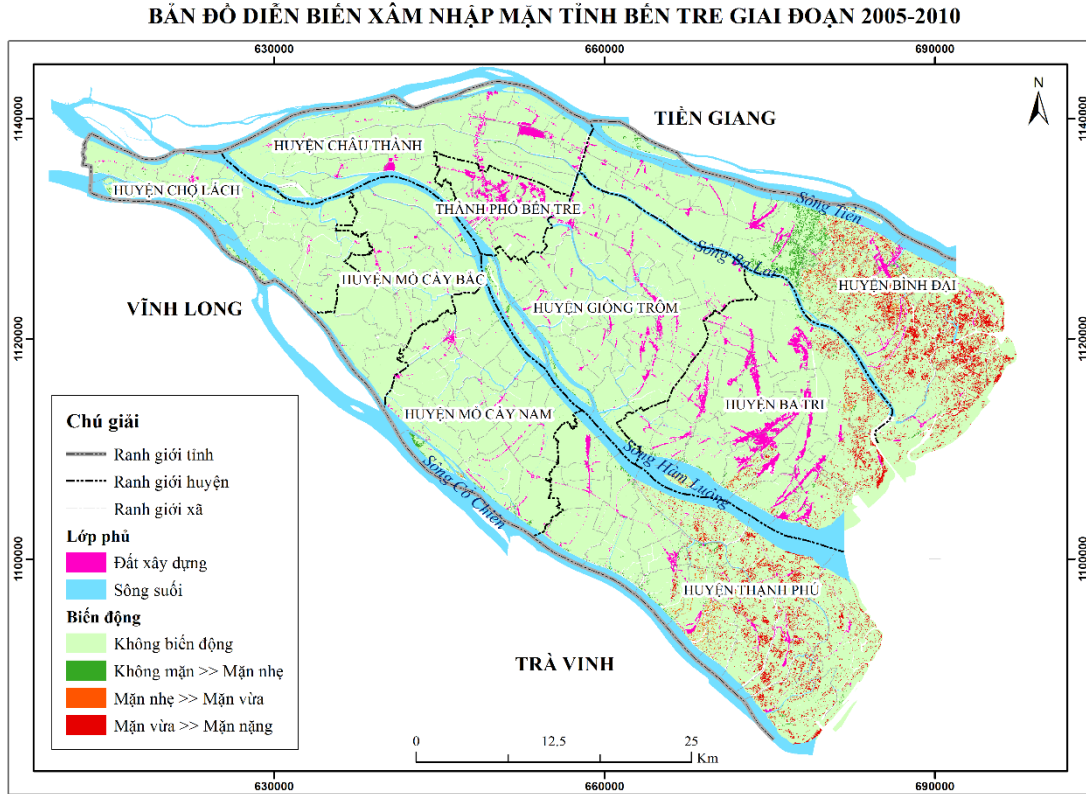
46. Võ Chí Mỹ, *Nghiên cứu khả năng ứng dụng máy bay không người lái (UAV) trong công tác thành lập bản đồ tỷ lệ lớn và giám sát tài nguyên môi trường*. In: Tuyển tập HNKH Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ (2014) Hà Nội., 2014
47. Trần Minh Văn, *Nghiên cứu thiết kế chế tạo hệ phổ kế phản xạ của các đối tượng tự nhiên trên mặt đất ở dải phổ nhìn thấy và hồng ngoại gần*. Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ, Viện Vật lý và Điện tử, Viện KH&CN VN, 2008
48. Doãn Minh Chung and và nnk, *Ứng dụng phổ kế siêu cao tần nghiên cứu phổ phát xạ tự nhiên theo chu kỳ phát triển sinh học của đồng lúa nước, làm cơ sở đánh giá năng suất một vài giống lúa phổ biến ở đồng bằng Bắc bộ*. Báo cáo tổng kết đề tài khoa học và công nghệ, Viện Công nghệ Vũ trụ, Viện KH&CN VN, 2011
49. Trần Minh Ý and và nnk, *Nghiên cứu cơ sở khoa học cho ứng dụng tư liệu ảnh vệ tinh nhỏ trong quản lý đới bờ*. Đề tài cấp Viện Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Công nghệ Vũ trụ, Viện KH&CN VN, 2009
50. Hồ Thị Vân Trang and và nnk, *Nghiên cứu phương pháp xây dựng thư viện phổ ảnh vệ tinh độ phân giải cao về một số đối tượng lớp phủ bề mặt phục vụ cho giám sát tài nguyên và môi trường tại Việt Nam*. Trung tâm Viễn thám Quốc gia, Báo cáo kết quả đề tài nghiên cứu khoa học và phát triển công nghệ., 2012
51. Huỳnh Thị Minh Hằng and Nguyễn Hoàng Anh, *Ứng dụng Geoinformatics trong công tác quản lý lưu vực sông Sài Gòn – Đồng Nai – Một số kết quả đánh giá ban đầu*. Tạp chí Phát triển KH&CN, Môi trường và Tài nguyên, 2006. **9**
52. Nguyễn Đình Tài, *Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS theo dõi diễn biến xâm nhập mặn dải ven biển thành phố Hải Phòng*. Báo cáo khoa học, Khoa Địa lý, Đại học Khoa học Tự nhiên, ĐHQG Hà Nội., 2006
53. Dương Thị Phương Khanh, *Hiện trạng xâm nhập mặn và giải pháp ứng phó cho người dân ở huyện Thạnh Phú, tỉnh Bến Tre*. Luận văn tốt nghiệp đại học, 2011
54. Trần Thị Phương Dung, *Ứng dụng ảnh viễn thám MODIS phân vùng ảnh hưởng xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre năm 2012*. Khóa luận tốt nghiệp, 2013
55. Nguyễn Duy Liêm, *Dự đoán đất nhiễm mặn bằng viễn thám và thống kê không gian trên nền GIS: nghiên cứu tại Tiền Giang*. Khóa luận tốt nghiệp, 2010
56. FAO, *Irrigation Water Management*. Roma, Italy. 1985
57. Szabolcs I. & Darab K., *Accumulation and dynamism of silicic acid in irrigated alkali (“szik”) soils*. Acta Agronomy, Academy of Sciences, Hungary 1974. **8**: p. 213-235
58. Rich Koenig Jan Kotuby-Amacher, Boyd Kitchen, *Salinity And Plant Tolerance*. Utah State University Extension, 2000
59. FAO, *The use of saline waters for crop production*. FAO irrigation and drainage paper 48, 1992

60. Jascha Muller, *Indirect soil salinity detection in irrigated areas using earth observation methods*, in *Faculty of Science*. Stellenbosch University, 2017
61. S. Teggi, *SPOT 5 Imagery for Soil Salinity Assessment in Iraq*. Proceedings of SPIE—Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications III. **8538**, **2012**: p. 85380V-85380V-12
62. T. Schmid, M. Koch, and J. Gumuzzio, *Application of Hyperspectral Imagery to Soil Salinity Mapping*. 2008
63. Z. E Mashimbye, et al., *Model-Based Integrated Methods for Quantitative Estimation of Soil Salinity from Hyperspectral Remote Sensing Data: A Case Study of Seffected South African Soils*. . *Pedosphere*. 22(5): 640-649., 2012
64. J. H. Everitt, et al., *Detecting saline soils with video imagery*. *Photogramm. Eng. Remote Sensing* 1988. **54**: p. 1283–1287
65. D. P. Shrestha and A. Farshad, *Mapping Salinity Hazard: An Integrated Application of Remote Sensing and Modeling-Based Techniques*. *Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management*, 2008. **Chapter 13** p. 257
66. M.F Baumgardner, et al., *Reflectance properties of soils*. *Adv. Agron.*, 38: 1-44. , 1985
67. G. I Metternicht and J. A Zinck, *Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces*
International Journal of Remote Sensing, 1997. **18**: p. 2571–2586
68. Fernandez-Buces N, et al., *Mapping Soil Salinity Using a Combined Spectral Response Index for Bare Soil and Vegetation: A Case Study in the Former Lake Texcoco, Mexico*. *Journal of Arid Environments*, 2006. **65(4)**: p. 644-667
69. Amal Med-hut Abdul-Qadir and Thair Jirjees Benni, *Monitoring and evaluation of soil salinity in term of spectral response using Landsat images and GIS in Mesopotamian plain / Iraq*. *Journal of Iraqi desert studies*, 2010. **2, No.2**
70. E.P Glenn, J.J. Brown, and E. Blumwald, *Salt tolerance and crop potential of halophytes*. *Crit. Rev. Plant Sci*. 18:227–255., 1999
71. G. Metternicht, *Analysing the relationship between ground based reflectance and environmental indicators of salinity processes in the Cochabamba Valleys (Bolivia)*. . *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 1998. **359–370**: p. 24
72. D. B. Lobell, et al., *Identification of Saline Soils with Multiyear Remote Sensing of Crop Yields*. *Soil Science Society of America Journal*, 2007. **71**: p. 777-783
73. Graciela Metternicht and J. Alfred Zinck, *Remote Sensing of Soil Salinization. Impact on Land Management*. 2009: Taylor & Francis Group

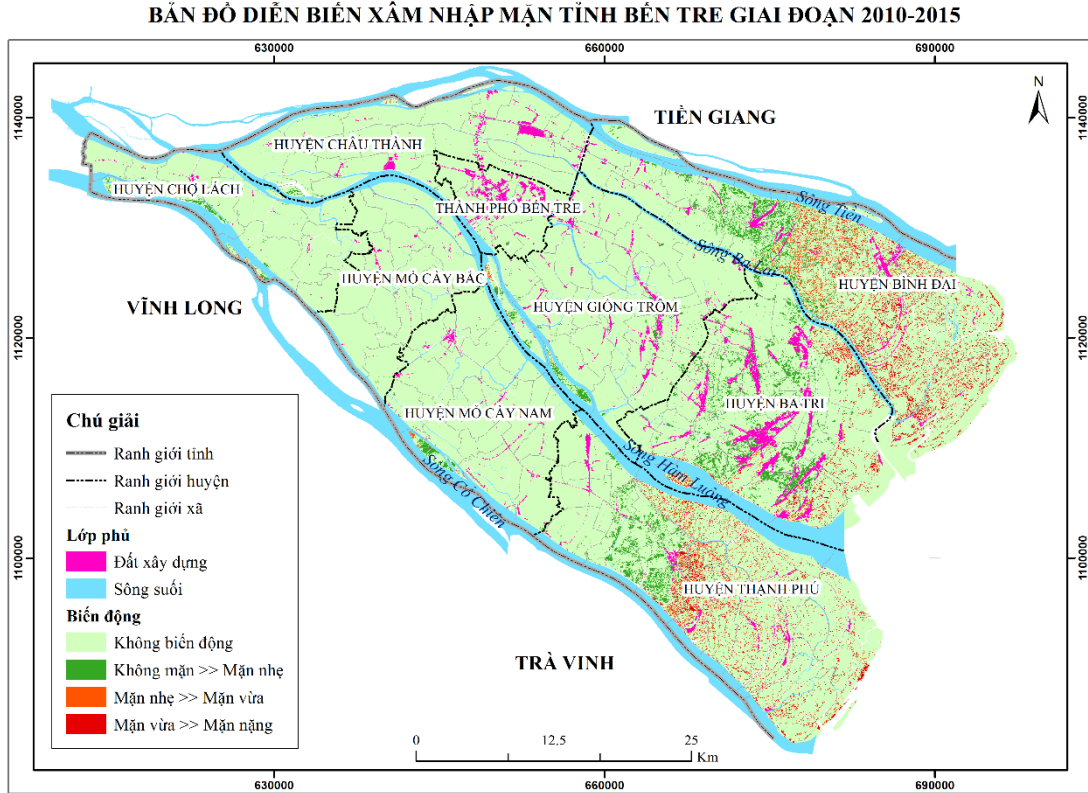
74. Fares and Goodell Howari, Philip and SA, Miyamoto, *Spectral Properties of Salt Crusts Formed on Saline Soils*. Journal of environmental quality, 2002. **31**: p. 53-61
75. J. Wu, et al., *Remote Sensing Monitoring of Changes in Soil Salinity: A Case Study in Inner Mongolia, China*. Sensors (Basel), 2008. **8**(11): p. 7035-7049.10.3390/s8117035
76. D Nagesh Kumar, *Remote Sensing: Introduction and Basic Concepts. Spectral reflectance curves*.
77. Mohamed Elhag, *Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia*. Journal of Sensors, 2016. **2016**: p. 1-8.10.1155/2016/7596175
78. Bộ Tài nguyên Môi trường, *Bản đồ số độ cao DEM*. 2009
79. Sở TNMT tỉnh Bến Tre, *Kịch bản Biến đổi khí hậu tỉnh Bến Tre 2021 - 2030*. 2021
80. Sở Tài nguyên Môi trường tỉnh Bến tre, *Đồ án Quy hoạch cấp nước nông thôn trên địa bàn tỉnh Bến Tre đến năm 2020 và định hướng đến năm 2030*. 2018
81. B-SWAMP, *Báo cáo khảo sát chuẩn bị cho dự án quản lý nước tỉnh Bến Tre*. 2016
82. Bộ NN&PTNT Phân viện Quy hoạch thiết kế nông nghiệp miền Nam, *Bản đồ thổ nhưỡng tỉnh Bến Tre*. 2004
83. Sở Tài nguyên Môi trường tỉnh Bến Tre, *Kịch bản Biến đổi khí hậu tỉnh Bến Tre*. 2020
84. Mahdi and Hasanlou Taghadosi, Mahdi and Eftekhari, Kamran, *Soil salinity mapping using dual-polarized SAR Sentinel-1 imagery*. International Journal of Remote Sensing, 2018. **40**: p. 237-252.10.1080/01431161.2018.1512767
85. Michael Patrick Allen, *Understanding Regression Analysis*. Washington State University Pullman, 1997
86. Xingwang Fan, Yongling Weng, and Jinmei Tao, *Towards decadal soil salinity mapping using Landsat time series data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016. **52**: p. 32-41.10.1016/j.jag.2016.05.009
87. Allbed Amal, Kumar Lalit, and Sinha Priyakant, *Soil salinity and vegetation cover change detection from multi-temporal remotely sensed imagery in Al Hassa Oasis in Saudi Arabia*. Geocarto International, 2017: p. 1-17.10.1080/10106049.2017.1303090
88. Bạch Thanh. *Bến Tre: Hệ thống thủy lợi sẽ dần hoàn thiện*. 2018; Available from: <https://baotainguyenmoitruong.vn/moi-truong/ben-tre-he-thong-thuy-loi-se-dan-hoan-thien-1263422.html>.

PHỤ LỤC

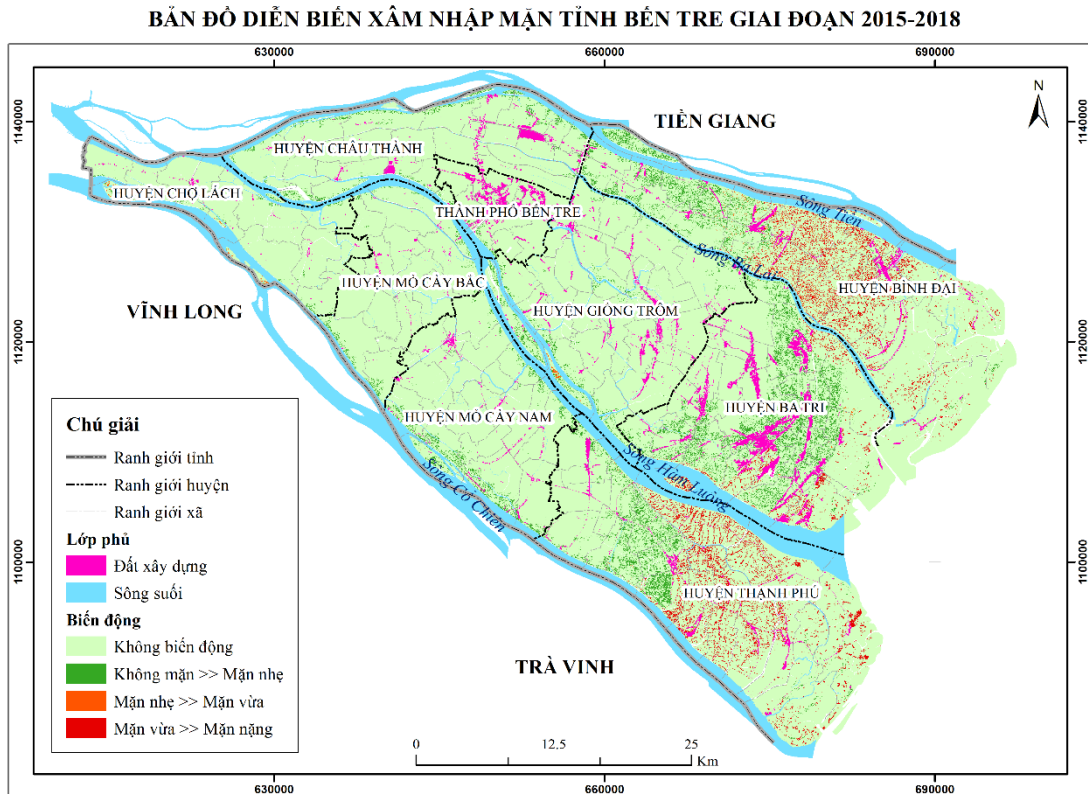
Phụ lục 1. Bản đồ diễn biến xâm nhập mặn tại Bến Tre



Hình 4. 1. Bản đồ diễn biến xâm nhập mặn tại Bến Tre, giai đoạn 2005 - 2010

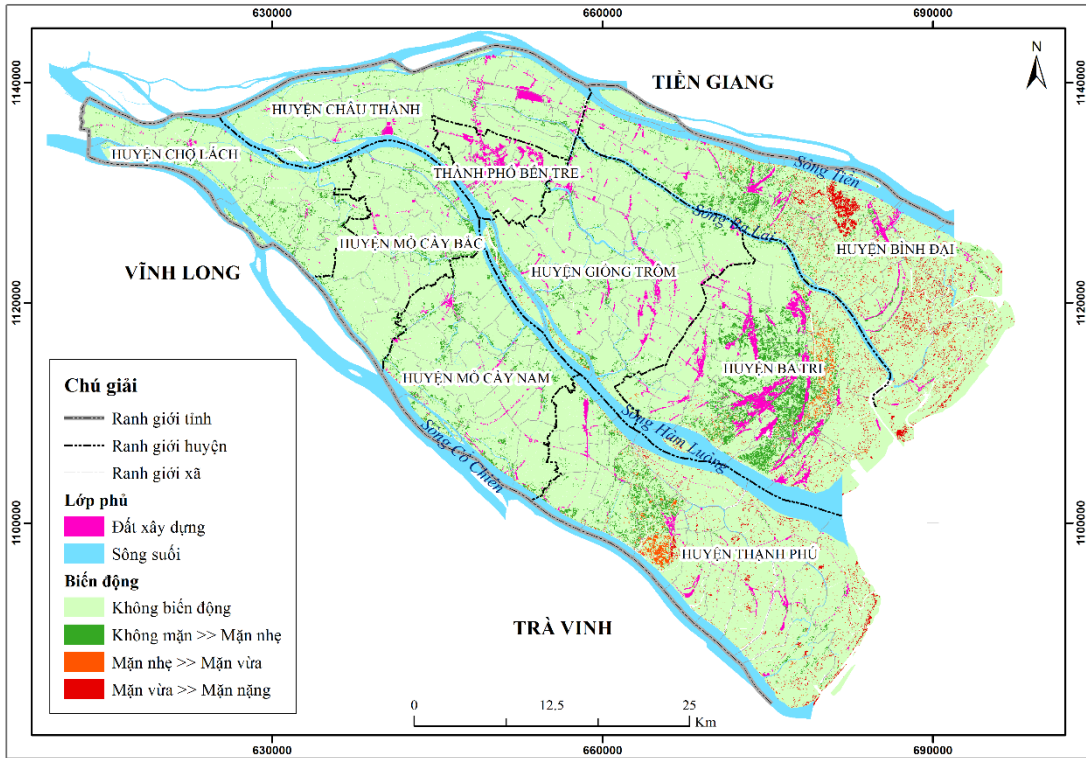


Hình 4. 2. Bản đồ diễn biến xâm nhập mặn tại Bến Tre, giai đoạn 2010 - 2015

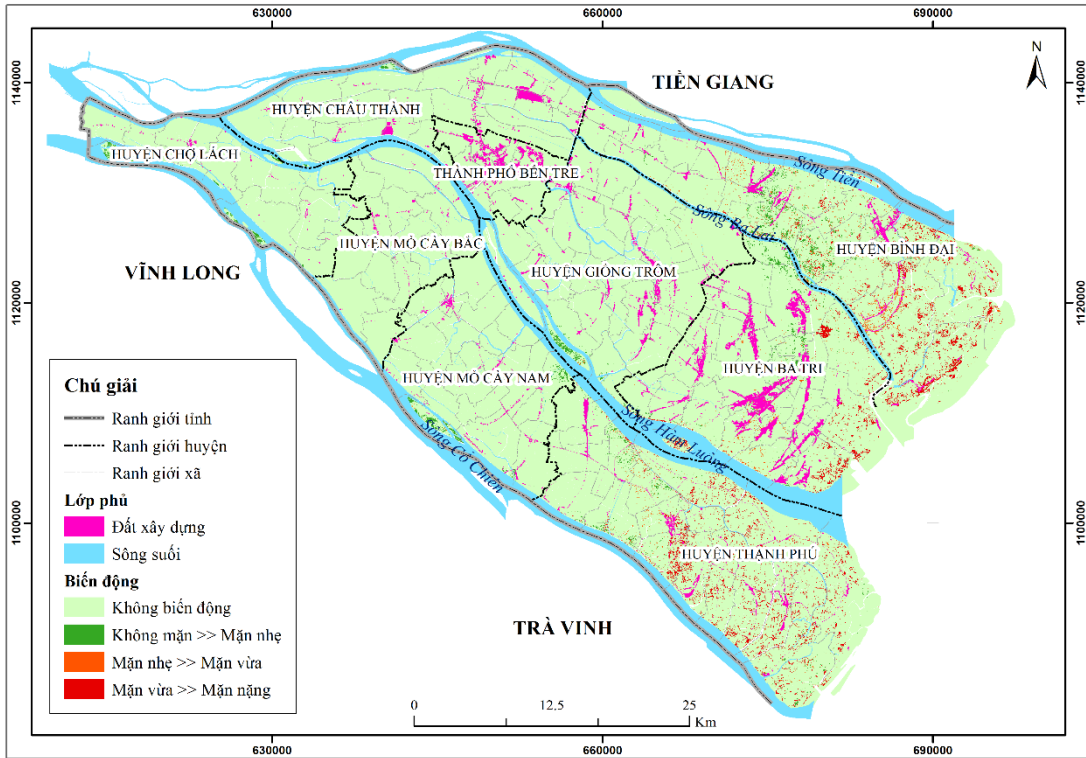


Hình 4. 3. Bản đồ diễn biến xâm nhập mặn tại Bến Tre, giai đoạn 2015 – 2018

BẢN ĐỒ DIỄN BIẾN XÂM NHẬP MẶN TỈNH BẾN TRE GIAI ĐOẠN 2018-2020



BẢN ĐỒ DIỄN BIẾN XÂM NHẬP MẶN TỈNH BẾN TRE GIAI ĐOẠN 2020-2022



Phụ lục 2: Các tham số của đất được phân tích trong phòng thí nghiệm

STT	Loại lớp phủ	Vị trí	EC ($\mu\text{S/cm}$)	PH	Hàm lượng muối (mg/l)	Coarse_san	Fine_sand	Rich_soil	Clay
1	Lúa 3 vụ	ấp Bình Thuận, xã Tân Thanh, huyện Giồng Trôm	2400	5.320	1536	9.174	56.337	28.839	5.650
2	Lúa tôm	ấp Thanh Tân, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	5100	4.010	3264	0.000	8.699	81.855	9.446
3	Lúa tôm	ấp Thanh Tân, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	5000	4.060	3200	0.000	1.480	77.738	20.782
4	Lúa 1 vụ	ấp Thanh Bình, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	3400	2.490	2176	0.785	21.885	71.492	5.838
5	Lúa 1 vụ	ấp Thanh Bình, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	900	3.440	576	0.000	7.151	85.717	7.132
6	Lúa 1 vụ	ấp Thanh Bình, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	2700	3.180	1728	0.000	1.941	93.270	4.789
7	Đất trồng cây lâu năm	ấp Mỹ Sơn Tây, xã Phú Sơn, huyện Chợ Lách	200	4.960	128	0.742	28.818	66.781	3.659

8	Lúa 1 vụ	ấp Thanh Bình, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	3000	3.280	1920	2.105	32.601	61.346	3.948
9	Hoa màu	ấp Thanh Quý B, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	5400	5.320	3456	16.771	32.443	45.989	4.797
10	Bãi biển	ấp Thanh Thới B, xã Thạnh Hải, huyện Thạnh Phú	2100	5.970	1344	31.463	67.457	1.080	0.000
11	Rừng ngập mặn	ấp Thanh Thới Đông, xã Thạnh Hải, huyện Thạnh Phú	12000	6.690	7680	6.414	13.405	68.165	12.016
12	Đất trồng cây lâu năm	ấp Phú hòa, xã Hưng Khánh Trung B, huyện Chợ Lách	100	4.310	64	2.187	25.116	69.838	2.859
13	Lúa tôm	ấp An Bình, xã An Quy, huyện Thạnh phú	8100	2.640	5184	0.106	64.717	33.968	1.209
14	Lúa 1 vụ	ấp Thanh Quý B, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	11300	4.470	7232	4.517	28.384	55.480	11.619
15	Lúa 2 vụ	ấp Thanh Quý B, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	1900	2.590	1216	0.000	3.938	87.902	8.160
16	Lúa 2 vụ	ấp Thanh Quý B, xã Bình Thạnh, huyện Thạnh Phú	5900	2.780	3776	0.889	11.760	73.500	13.851

17	Lúa 1 vụ	ấp Thạnh Trị Thượng, thị trấn Thạnh Phú, huyện Thạnh Phú	4400	3.080	2816	4.539	13.003	74.515	7.943
18	Lúa tôm	ấp An Bình, xã Mỹ An, huyện Thạnh phú	4300	3.630	2752	0.000	4.070	93.862	2.068
19	Lúa 2 vụ	ấp Giồng Gạch, xã An Hiệp, huyện Ba Tri	1000	4.630	640	4.522	9.425	77.486	8.567
20	Nuôi trồng thủy hải sản	ấp Giồng Ao, xã An Hiệp, huyện Ba Tri	4600	5.110	2944	0.681	21.335	67.305	10.679
21	Hoa màu	ấp An Phú, xã An Hòa Tây, huyện Ba Tri	1600	6.520	1024	33.279	52.704	13.516	0.501
22	Lúa 3 vụ	ấp An Bình 1, xã An Hòa Tây, huyện Ba Tri	7900	4.560	5056	0.000	10.802	74.185	15.013
23	Đất trồng cây lâu năm	ấp Phú hòa, xã Hưng Khánh Trung B, huyện Chợ Lách	100	4.100	64	57.657	25.849	15.369	1.125
24	Bãi cát	ấp An Thới, xã An Thủy, huyện Ba Tri	4600	7.990	2944	11.785	80.008	8.207	0.000
25	Đất làm muối	ấp An Bình, xã An Thủy, huyện Ba Tri	16200	7.790	10368	0.000	4.823	81.931	13.246

26	Lúa 3 vụ	ấp An Thuận, xã An Bình Tây, huyện Ba Tri	2300	4.980	1472	0.298	22.894	55.127	21.681
27	Lúa 3 vụ	xã Phú Ngãi, huyện Ba Tri	1300	4.150	832	0.000	11.980	71.225	16.795
28	Lúa 2 vụ	ấp Thạnh Lợi, xã Bảo Thạnh, huyện Ba Tri	19700	3.940	12608	18.301	34.715	39.556	7.428
29	Đất làm muối	ấp Thạnh Lợi, xã Bảo Thạnh, huyện Ba Tri	28000	3.840	17920	0.296	22.134	63.556	14.014
30	Đất trồng cây lâu năm	ấp Tân Trung, xã Hưng Khánh Trung B, huyện Chợ Lách	500	3.800	320	2.877	78.110	18.635	0.378
31	Đất trồng cây lâu năm	ấp Tân Phú, xã Tân Mỹ, huyện Ba Tri	1300	6.060	832	0.000	6.129	90.759	3.112
32	Đất trồng cây lâu năm	ấp Tân Phú, xã Tân Mỹ, huyện Ba Tri	400	3.870	256	0.000	2.538	88.767	8.695
33	Đất trồng cây lâu năm	ấp Tân Phú, xã Tân Mỹ, huyện Ba Tri	700	3.360	448	1.224	11.872	86.721	0.183
34	Lúa 3 vụ	ấp Bình Tân, xã Bình Thành, huyện Giồng Trôm	900	4.290	576	4.660	35.471	51.919	7.950

35	Lúa 3 vụ	ấp Sơn Mỹ, xã Mỹ Hòa, huyện Ba Tri	2200	4.720	1408	2.108	14.761	82.705	0.426
36	Lúa 3 vụ	ấp Sơn Mỹ, xã Mỹ Hòa, huyện Ba Tri	1700	4.670	1088	0.000	5.080	94.720	0.200
37	Rừng ngập mặn	ấp Thới An, xã Thới Thuận, huyện Bình Đại	6500	8.600	4160	44.552	38.762	16.115	0.571
38	Đất trồng cây lâu năm	ấp Trung Hiệp, xã Hưng Khánh Trung B, huyện Chợ Lách	700	3.880	448	1.110	28.655	62.099	8.136
39	Hoa màu	ấp Thừa Tiên, xã Thừa Đức, huyện Bình Đại	400	6.700	256	50.353	41.122	7.279	1.246
40	Đất trồng cây lâu năm	ấp Phú Thành, xã Phú Vang, huyện Bình Đại	1700	3.840	1088	1.703	30.240	66.742	1.315
41	Lúa 3 vụ	ấp Phú Hưng, xã Phú Thuận, huyện Bình Đại	800	5.780	512	0.000	23.168	57.768	19.064
42	Lúa 3 vụ	ấp Phú Hưng, xã Phú Thuận, huyện Bình Đại	1300	4.560	832	1.289	30.927	53.253	14.531
43	Đất trồng cây lâu năm	xã Hữu Định, huyện Châu Thành	200	4.930	128	0.000	2.198	75.863	21.939

44	Lúa 3 vụ	xã Phong Năm, huyện Giồng Trôm	1300	4.740	832	0.154	6.143	69.594	24.109
45	Lúa 3 vụ	xã Phong Năm, huyện Giồng Trôm	800	4.690	512	0.000	13.091	61.897	25.012
46	Lúa 3 vụ	ấp Bình Thuận, xã Tân Thanh, huyện Giồng Trôm	1400	4.360	896	10.502	57.841	27.585	4.072
47	Lúa 3 vụ	ấp Bình Thuận, xã Tân Thanh, huyện Giồng Trôm	2100	4.600	1344	1.981	34.547	50.947	12.525
48	Đất trồng cây lâu năm	ấp Trung Hiệp, xã Hưng Khánh Trung B, huyện Chợ Lách	400	3.240	256	11.456	63.430	23.408	1.706
49	Đất trồng cây lâu năm	xã Long Mỹ, huyện Giồng Trôm	600	3.910	384	14.596	61.491	22.509	1.404
50	Đất trồng cây lâu năm	xã Long Mỹ, huyện Giồng Trôm	500	5.900	320	2.155	51.762	45.029	1.054
51	Đất trồng cây lâu năm	ấp Thạnh Hưng, xã Trường Đa, huyện Châu Thành	1100	7.630	704	0.000	20.412	64.489	15.099
52	Đất trồng cây lâu năm	ấp Tân Đông, xã Tân Phú, huyện Châu Thành	300	3.670	192	2.307	15.299	67.320	15.074
53	Đất trồng cây lâu năm	ấp An Quy, xã Long Thới, huyện Chợ Lách	1100	4.790	704	0.000	5.736	77.203	17.061

54	Đất trồng cây lâu năm	ấp An Quy, xã Long Thới, huyện Chợ Lách	200	4.390	128	4.741	33.245	59.379	2.635
55	Đất trồng cây lâu năm	ấp An Quy, xã Long Thới, huyện Chợ Lách	100	2.980	64	0.570	7.904	82.652	8.874
56	Đất trồng cây lâu năm	ấp An Quy, xã Long Thới, huyện Chợ Lách	100	4.040	64	0.806	37.794	58.467	2.933

Phụ lục 3: Mô hình tương quan giữa EC với các chỉ số

Các mô hình tương quan đơn biến giữa EC với các chỉ số tính từ ảnh Sentinel2

Chỉ số	Kênh phổ	r	sig	Hàm tuyến tính	Hàm ln()	Hàm đa thức bậc 2
Kênh phổ	B1	-0,312	0	$y = -56.028x + 14.566$ $R^2 = 0.0976$	$y = -5.086\ln(x) - 2.8751$ $R^2 = 0.092$	$y = -688.03x^2 + 80.661x + 8.1705$ $R^2 = 0.1088$
	B2	-0,076	0	$y = -15.204x + 11.008$ $R^2 = 0.0057$	$y = -2.41\ln(x) + 3.9326$ $R^2 = 0.0135$	$y = 2337.3x^2 - 518.26x + 37.1$ $R^2 = 0.0893$
	B3	0,322	0	$y = 32.604x + 4.2689$ $R^2 = 0.1034$	$y = 4.6129\ln(x) + 18.092$ $R^2 = 0.0932$	$y = 177.45x^2 - 24.223x + 8.5304$ $R^2 = 0.1108$
	B4	-0,452	0	$y = -35.858x + 18.808$ $R^2 = 0.204$	$y = -8.616\ln(x) - 2.3243$ $R^2 = 0.2314$	$y = 170.11x^2 - 121.08x + 29.01$ $R^2 = 0.2459$
PCA	PCA1	-0,144	0	$y = -7.3147x + 8.8295$ $R^2 = 0.0209$		$y = -32.482x^2 - 11.643x + 8.9016$ $R^2 = 0.024$
	PCA2	0,479	0	$y = 41.043x + 13.887$ $R^2 = 0.2298$		$y = 189.45x^2 + 85.571x + 16.06$ $R^2 = 0.2563$
	PCA3	-0,498	0	$y = -96.461x + 5.1554$ $R^2 = 0.2482$		$y = -140.2x^2 - 106.61x + 5.0429$ $R^2 = 0.2487$

	PCA4	0,013	0.657	$y = 9.8451x + 9.486$ $R^2 = 0.0002$		$y = -15672x^2 - 99.751x + 9.9719$ $R^2 = 0.0331$
Chỉ số độ sáng	BI	-0,309	0	$y = -20.437x + 14.833$ $R^2 = 0.0953$	$y = -5.004\ln(x) + 2.6159$ $R^2 = 0.1023$	$y = 63.959x^2 - 52.919x + 18.707$ $R^2 = 0.1009$
	BI2	-0,251	0	$y = -19.952x + 15.57$ $R^2 = 0.0632$	$y = -6.487\ln(x) + 1.682$ $R^2 = 0.0886$	$y = 265.56x^2 - 176.06x + 37.753$ $R^2 = 0.1472$
Chỉ số thực vật	EVI	-0,647	0	$y = -19.625x + 13.088$ $R^2 = 0.4182$		$y = 43.034x^2 - 41.586x + 14.914$ $R^2 = 0.4767$
	GDVI	0,162	0	$y = 0.0314x + 9.3086$ $R^2 = 0.0263$		$y = -0.0002x^2 + 0.122x + 9.1016$ $R^2 = 0.0613$
	NDVI	-0,614	0	$y = -17.291x + 13.687$ $R^2 = 0.3765$		$y = 57.818x^2 - 49.27x + 16.849$ $R^2 = 0.4848$
	SAVI	-0,611	0	$y = -25.57x + 13.729$ $R^2 = 0.3734$		$y = 124.99x^2 - 73.14x + 17.01$ $R^2 = 0.4975$
Chỉ số muối	SI1	0,165	0	$y = 22.181x + 6.7011$ $R^2 = 0.0274$	$y = 2.0614\ln(x) + 13.81$ $R^2 = 0.0161$	$y = 1040.5x^2 - 243.9x + 22.718$ $R^2 = 0.0916$
	SI2	-0,242	0	$y = -18.715x + 15.519$ $R^2 = 0.0587$	$y = -6.55\ln(x) + 1.9796$ $R^2 = 0.0842$	$y = 279.35x^2 - 192.57x + 41.728$ $R^2 = 0.1593$
	SI3	0,222	0	$y = 21.929x + 5.2415$ $R^2 = 0.0492$	$y = 3.3677\ln(x) + 15.082$ $R^2 = 0.0328$	$y = 510.45x^2 - 179.6x + 24.239$ $R^2 = 0.1136$

	SI4	0,269	0	$y = 10.71x + 1.1541$ $R^2 = 0.0723$	$y = 7.3664\ln(x) + 11.412$ $R^2 = 0.0865$	$y = -74.459x^2 + 109.21x - 29.741$ $R^2 = 0.1507$
	SI5	0,616	0	$y = 17.291x + 13.687$ $R^2 = 0.3765$		$y = 57.818x^2 + 49.27x + 16.849$ $R^2 = 0.4848$
	SI6	-0,020	0.508	$y = -2.2485x + 9.8668$ $R^2 = 0.0004$	$y = -1.515\ln(x) + 6.9579$ $R^2 = 0.005$	$y = 711.01x^2 - 280.64x + 36.209$ $R^2 = 0.1024$
Kênh tỷ số	R/NIR	0,652	0	$y = 14.408x + 0.4105$ $R^2 = 0.4246$	$y = 7.5588\ln(x) + 13.334$ $R^2 = 0.3558$	$y = 25.905x^2 - 18.094x + 9.7243$ $R^2 = 0.4878$
	B/G	-0,425	0	$y = -15.17x + 22.689$ $R^2 = 0.1809$	$y = -13.15\ln(x) + 7.5521$ $R^2 = 0.1643$	$y = -76.175x^2 + 125.49x - 41.069$ $R^2 = 0.2523$
	B/NIR	0,120	0	$y = 5.1055x + 7.5677$ $R^2 = 0.0144$	$y = 1.8698\ln(x) + 11.385$ $R^2 = 0.0164$	$y = -19.37x^2 + 19.788x + 4.9696$ $R^2 = 0.019$
	B/R	-0,499	0	$y = -7.9692x + 14.355$ $R^2 = 0.2491$	$y = -6.721\ln(x) + 5.8172$ $R^2 = 0.2574$	$y = 5.7569x^2 - 18.731x + 18.439$ $R^2 = 0.2622$
	G/NIR	0,439	0	$y = 20.204x + 1.1026$ $R^2 = 0.1927$	$y = 7.1442\ln(x) + 15.932$ $R^2 = 0.1519$	$y = 99.424x^2 - 63.74x + 18.03$ $R^2 = 0.2702$
	G/R	-0,484	0	$y = -10.779x + 16.883$ $R^2 = 0.234$	$y = -9.12\ln(x) + 5.8244$ $R^2 = 0.2353$	$y = 5.8102x^2 - 21.25x + 21.153$ $R^2 = 0.2381$

Các mô hình tương quan đơn biến giữa EC với các chỉ số tính từ ảnh Landsat8

Chỉ số	Kênh phổ	r	sig	Hàm tuyến tính	Hàm ln()	Hàm đa thức bậc 2
	B1	0.528	0	$y = 54,878x + 6,5576$ $R^2 = 0,2783$		$y = -118,36x^2 + 72,609x + 6,1229$ $R^2 = 0,2824$
	B2	0.516	0	$y = 50,602x + 4,5909$ $R^2 = 0,2665$	$y = 3,907\ln(x) + 19,012$ $R^2 = 0,2299$	$y = 14,292x^2 + 47,407x + 4,7425$ $R^2 = 0,2666$
	B3	0.537	0	$y = 37,539x + 5,0136$ $R^2 = 0,2882$	$y = 3,134\ln(x) + 16,646$ $R^2 = 0,2536$	$y = -7,1276x^2 + 39,398x + 4,9167$ $R^2 = 0,2882$
	B4	-0.411	0	$y = -22,957x + 16,96$ $R^2 = 0,1685$	$y = -6,589\ln(x) + 1,9095$ $R^2 = 0,1648$	$y = -14,146x^2 - 14,13x + 15,658$ $R^2 = 0,1691$
	B5	0.194	0	$y = 10,554x + 6,7626$ $R^2 = 0,0376$	$y = 1,9111\ln(x) + 12,163$ $R^2 = 0,0223$	$y = 100,42x^2 - 41,465x + 12,957$ $R^2 = 0,0658$

B6	0.394	0	$y = 26,779x + 5,1223$ $R^2 = 0,1556$	$y = 3,5329\ln(x) + 16,162$ $R^2 = 0,1284$	$y = 121,1x^2 - 13,476x + 8,046$ $R^2 = 0,1696$
Pca1	- 0.619	0	$y = -35,54x + 15,159$ $R^2 = 0,3834$		$y = 63,129x^2 - 55,582x + 16,443$ $R^2 = 0,3939$
Pca2	0.393	0	$y = 20,648x + 8,2362$ $R^2 = 0,1548$		$y = -11,371x^2 + 21,626x + 8,2848$ $R^2 = 0,1553$
Pca3	0.305	0	$y = 88,206x + 8,2848$ $R^2 = 0,0928$		$y = -2518,1x^2 + 173,6x + 8,0686$ $R^2 = 0,1267$
Pca4	0.088	0.081	$y = 35,306x + 9,6699$ $R^2 = 0,0078$		$y = 3208,8x^2 + 73,299x + 9,4577$ $R^2 = 0,0204$
Pca5	- 0.437	0	$y = -236,84x + 8,3483$ $R^2 = 0,1906$		$y = -3704,7x^2 - 275,2x + 8,4508$ $R^2 = 0,1947$
Pca6	0.425	0	$y = 462,47x + 9,1439$ $R^2 = 0,1803$		$y = -12656x^2 + 468,74x + 9,317$ $R^2 = 0,184$

Chỉ số độ sáng	Bi	- 0.305	0	$y = -17,143x + 15,354$ $R^2 = 0,0932$	$y = -5,326\ln(x) + 3,6429$ $R^2 = 0,0972$	$y = 34,257x^2 - 39,404x + 18,786$ $R^2 = 0,0964$
	Bi2	- 0.242	0	$y = -13,775x + 14,332$ $R^2 = 0,0587$	$y = -4,568\ln(x) + 4,6087$ $R^2 = 0,066$	$y = 78,704x^2 - 66,104x + 22,613$ $R^2 = 0,0749$
	Int	0.534	0	$y = 44,051x + 4,7311$ $R^2 = 0,2851$	$y = 3,5854\ln(x) + 17,918$ $R^2 = 0,2496$	$y = 3,1322x^2 + 43,294x + 4,769$ $R^2 = 0,2851$
Kênh nhiệt	T	0.331	0	$y = 0,7063x - 8,3538$ $R^2 = 0,1099$	$y = 16,862\ln(x) - 44,911$ $R^2 = 0,11$	$y = -0,0058x^2 + 0,9879x - 11,73$ $R^2 = 0,1099$
Chỉ số thực vật	Evi	- 0.626	0	$y = -16,356x + 14,685$ $R^2 = 0,3916$	$y = -5,191\ln(x) + 2,9042$ $R^2 = 0,4342$	$y = 26,502x^2 - 35,812x + 17,57$ $R^2 = 0,4183$
	Gdvi	- 0.678	0	$y = -13,21x + 18,882$ $R^2 = 0,4597$	$y = -8,513\ln(x) + 6,1736$ $R^2 = 0,4786$	$y = 12,617x^2 - 30,416x + 24,206$ $R^2 = 0,4739$
	Ndvi	- 0.650	0	$y = -12,422x + 15,326$ $R^2 = 0,423$	$y = -5,808\ln(x) + 4,4837$ $R^2 = 0,4737$	$y = 17,071x^2 - 30,054x + 19,093$ $R^2 = 0,4567$

	Savi	- 0.654	0	$y = -17,91x + 15,335$ $R^2 = 0,4283$	$y = -5,785\ln(x) + 2,387$ $R^2 = 0,4811$	$y = 35,648x^2 - 43,681x + 19,186$ $R^2 = 0,4649$
Chi số muối	Si1	0.535	0	$y = 44,51x + 4,7236$ $R^2 = 0,2861$	$y = 3,5601\ln(x) + 17,892$ $R^2 = 0,2488$	$y = 3,9516x^2 + 43,561x + 4,7708$ $R^2 = 0,2861$
	Si2	- 0.148	0.004	$y = -8,0944x + 12,457$ $R^2 = 0,0218$	$y = -3,18\ln(x) + 6,2262$ $R^2 = 0,0312$	$y = 128,82x^2 - 98,275x + 27,52$ $R^2 = 0,0781$
	Si3	0.535	0	$y = 30,818x + 4,741$ $R^2 = 0,284$	$y = 3,6041\ln(x) + 16,681$ $R^2 = 0,2501$	$y = 1,1458x^2 + 30,424x + 4,7691$ $R^2 = 0,284$
	Si4	0.159	0.002	$y = 1,1217x + 8,8454$ $R^2 = 0,0253$		$y = -5,3597x^2 + 1,274x + 12,259$ $R^2 = 0,1962$
	Si5	0.650	0	$y = 12,422x + 15,326$ $R^2 = 0,423$		$y = 17,071x^2 + 30,054x + 19,093$ $R^2 = 0,4567$
	Si6	0.361	0	$y = 26,751x + 4,4458$ $R^2 = 0,1304$	$y = 4,037\ln(x) + 16,422$ $R^2 = 0,1129$	$y = 99,778x^2 - 10,965x + 7,719$ $R^2 = 0,1426$

Kênh tỷ số	B/G	0.483	0	$y = 9,2985x + 5,0116$ $R^2 = 0,2329$		$y = 6,5103x^2 + 3,8949x + 5,8234$ $R^2 = 0,2415$
	B/NIR	0.637	0	$y = 21,259x + 5,8388$ $R^2 = 0,4057$		$y = -0,1052x^2 + 21,305x + 5,8356$ $R^2 = 0,4057$
	B/R	0.365	0	$y = 8,249x + 6,1943$ $R^2 = 0,1331$		$y = -10,888x^2 + 16,531x + 4,9641$ $R^2 = 0,1503$
	B/SWIR1	0.562	0	$y = 16,739x + 6,177$ $R^2 = 0,3161$		$y = -8,167x^2 + 21,91x + 5,6207$ $R^2 = 0,3236$
	B/SWIR2	0.486	0	$y = 10,336x + 6,3228$ $R^2 = 0,2357$		$y = -2,1401x^2 + 12,218x + 6,0225$ $R^2 = 0,2374$
	G/R	- 0.391	0	$y = -6,3787x + 15,121$ $R^2 = 0,153$	$y = -6,804\ln(x) + 8,4428$ $R^2 = 0,1502$	$y = 1,6956x^2 - 10,476x + 17,315$ $R^2 = 0,1562$
	G/NIR	0.697	0	$y = 20,959x + 2,9819$ $R^2 = 0,4858$	$y = 4,7327\ln(x) + 15,578$ $R^2 = 0,3969$	$y = 22,186x^2 + 6,638x + 4,8971$ $R^2 = 0,4986$

G/SWIR1	0.573	0	$y = 18,252x + 2,674$ $R^2 = 0,3284$	$y = 6,5023\ln(x) + 16,247$ $R^2 = 0,3069$	$y = -8,6539x^2 + 26,646x + 0,8823$ $R^2 = 0,3364$
G/SWIR2	0.344	0	$y = 8,1778x + 4,588$ $R^2 = 0,1182$	$y = 4,7057\ln(x) + 12,073$ $R^2 = 0,1059$	$y = 3,3343x^2 + 3,3514x + 6,1889$ $R^2 = 0,1211$
R/NIR	- 0.275	0	$y = -0,1879x + 10,047$ $R^2 = 0,0754$	$y = -0,246\ln(x) + 9,5802$ $R^2 = 0,0063$	$y = 0,0057x^2 - 0,4962x + 10,714$ $R^2 = 0,1142$
R/SWIR1	0.659	0	$y = 15,804x + 2,3818$ $R^2 = 0,4337$	$y = 5,0719\ln(x) + 13,979$ $R^2 = 0,3513$	$y = -2,2665x^2 + 18,103x + 1,8693$ $R^2 = 0,4349$
R/SWIR2	0.545	0	$y = 10,602x + 1,9676$ $R^2 = 0,2967$	$y = 5,5712\ln(x) + 11,69$ $R^2 = 0,2483$	$y = -0,687x^2 + 11,656x + 1,5946$ $R^2 = 0,297$
NIR/SWIR1	- 0.434	0	$y = -3,6848x + 14,464$ $R^2 = 0,188$	$y = -5,949\ln(x) + 10,962$ $R^2 = 0,2182$	$y = 3,4411x^2 - 15,044x + 22,764$ $R^2 = 0,2526$
NIR/SWIR2	- 0.483	0	$y = -1,5713x + 13,159$ $R^2 = 0,2329$	$y = -4,871\ln(x) + 13,083$ $R^2 = 0,2989$	$y = 0,6261x^2 - 5,7111x + 18,467$ $R^2 = 0,3231$

	SWIR1/SWIR2	- 0.628	0	$y = -9,6386x + 25,415$ $R^2 = 0,395$	$y = -17,23\ln(x) + 17,938$ $R^2 = 0,4255$	$y = 10,693x^2 - 47,5x + 58,052$ $R^2 = 0,4578$
--	-------------	------------	---	--	---	--

Phụ lục 4: Diện tích đất mặn qua các năm (ha)

Bảng Thống kê diện tích đất mặn của tỉnh Bến Tre qua các năm (ha)

Độ mặn	2005	2010	2015	2018	2020	2022
Không mặn	147,071.49	146,348.30	136,035.46	131,246.65	129,110.51	136,086.7
Mặn nhẹ	5,035.02	6,241.29	7,856.75	13,205.00	15,880.48	12,683.44
Mặn vừa	10,334.28	7,523.86	9,359.77	7,674.94	10,890.26	15,333.38
Mặn nặng	39,413.18	41,740.53	48,601.99	49,727.37	45,972.71	37,750.44

Bảng biến động đất mặn tỉnh Bến Tre giai đoạn 2005-2022 (ha)

	2022			
2005	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Không mặn	135,359.36	8,002.08	2,822.15	917.85
Mặn nhẹ	243.82	3,227.58	1,197.88	450.23
Mặn vừa	120.30	1,511.55	3,554.97	5,535.14
Mặn nặng	50.93	1,384.19	3,810.17	33,826.24

Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2005 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	13.362,95	46,35	14,58	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	15.075,39	21,69	-	-
Huyện Châu Thành	19.163,02	37,53	-	-
Thành phố Bến Tre	5.096,66	5,40	-	-
Huyện Mỏ Cày Nam	19.861,08	107,55	-	-
Huyện Thạnh Phú	12.890,72	2.072,97	3.422,16	17.075,79
Huyện Bình Đại	12.755,70	1.984,77	5.132,34	12.785,58
Huyện Giồng Trôm	28.393,54	68,04	-	-
Huyện Ba Tri	21.461,86	665,01	1.233,81	6.035,49

Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2010 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	13.344,75	172,08	32,85	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	15.071,13	46,26	0,36	-
Huyện Châu Thành	19.108,26	129,69	52,65	-
Thành phố Bến Tre	5.094,90	24,48	-	-
Huyện Mỏ Cày Nam	19.857,24	157,86	24,12	4,95
Huyện Thạnh Phú	12.802,77	2.040,30	2.650,05	17.756,10
Huyện Bình Đại	12.538,35	2.769,93	3.579,30	14.439,42
Huyện Giồng Trôm	27.290,70	171,72	7,92	14,85
Huyện Ba Tri	21.284,10	676,98	1.123,47	6.174,99

Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2015 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	12.852,18	244,35	325,89	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	15.063,12	11,16	-	-
Huyện Châu Thành	19.074,60	53,37	120,96	-
Thành phố Bến Tre	5.065,11	21,33	-	-
Huyện Mỏ Cày Nam	19.598,94	245,25	62,91	-
Huyện Thạnh Phú	11.019,15	1.456,11	3.022,56	19.595,07
Huyện Bình Đại	10.003,40	2.462,58	4.031,78	17.839,71
Huyện Giồng Trôm	26.615,97	518,40	125,01	32,76
Huyện Ba Tri	18.558,81	2.563,29	1.114,20	6.919,92

Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2018 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	12.916,71	191,25	458,37	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	14.908,59	186,30	-	-
Huyện Châu Thành	18.578,70	533,88	132,57	-
Thành phố Bến Tre	5.040,72	46,98	-	-
Huyện Mỏ Cày Nam	19.281,06	665,37	48,87	1,08
Huyện Thạnh Phú	9.845,46	2.757,60	1.287,18	21.368,70
Huyện Bình Đại	8.625,96	4.118,85	3.135,06	17.916,35
Huyện Giồng Trôm	26.533,35	592,11	213,03	90,27
Huyện Ba Tri	17.563,50	3.810,15	698,76	7.130,16

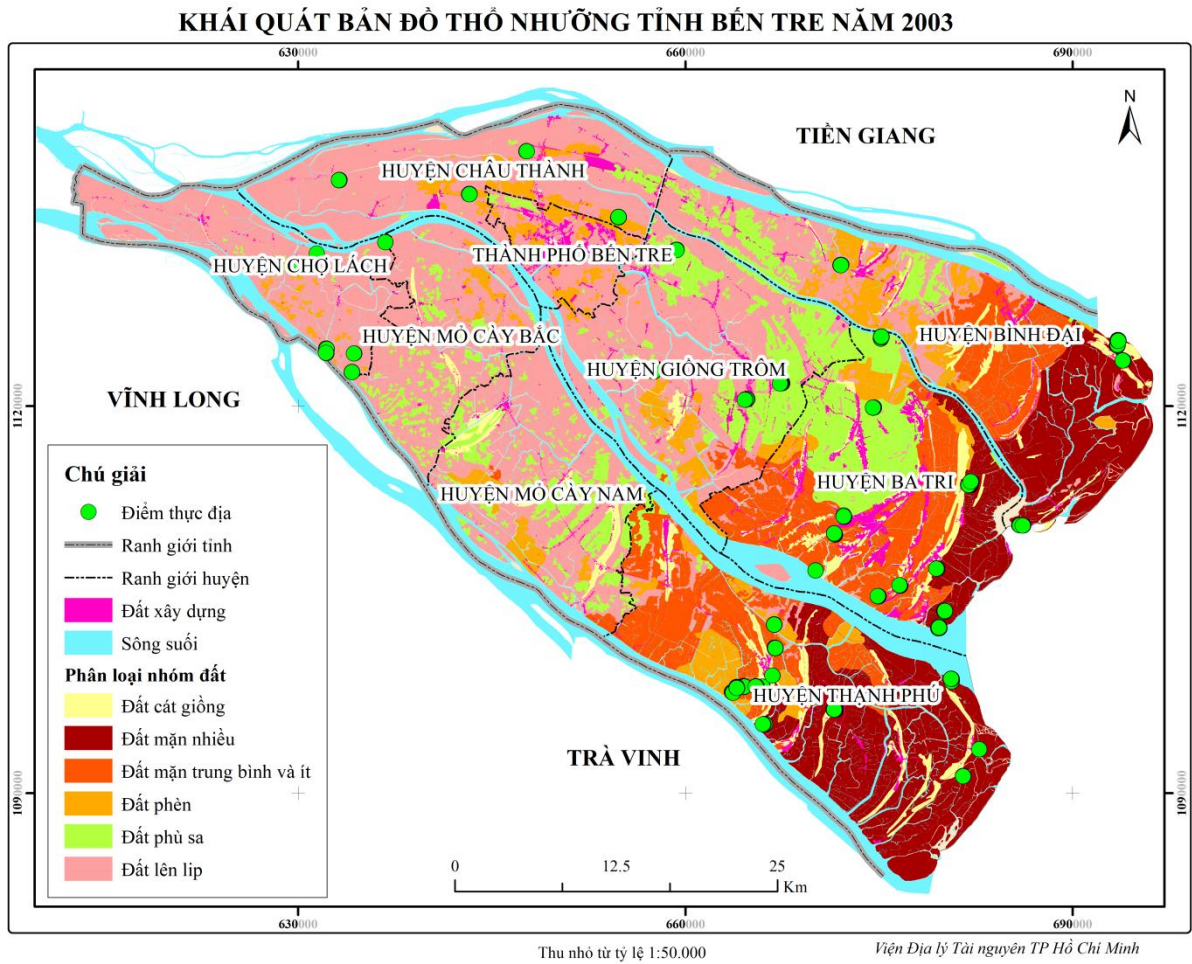
Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2020 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	12.843,18	350,3	159,18	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	14.869,6	454,2	56,6	-
Huyện Châu Thành	18.658,17	611,3	261,1	-
Thành phố Bến Tre	5.007	114,9	20,1	-
Huyện Mỏ Cày Nam	18.458,68	1.179,3	117,25	-
Huyện Thạnh Phú	8.807,04	3.045,2	2.340,3	16.480,7
Huyện Bình Đại	7.600,247	5.144,835	6.330,399	20.390,25
Huyện Giồng Trôm	26.533,88	889,7	770,3	86,7
Huyện Ba Tri	16.736,53	4.016,86	848,65	8.066,09

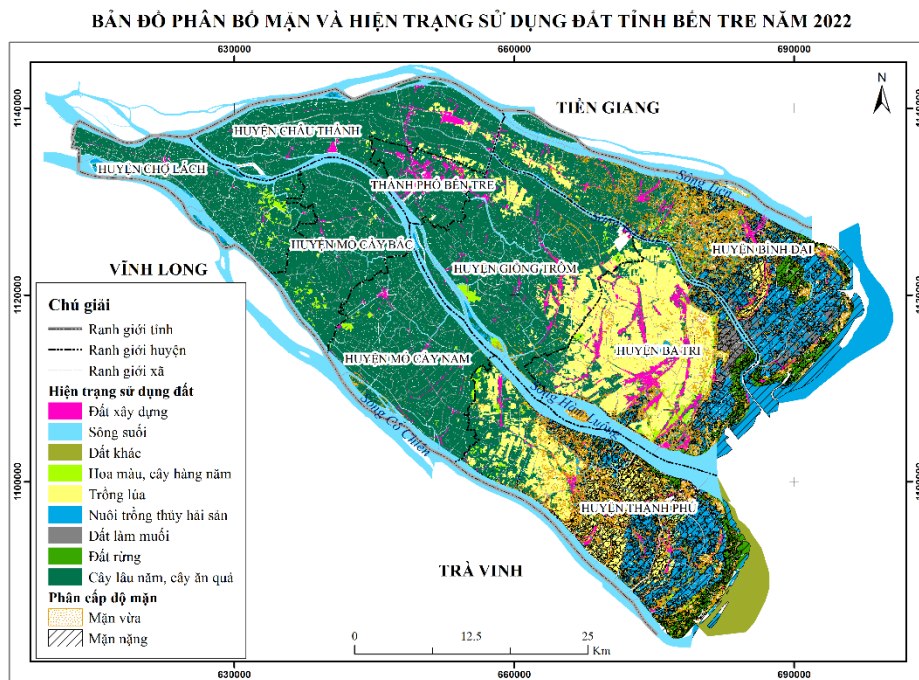
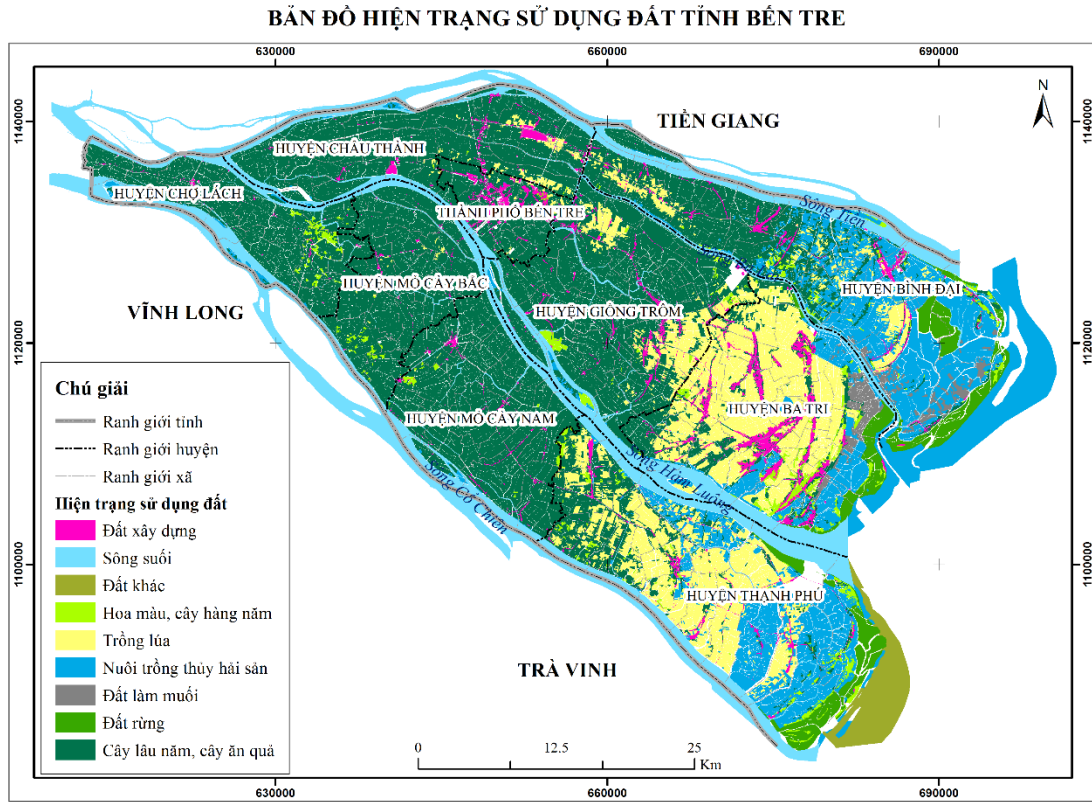
Bảng diện tích đất mặn các huyện năm 2022 (ha)

Huyện	Không mặn	Mặn nhẹ	Mặn vừa	Mặn nặng
Huyện Chợ Lách	12.886,8	201,1	-	-
Huyện Mỏ Cày Bắc	15.036,5	208,54	-	-
Huyện Châu Thành	18.694,5	120,1	-	-
Thành phố Bến Tre	5.054,1	76,2	-	-
Huyện Mỏ Cày Nam	20.083	726	38,9	-
Huyện Thạnh Phú	8.519,5	2.837,04	5.147,9	15.499,6
Huyện Bình Đại	8.058,75	4.428,79	3.473,16	15.103,36
Huyện Giồng Trôm	27.882,5	433,89	226,3	25,28
Huyện Ba Tri	16.514,4	2.929,03	2.130,37	8.876,77

Phụ lục 5: Bản đồ thổ nhưỡng tỉnh Bến Tre năm 2003



Phụ lục 6: Bản đồ phân vùng mặn và hiện trạng sử dụng đất tỉnh Bến Tre



Phụ lục 7: Dữ liệu ảnh vệ tinh sử dụng trong luận án

STT	Loại ảnh vệ tinh	Ký hiệu ảnh
1.	Sentinel_2	COPERNICUS/S2/20180312T031529_20180312T033231_T48PXS
2.		COPERNICUS/S2/20180314T030541_20180314T032431_T48PXS
3.		COPERNICUS/S2/20180317T031541_20180317T032628_T48PXS
4.		COPERNICUS/S2/20180317T031541_20180317T033507_T48PXS
5.		COPERNICUS/S2/20180319T030539_20180319T031100_T48PXS
6.		COPERNICUS/S2/20180322T031539_20180322T032727_T48PXS
7.		COPERNICUS/S2/20180324T030541_20180324T031152_T48PXS
8.		COPERNICUS/S2/20180327T031701_20180327T033202_T48PXS
9.		COPERNICUS/S2/20180329T030539_20180329T032339_T48PXS
10.		COPERNICUS/S2/20180403T030541_20180403T031957_T48PXS
11.		COPERNICUS/S2/20180406T031541_20180406T032133_T48PXS
12.		COPERNICUS/S2/20180411T031539_20180411T031946_T48PXS
13.		COPERNICUS/S2/20180413T030541_20180413T031057_T48PXS
14.		COPERNICUS/S2/20180418T030539_20180418T031152_T48PXS
15.		COPERNICUS/S2/20180421T031539_20180421T032200_T48PXS)
16.		COPERNICUS/S2/20180423T030541_20180423T031503_T48PXS
17.		COPERNICUS/S2/20180426T031731_20180426T032337_T48PXS
18.		COPERNICUS/S2/20180426T031731_20180426T033506_T48PXS
19.		COPERNICUS/S2/20180428T030539_20180428T032437_T48PXS
20.		COPERNICUS/S2/20180501T031539_20180501T033025_T48PXS
21.		COPERNICUS/S2/20180506T031541_20180506T032150_T48PXS
22.		COPERNICUS/S2/20180516T031541_20180516T032154_T48PXS
23.		COPERNICUS/S2/20180523T030541_20180523T032202_T48PXS
24.		COPERNICUS/S2/20180528T030539_20180528T032501_T48PXS
25.		COPERNICUS/S2_SR/20190304T030619_20190304T032047_T48PXS
26.		COPERNICUS/S2_SR/20190309T030541_20190309T032019_T48PXS
27.		COPERNICUS/S2_SR/20190312T031541_20190312T033026_T48PXS
28.		COPERNICUS/S2_SR/20190314T030539_20190314T032229_T48PXS
29.		COPERNICUS/S2_SR/20190317T031539_20190317T033028_T48PXS
30.		COPERNICUS/S2_SR/20190319T030541_20190319T032255_T48PXS
31.		COPERNICUS/S2_SR/20190322T031541_20190322T032431_T48PXS
32.		COPERNICUS/S2_SR/20190324T030539_20190324T031715_T48PXS

33.	COPERNICUS/S2_SR/20190327T031729_20190327T032719_T48PXS
34.	COPERNICUS/S2_SR/20190329T030541_20190329T031935_T48PXS
35.	COPERNICUS/S2_SR/20190401T031541_20190401T032152_T48PXS
36.	COPERNICUS/S2_SR/20190403T030549_20190403T032022_T48PXS
37.	COPERNICUS/S2_SR/20190406T031549_20190406T032806_T48PXS
38.	COPERNICUS/S2_SR/20190408T030541_20190408T031145_T48PXS
39.	COPERNICUS/S2_SR/20190411T031541_20190411T031758_T48PXS
40.	COPERNICUS/S2_SR/20190413T030549_20190413T032053_T48PXS
41.	COPERNICUS/S2_SR/20190416T031549_20190416T033355_T48PXS
42.	COPERNICUS/S2_SR/20190418T030551_20190418T032510_T48PXS
43.	COPERNICUS/S2_SR/20190421T031541_20190421T032816_T48PXS
44.	COPERNICUS/S2_SR/20190423T030549_20190423T031830_T48PXS
45.	COPERNICUS/S2_SR/20190426T031549_20190426T033222_T48PXS
46.	COPERNICUS/S2_SR/20190428T030551_20190428T032153_T48PXS
47.	COPERNICUS/S2_SR/20190501T031541_20190501T032155_T48PXS
48.	COPERNICUS/S2_SR/20190503T030549_20190503T032027_T48PXS
49.	COPERNICUS/S2_SR/20190506T031549_20190506T032940_T48PXS
50.	COPERNICUS/S2_SR/20190508T030551_20190508T031147_T48PXS
51.	COPERNICUS/S2_SR/20190511T031541_20190511T032155_T48PXS
52.	COPERNICUS/S2_SR/20190513T030549_20190513T032056_T48PXS
53.	COPERNICUS/S2_SR/20190516T031549_20190516T033249_T48PXS
54.	COPERNICUS/S2_SR/20190518T030551_20190518T031147_T48PXS
55.	COPERNICUS/S2_SR/20190521T031541_20190521T032632_T48PXS
56.	COPERNICUS/S2_SR/20190521T031541_20190521T033512_T48PXS
57.	COPERNICUS/S2_SR/20190523T030549_20190523T032433_T48PXS
58.	COPERNICUS/S2_SR/20190526T031549_20190526T032742_T48PXS
59.	COPERNICUS/S2_SR/20190528T030551_20190528T032022_T48PXS
60.	COPERNICUS/S2_SR/20200301T031639_20200301T032759_T48PXS
61.	COPERNICUS/S2_SR/20200303T030621_20200303T031221_T48PXS
62.	COPERNICUS/S2_SR/20200306T031601_20200306T032215_T48PXS
63.	COPERNICUS/S2_SR/20200308T030549_20200308T032041_T48PXS
64.	COPERNICUS/S2_SR/20200311T031539_20200311T033028_T48PXS
65.	COPERNICUS/S2_SR/20200313T030541_20200313T031139_T48PXS
66.	COPERNICUS/S2_SR/20200316T031541_20200316T033031_T48PXS
67.	COPERNICUS/S2_SR/20200318T030539_20200318T031658_T48PXS

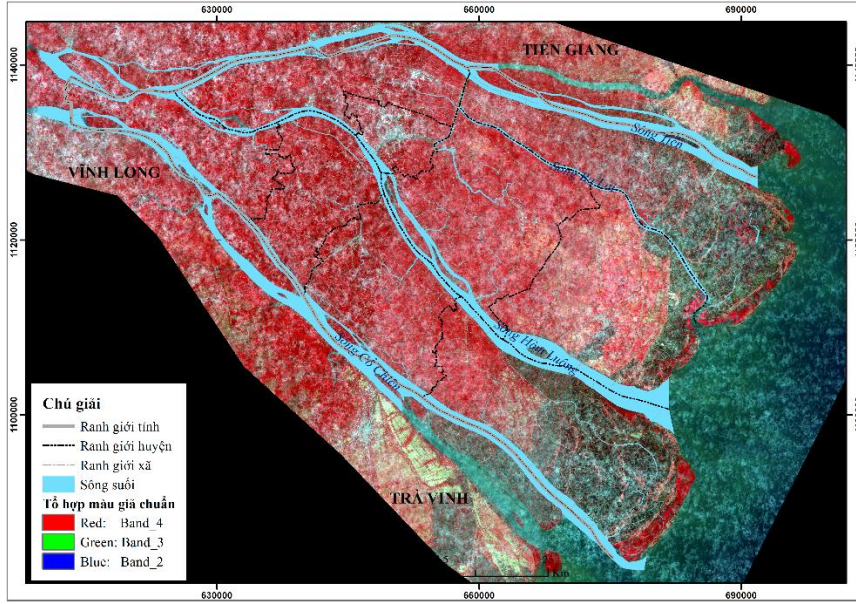
68.	COPERNICUS/S2_SR/20200321T031539_20200321T032851_T48PXS
69.	COPERNICUS/S2_SR/20200323T030541_20200323T032148_T48PXS
70.	COPERNICUS/S2_SR/20200326T031541_20200326T032147_T48PXS
71.	COPERNICUS/S2_SR/20200328T030539_20200328T032219_T48PXS
72.	COPERNICUS/S2_SR/20200331T031539_20200331T032731_T48PXS
73.	COPERNICUS/S2_SR/20200402T030541_20200402T031139_T48PXS
74.	COPERNICUS/S2_SR/20200405T031541_20200405T032148_T48PXS
75.	COPERNICUS/S2_SR/20200407T030539_20200407T032045_T48PXS
76.	COPERNICUS/S2_SR/20200410T031539_20200410T033251_T48PXS
77.	COPERNICUS/S2_SR/20200412T030541_20200412T031142_T48PXS
78.	COPERNICUS/S2_SR/20200415T031541_20200415T033030_T48PXS
79.	COPERNICUS/S2_SR/20200417T030539_20200417T031818_T48PXS
80.	COPERNICUS/S2_SR/20200420T031539_20200420T033213_T48PXS
81.	COPERNICUS/S2_SR/20200422T030541_20200422T032150_T48PXS
82.	COPERNICUS/S2_SR/20200425T031541_20200425T032153_T48PXS
83.	COPERNICUS/S2_SR/20200427T030539_20200427T032216_T48PXS
84.	COPERNICUS/S2_SR/20200430T031539_20200430T032932_T48PXS
85.	COPERNICUS/S2_SR/20200502T030551_20200502T031146_T48PXS
86.	COPERNICUS/S2_SR/20200505T031541_20200505T032155_T48PXS
87.	COPERNICUS/S2_SR/20200507T030539_20200507T032046_T48PXS
88.	COPERNICUS/S2_SR/20200510T031539_20200510T033310_T48PXS
89.	COPERNICUS/S2_SR/20200512T030551_20200512T031148_T48PXS
90.	COPERNICUS/S2_SR/20200515T031541_20200515T033039_T48PXS
91.	COPERNICUS/S2_SR/20200517T030539_20200517T031714_T48PXS
92.	COPERNICUS/S2_SR/20200520T031539_20200520T033334_T48PXS
93.	COPERNICUS/S2_SR/20200522T030551_20200522T032155_T48PXS
94.	COPERNICUS/S2_SR/20200525T031551_20200525T032157_T48PXS
95.	COPERNICUS/S2_SR/20200527T030549_20200527T031643_T48PXS
96.	COPERNICUS/S2_SR/20200527T030549_20200527T032512_T48PXS
97.	COPERNICUS/S2_SR/20200530T031539_20200530T032937_T48PXS
98.	COPERNICUS/S2_SR/20210301T031641_20210301T032900_T48PXS
99.	COPERNICUS/S2_SR/20210303T030629_20210303T032113_T48PXS
100.	COPERNICUS/S2_SR/20210306T031609_20210306T032412_T48PXS
101.	COPERNICUS/S2_SR/20210308T030551_20210308T031955_T48PXS
102.	COPERNICUS/S2_SR/20210311T031541_20210311T033023_T48PXS

103.	COPERNICUS/S2_SR/20210313T030539_20210313T031920_T48PXS
104.	COPERNICUS/S2_SR/20210316T031539_20210316T032819_T48PXS
105.	COPERNICUS/S2_SR/20210318T030541_20210318T032018_T48PXS
106.	COPERNICUS/S2_SR/20210321T031541_20210321T032653_T48PXS
107.	COPERNICUS/S2_SR/20210323T030539_20210323T032358_T48PXS
108.	COPERNICUS/S2_SR/20210326T031539_20210326T032852_T48PXS
109.	COPERNICUS/S2_SR/20210328T030541_20210328T032017_T48PXS
110.	COPERNICUS/S2_SR/20210331T031541_20210331T032710_T48PXS
111.	COPERNICUS/S2_SR/20210402T030539_20210402T032027_T48PXS
112.	COPERNICUS/S2_SR/20210405T031539_20210405T032424_T48PXS
113.	COPERNICUS/S2_SR/20210407T030541_20210407T031942_T48PXS
114.	COPERNICUS/S2_SR/20210410T031531_20210410T033018_T48PXS
115.	COPERNICUS/S2_SR/20210412T030539_20210412T032004_T48PXS
116.	COPERNICUS/S2_SR/20210415T031539_20210415T033041_T48PXS
117.	COPERNICUS/S2_SR/20210417T030541_20210417T032013_T48PXS
118.	COPERNICUS/S2_SR/20210420T031531_20210420T032736_T48PXS
119.	COPERNICUS/S2_SR/20210422T030539_20210422T032313_T48PXS
120.	COPERNICUS/S2_SR/20210425T031539_20210425T033040_T48PXS
121.	COPERNICUS/S2_SR/20210427T030541_20210427T032016_T48PXS
122.	COPERNICUS/S2_SR/20210430T031541_20210430T032753_T48PXS
123.	COPERNICUS/S2_SR/20210502T030539_20210502T032025_T48PXS
124.	COPERNICUS/S2_SR/20210505T031539_20210505T032618_T48PXS
125.	COPERNICUS/S2_SR/20210507T030541_20210507T031945_T48PXS
126.	COPERNICUS/S2_SR/20210510T031541_20210510T033022_T48PXS
127.	COPERNICUS/S2_SR/20210512T030539_20210512T031919_T48PXS
128.	COPERNICUS/S2_SR/20210515T031539_20210515T033044_T48PXS
129.	COPERNICUS/S2_SR/20210517T030541_20210517T032019_T48PXS
130.	COPERNICUS/S2_SR/20210520T031541_20210520T033024_T48PXS
131.	COPERNICUS/S2_SR/20210522T030539_20210522T032359_T48PXS
132.	COPERNICUS/S2_SR/20210525T031539_20210525T033045_T48PXS
133.	COPERNICUS/S2_SR/20210527T030541_20210527T032020_T48PXS
134.	COPERNICUS/S2_SR/20210530T031541_20210530T032713_T48PXS
135.	COPERNICUS/S2_SR/20220301T031649_20220301T032917_T48PXS
136.	COPERNICUS/S2_SR/20220303T030631_20220303T032105_T48PXS
137.	COPERNICUS/S2_SR/20220306T031621_20220306T033019_T48PXS

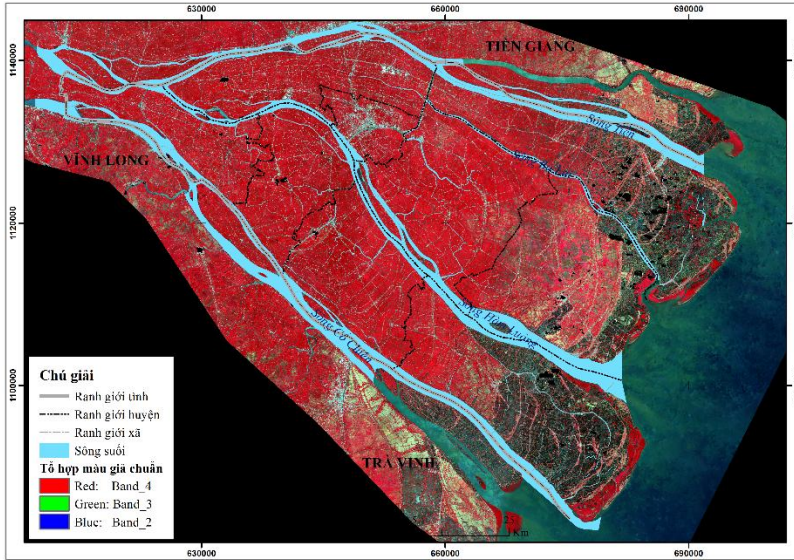
138.		COPERNICUS/S2_SR/20220308T030549_20220308T031828_T48PXS
139.		COPERNICUS/S2_SR/20220311T031539_20220311T032739_T48PXS
140.		COPERNICUS/S2_SR/20220313T030551_20220313T032019_T48PXS
141.		COPERNICUS/S2_SR/20220316T031541_20220316T032618_T48PXS
142.		COPERNICUS/S2_SR/20220318T030539_20220318T032353_T48PXS
143.		COPERNICUS/S2_SR/20220321T031539_20220321T032811_T48PXS
144.		COPERNICUS/S2_SR/20220323T030551_20220323T031935_T48PXS
145.		COPERNICUS/S2_SR/20220326T031541_20220326T032635_T48PXS
146.		COPERNICUS/S2_SR/20220328T030539_20220328T032023_T48PXS
147.		COPERNICUS/S2_SR/20220331T031539_20220331T032842_T48PXS
148.		COPERNICUS/S2_SR/20220402T030541_20220402T031847_T48PXS
149.		COPERNICUS/S2_SR/20220405T031541_20220405T032945_T48PXS
150.		COPERNICUS/S2_SR/20220407T030539_20220407T032407_T48PXS
151.		COPERNICUS/S2_SR/20220410T031539_20220410T032947_T48PXS
152.		COPERNICUS/S2_SR/20220412T030541_20220412T032017_T48PXS
153.		COPERNICUS/S2_SR/20220415T031541_20220415T032711_T48PXS
154.		COPERNICUS/S2_SR/20220417T030539_20220417T032355_T48PXS
155.		COPERNICUS/S2_SR/20220420T031539_20220420T033025_T48PXS
156.		COPERNICUS/S2_SR/20220422T030551_20220422T032020_T48PXS
157.		COPERNICUS/S2_SR/20220425T031541_20220425T032948_T48PXS
158.		COPERNICUS/S2_SR/20220427T030539_20220427T032403_T48PXS
159.		COPERNICUS/S2_SR/20220430T031529_20220430T033038_T48PXS
160.		COPERNICUS/S2_SR/20220502T030551_20220502T032020_T48PXS
161.		COPERNICUS/S2_SR/20220507T030539_20220507T032406_T48PXS
162.		COPERNICUS/S2_SR/20220510T031539_20220510T033440_T48PXS
163.		COPERNICUS/S2_SR/20220512T030551_20220512T032048_T48PXS
164.		COPERNICUS/S2_SR/20220515T031541_20220515T033046_T48PXS
165.		COPERNICUS/S2_SR/20220517T030539_20220517T032354_T48PXS
166.		COPERNICUS/S2_SR/20220520T031539_20220520T033443_T48PXS
167.		COPERNICUS/S2_SR/20220522T030551_20220522T032134_T48PXS
168.		COPERNICUS/S2_SR/20220525T031551_20220525T033048_T48PXS
169.		COPERNICUS/S2_SR/20220527T030539_20220527T032355_T48PXS
170.		COPERNICUS/S2_SR/20220530T031539_20220530T033443_T48PXS
171.	LANDSAT9	LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220308
172.		LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220324

173.		LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220409
174.		LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220425
175.		LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220511
176.		LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_125053_20220527
177.	LANDSAT8	LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200310
178.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200326
179.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200411
180.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200427
181.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200513
182.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20200529
183.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180305
184.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180321
185.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180406
186.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180422
187.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180508
188.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20180524
189.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20150313
190.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_2015032
191.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20150414
192.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20150430
193.		LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_125053_20150516
194.	LANDSAT7	LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20100307
195.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20100323
196.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20100408
197.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20100424
198.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20100510
199.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20050309
200.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20050325
201.		LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_125053_20050410

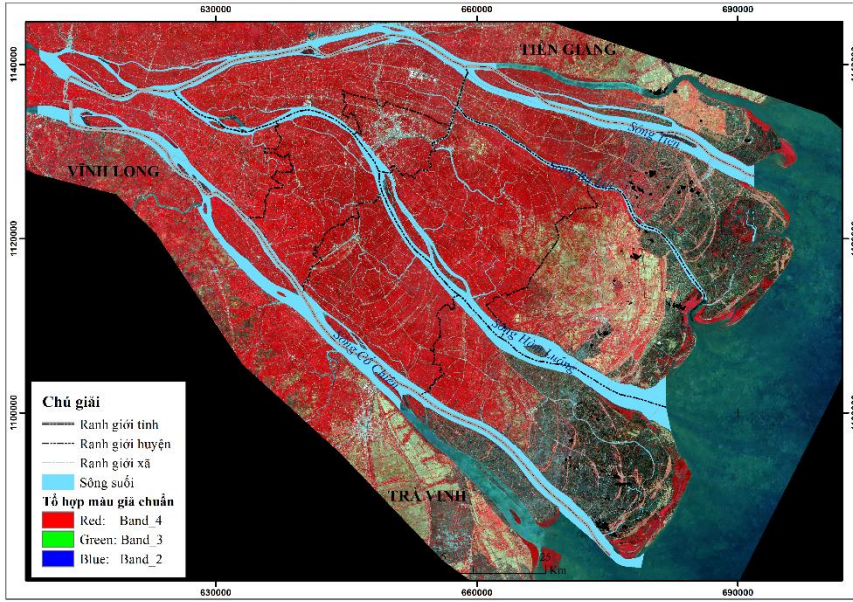
ẢNH TỔ HỢP SENTINEL_2 TỈNH BẾN TRE NĂM 2018



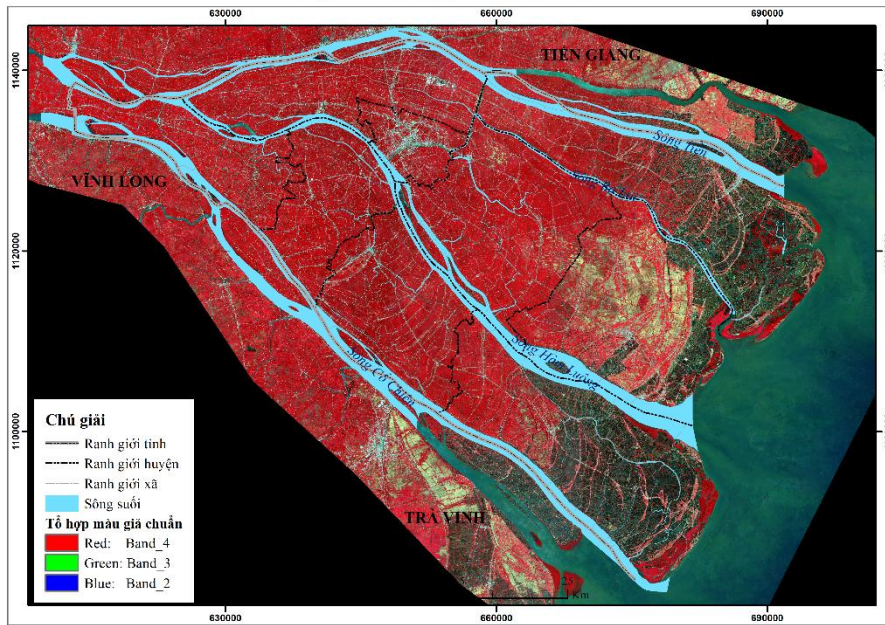
ẢNH TỔ HỢP SENTINEL_2 TỈNH BẾN TRE NĂM 2019



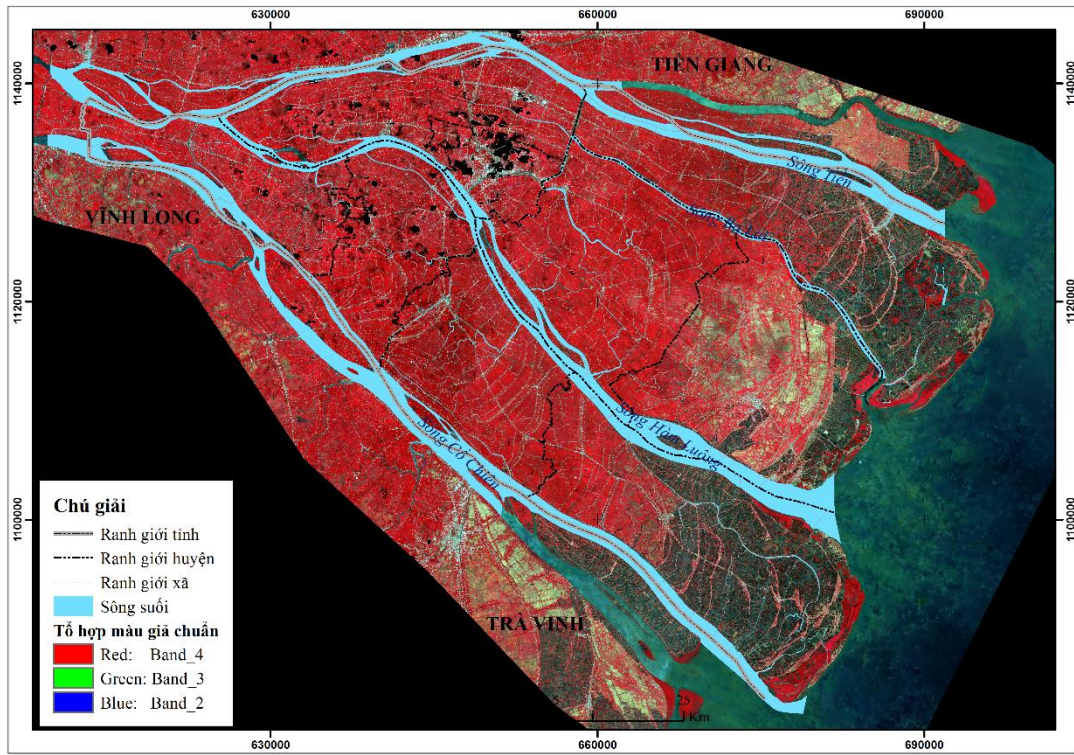
ẢNH TỔ HỢP SENTINEL_2 TỈNH BẾN TRE NĂM 2020



ẢNH TỔ HỢP SENTINEL_2 TỈNH BẾN TRE NĂM 2021



ẢNH TỔ HỢP SENTINEL_2 TỈNH BẾN TRE NĂM 2022



Phụ lục 8: Code for LANDSAT

<https://code.earthengine.google.com/93b0b6646e048aa2b3424287ef4271dd>

```

var date_start = '2014-01-01';
var date_end = '2022-12-01';

Map.centerObject(geometry, 10);
var dn_nopaint = ee.Image().paint(geometry, 0, 2);
Map.addLayer(dn_nopaint, {color: 'F0FFF0'}, 'Dak Nong', 1);
var study=(geometry);

/////////////////////////////////LS7/////////////////////////////////

function maskL457sr(image) {
  var qaMask = image.select('QA_PIXEL').bitwiseAnd(parseInt('11111', 2)).eq(0);
  var saturationMask = image.select('QA_RADSAT').eq(0);

  // Apply the scaling factors to the appropriate bands.
  var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
  var thermalBand = image.select('ST_B6').multiply(0.00341802).add(149.0);

  // Replace the original bands with the scaled ones and apply the masks.
  return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .addBands(thermalBand, null, true)
    .updateMask(qaMask)
    .updateMask(saturationMask);
}

// Map the function over one year of data.
var LS7 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2')
  .filterDate(date_start, date_end)
  .filterBounds(geometry)
  .map(maskL457sr);

/////////////////////////////////LS8/////////////////////////////////

function maskL8sr(image) {
  var qaMask = image.select('QA_PIXEL').bitwiseAnd(parseInt('11111', 2)).eq(0);
  var saturationMask = image.select('QA_RADSAT').eq(0);

  // Apply the scaling factors to the appropriate bands.
  var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
  var thermalBands = image.select('ST_B.*').multiply(0.00341802).add(149.0);

```

```

// Replace the original bands with the scaled ones and apply the masks.
return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .addBands(thermalBands, null, true)
    .updateMask(qaMask)
    .updateMask(saturationMask);
}

// Map the function over one year of data.
var LS8 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2')
    .filterDate(date_start, date_end)
    .filterBounds(geometry)
    .map(maskL8sr);

var LS9 = ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2')
    .filterDate(date_start, date_end)
    .filterBounds(geometry)
    .map(maskL8sr);

function cut(img){
    return img.clip(geometry);
}

// Sets band names
var options = {
    'L7': {
        'bandNames': ['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B7', 'ST_B6'],
        'newNames': ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'],
    },
    'L8': {
        'bandNames': ['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7', 'ST_B10'],
        'newNames': ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'],
    },
    'L9': {
        'bandNames': ['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7', 'ST_B10'],
        'newNames': ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'],
    }
};

LS9 = LS9.select(['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7', 'ST_B10'],
    ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'])
LS8 = LS8.select(['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7', 'ST_B10'],
    ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'])

```

```
LS7 = LS7.select(['SR_B1', 'SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B7', 'ST_B6'],
['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'temp'])
```

```
LS7 = LS7.map(function(img){
  var id = ee.Image(img).id();
  var filled1b = img.focal_mean(1, 'circle', 'pixels', 8);
  return filled1b.blend(img).copyProperties(img, img.propertyNames());
});
```

```
//print('LS7', LS7)
```

```
//print('LS8', LS8)
```

```
var LSColl = LS9.merge(LS8).merge(LS7)
```

```
print(LSColl)
```

```
// Convert to celsius
```

```
function lstC(image){
  var lstK = image.select('temp');
  var lst = lstK.subtract(273.15);
  return image.addBands(lst.rename('LST')).copyProperties(image,
image.propertyNames())
}
```

```
LSColl = LSColl.map(lstC).map(cut)
```

```
////////////////////////////////////
```

```
// Moving-Window Smoothing
```

```
// Specify the time-window
```

```
var days = 30;
```

```
// Convert to milliseconds
```

```
var millis = ee.Number(days).multiply(1000*60*60*24);
```

```
// We use a 'save-all join' to find all images
```

```
// that are within the time-window
```

```
// The join will add all matching images into a
```

```
// new property called 'images'
```

```
var join = ee.Join.saveAll({
```

```
  matchesKey: 'images'
```

```
});
```

```

// This filter will match all images that are captured
// within the specified day of the source image
var diffFilter = ee.Filter.maxDifference({
  difference: millis,
  leftField: 'system:time_start',
  rightField: 'system:time_start'
});

LSColl = join.apply({
  primary: LSColl,
  secondary: LSColl,
  condition: diffFilter
});

//print('Joined Collection', LandsatColl);

// Each image in the joined collection will contain
// matching images in the 'images' property
// Extract and return the mean of matched images
var extractAndComputeMean = function(image) {
  var matchingImages = ee.ImageCollection.fromImages(image.get('images'));
  var meanImage = matchingImages.reduce(
    ee.Reducer.mean().setOutputs(['moving_average']))
  return ee.Image(image).addBands(meanImage)
}

LSColl = ee.ImageCollection(LSColl.map(extractAndComputeMean));

print('Smoothed Collection', LSColl)

var bands = ['blue_moving_average','green_moving_average','red_moving_average',
'nir_moving_average', 'swir1_moving_average', 'swir2_moving_average',
'LST_moving_average']
var newbandss = ['blue','green','red', 'nir', 'swir1', 'swir2', 'LST']
//Map.addLayer(LandsatColl.first(), "", "")

LSColl = LSColl.select(bands,newbandss);

print(LSColl)
////////////////////////////////////

var tpalette= [
  '040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',

```

```

'0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
'3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
];

var tvdipalette= [
'000000', 'a50026', 'd73027', 'f46d43', 'fdae61', 'fee08b',
'ffffbf', 'd9ef8b', 'a6d96a', '66bd63', '1a9850', '006837', '8bc4f9'
];

var ndvipalette = ['b5e9a5', 'a5e494', '95e084', '86dc73', '67d452', '19bf00'];

function imageYear(collection, s, e){

  var list = ee.List([]); // Here this creates an empty list

  for (var i = s; i <= e; i++){

    var imagem = collection.filterDate(i+'-03-01', i+'-05-31')
    //print('imagem', imagem);
    imagem = imagem.median().set('system:time_start', ee.Date(i+'-01-01').millis())
      .set('date', 1).set('month', 1).set('year', i)
      .set('system:id', ee.Date.fromYMD(i,1,1).format("YYYY-MM-dd"))
      .set('date', ee.Date.fromYMD(i,1,1))
      .set('system:index',
ee.Date.fromYMD(i,1,1).format("YYYY_MM_dd"))
      .set('system:time_start', ee.Date.fromYMD(i,1,1).millis());

    Map.addLayer(imagem, {bands: 'LST', min: 5, max: 45, palette:tpalette}, 'LST' + '_'
+ i, 0);
    list = list.add(imagem);
  }

  return ee.ImageCollection(list);
}

function SI2index(img){
  var SI2 = img.expression(
  'sqrt(green*green + red*red + nir*nir)', {
  'nir': img.select('nir'),
  'red': img.select('red'),
  'green': img.select('green')
  }).float();
}

```

```

img = img.addBands(SI2.rename('SI2'));

return img;
}

var LST_Col = imageYear(LSColl, 2017, 2017)

LST_Col = LST_Col.map(SI2index)

print('LST_Col', LST_Col)

function L_EC8(img){
  var lec8 = img.expression('float(-6.489 + 20.492*(GREEN/NIR) + 0.383*LST +
28.615*SWIR2 + 6.247*(NIR/SWIR1) - 20.053*SI2 - 3.505*(SWIR1/SWIR2))',{
  'NIR': img.select(['nir']),
  'GREEN': img.select(['green']),
  'LST': img.select(['LST']),
  'SI2': img.select(['SI2']),
  'SWIR1': img.select(['swir1']),
  'SWIR2': img.select(['swir2']),

  }).rename('LEC8'); //toFloat().multiply(ee.Image(0.0001))
return img.addBands(lec8.rename('LEC8'));
}

LST_Col = LST_Col.map(L_EC8)

print('L_EC8', LST_Col)

Map.addLayer(LST_Col.first(), {bands: 'LEC8', min: 5, max: 45,
palette:tpalette},'L_EC8')

var ExportCol = function(col, folder, scale, type, nimg, maxPixels, region) {
  type = type || "float";
  nimg = nimg || 500;
  scale = scale || 30;
  maxPixels = maxPixels || 1e13;

  var colList = col.toList(nimg);
  var n = colList.size().getInfo();

  for (var i = 0; i < n; i++) {
    var img = ee.Image(colList.get(i));
    var id = img.id().getInfo();

```

```
// var date = img.date().format('yyyy-MM-dd').getInfo();  
region = geometry || img.geometry().bounds().getInfo()["coordinates"];
```

```
var imgtype = {"float":img.toFloat(),  
              "byte":img.toByte(),  
              "int":img.toInt(),  
              "double":img.toDouble()  
              };
```

```
Export.image.toDrive({  
  image:imgtype[type],  
  description: id,  
  folder: folder,  
  fileNamePrefix: id,  
  region: region,  
  scale: scale,  
  maxPixels: maxPixels});  
}  
};
```

```
ExportCol(LST_Col, "XamNhapMan", 30);
```

Phụ lục 9: Code for Sentinel-2

<https://code.earthengine.google.com/6298fe4af16242282f37e9eb9de19648>

```

var dem = ee.Image("JAXA/ALOS/AW3D30_V1_1").select(["AVE"])
var epsg = "EPSG:4326"
var feature = 0

// #####
// # variable for the shadowMask algorithm #
// #####

var START_DATE = '2018-01-01'
var END_DATE = '2022-12-30'
var CLOUD_FILTER = 100
var CLD_PRB_THRESH = 40
var NIR_DRK_THRESH = 0.15
var CLD_PRJ_DIST = 2
var BUFFER = 100

// #####
// # variable for terrain algorithm #
// #####

var terrainScale = 600

// #####
// # variable for cloudScore algorithm #
// #####
var cloudScoreThresh = 20
var cloudScorePctl = 5

// #####

// #####
// # variable band selection #
// #####
var medoidBands = ee.List(['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2'])
var divideBands = ee.List(['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2'])
var bandNamesLandsat = ee.List(['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'thermal', 'swir2',
'sr_atmos_opacity', 'pixel_qa', 'radsat_qa'])
var sensorBandDictLandsatSR = ee.Dictionary({'L8': ee.List([1, 2, 3, 4, 5, 7, 6, 9, 10,
11]),

```

```

'L7': ee.List([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10]),
'L5': ee.List([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10]),
'L4': ee.List([0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10]})

var s2BandsIn = ee.List(['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11',
'B12'])
var s2BandsOut = ee.List(['cb', 'blue', 'green', 'red', 're1', 're2', 're3', 'nir', 'nir2', 'cirrus',
'swir1', 'swir2'])
var s2divideBands = ee.List(['blue', 'green', 'red', 're1', 're2', 're3', 'nir', 'nir2', 'cb',
'cirrus', 'swir1', 'swir2'])

// #####
// # enable / disable modules      #
// #####
var cloudRemoval = true
var brdfCorrect = true
var terrain_Correction = true
var temporal_Interpolation = true
var percentiles = [25, 50, 75]

/*--- SYSTEM STEP-1: IMPORT DATA---*/

Map.centerObject(studyArea,10);
var tl_nopaint = ee.Image().paint(studyArea, 0, 2);
Map.addLayer(tl_nopaint, {color: 'F0FFF0'}, 'AOI', 1)

function cut(img){
  return img.clip(studyArea);
}

function get_s2_sr_cld_col(studyArea, start_date, end_date){
  /// Import and filter S2 SR.
  var s2_sr_col = (ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR')
    .filterBounds(studyArea)
    .filterDate(start_date, end_date)
    .filter(ee.Filter.lte('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', CLOUD_FILTER)))

  /// Import and filter s2cloudless.
  var s2_cloudless_col =
(ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_CLOUD_PROBABILITY')
  .filterBounds(studyArea)
  .filterDate(start_date, end_date));

```

```

// # Join the filtered s2cloudless collection to the SR collection by the 'system:index'
property.
return ee.ImageCollection(ee.Join.saveFirst('s2cloudless').apply({
  primary: s2_sr_col,
  secondary: s2_cloudless_col,
  condition: ee.Filter.equals({
    leftField: 'system:index',
    rightField: 'system:index'})
})));
}

```

```

function add_cloud_bands(img){
  /// Get s2cloudless image, subset the probability band.
  var cld_prb = ee.Image(img.get('s2cloudless')).select('probability')

  /// Condition s2cloudless by the probability threshold value.
  var is_cloud = cld_prb.gt(CLD_PRB_THRESH).rename('clouds')

  /// Add the cloud probability layer and cloud mask as image bands.
  return img.addBands(ee.Image([cld_prb, is_cloud]))
}

```

```

function add_shadow_bands(img){
  /// Identify water pixels from the SCL band.
  var not_water = img.select('SCL').neq(6)

  /// Identify dark NIR pixels that are not water (potential cloud shadow pixels).
  var SR_BAND_SCALE = 1e4
  var dark_pixels =
img.select('B8').lt(NIR_DRK_THRESH*SR_BAND_SCALE).multiply(not_water).ren
ame('dark_pixels')

  /// Determine the direction to project cloud shadow from clouds (assumes UTM
projection).
  var shadow_azimuth =
ee.Number(90).subtract(ee.Number(img.get('MEAN_SOLAR_AZIMUTH_ANGLE')))
;

  /// Project shadows from clouds for the distance specified by the CLD_PRJ_DIST
input.
  var cld_proj = (img.select('clouds').directionalDistanceTransform(shadow_azimuth,
CLD_PRJ_DIST*10)
  .reproject({'crs': img.select(0).projection(), 'scale': 100})

```

```

    .select('distance')
    .mask()
    .rename('cloud_transform'))

  ## Identify the intersection of dark pixels with cloud shadow projection.
  var shadows = cld_proj.multiply(dark_pixels).rename('shadows')

  ## Add dark pixels, cloud projection, and identified shadows as image bands.
  return img.addBands(ee.Image([dark_pixels, cld_proj, shadows]))
}

function add_cld_shdw_mask(img){
  ## Add cloud component bands.
  var img_cloud = add_cloud_bands(img)

  ## Add cloud shadow component bands.
  var img_cloud_shadow = add_shadow_bands(img_cloud)

  ## Combine cloud and shadow mask, set cloud and shadow as value 1, else 0.
  var is_cld_shdw =
  img_cloud_shadow.select('clouds').add(img_cloud_shadow.select('shadows')).gt(0)

  ## Remove small cloud-shadow patches and dilate remaining pixels by BUFFER
  input.
  ## 20 m scale is for speed, and assumes clouds don't require 10 m precision.
  is_cld_shdw = (is_cld_shdw.focalMin(2).focalMax(BUFFER*2/20)
    .reproject({'crs': img.select([0]).projection(), 'scale': 20})
    .rename('cloudmask'))

  ## Add the final cloud-shadow mask to the image.
  return img_cloud_shadow.addBands(is_cld_shdw)
}

var s2_sr_cld_col = get_s2_sr_cld_col(studyArea, START_DATE,
  END_DATE).map(cut);

//print(s2_sr_cld_col.size().getInfo());

function apply_cld_shdw_mask(img){
  ## Subset the cloudmask band and invert it so clouds/shadow are 0, else 1.
  var not_cld_shdw = img.select('cloudmask').not();

  ## Subset reflectance bands and update their masks, return the result.
  return img.select('B.*').updateMask(not_cld_shdw);
}

```

```

}

var s2_collections = (s2_sr_cld_col.map(add_cld_shdw_mask)
                      .map(apply_cld_shdw_mask));

var inBands = ee.List(['B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8','B8A','B9','B11','B12']);
var outBands =
ee.List(['cb','blue','green','red','re1','re2','re3','nir','re4','waterVapor','swir1','swir2']);

function scaleBands(img){
  var prop = img.toDictionary();
  var t =
img.select(['B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8','B8A','B9','B11','B12']).divide(10000);
  t = t.set(prop).copyProperties(img,['system:time_start','system:footprint']);
  return ee.Image(t);
}

function scaleS2(img){
  divideBands = ['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5','B6', 'B7', 'B8', 'B8A', 'B9', 'B11', 'B12']
  bandNames = img.bandNames()
  otherBands = bandNames.removeAll(divideBands)

  others = img.select(otherBands)
  out = img.select(divideBands).divide(10000)

  return out.addBands(others).set(img.toDictionary()).copyProperties(img,
                              ['system:time_start', 'system:footprint',
                               'MEAN_SOLAR_ZENITH_ANGLE',
                               'MEAN_SOLAR_AZIMUTH_ANGLE']).set("centroid", img.geometry().centroid())
}

//s2_collections = s2_collections.map(scaleBands);
s2_collections = s2_collections.select(inBands,outBands);

//print(s2_collections)

////////////////////////////////////
function addIndicators(img){
  img = img.addBands(img.normalizedDifference(['nir', 'red']).rename(['ndvi']))
  return img
}

```

```

var addEVI = function (image) {
  var evi = image.expression('2.5 * ((NIR - RED) / (NIR + 6 * RED - 7.5 * BLUE +
1))', {
    'NIR' : image.select('nir'),
    'RED' : image.select('red'),
    'BLUE': image.select('blue')
  }).float();
  return image.addBands(evi.rename('evi'));
};

```

```

var addSAVI = function (image) {
  // Add Soil Adjust Vegetation Index (SAVI)
  // using L = 0.5;
  var savi = image.expression('(NIR - RED) * (1 + 0.5)/(NIR + RED + 0.5)', {
    'NIR': image.select('nir'),
    'RED': image.select('red')
  }).float();
  return image.addBands(savi.rename('savi'));
};

```

```

function SI4index(img){
  var SI4 = img.expression(
    'sqrt( ((nir*red)-(green*blue)) /((nir*red)+(green*blue)))', {
    'nir': img.select('nir'),
    'red': img.select('red'),
    'blue': img.select('blue'),
    'green': img.select('green')
  }).float();
  img = img.addBands(SI4.rename('SI4'));

  return img;
}

```

```

function BIindex(img){
  var BI = img.expression(
    'sqrt(green*green+ nir*nir)', {
    'nir': img.select('nir'),
    'green': img.select('green')
  }).float();
  img = img.addBands(BI.rename('BI'));

  return img;
}

```

```

function S_EC9(img){
  var SEC9 = img.expression('float(-119.726 + 56.883*(RED/NIR) + 250.285*NDVI +
17.740*EVI - 36.116*(GREEN/RED) - 15.471*PCA1 + 115.630*(GREEN/NIR) -
174.195*SAVI + 42.839*SI4 + 14.112*BI + 25.299*PCA2)', {
    'NIR': img.select('nir'),
    'GREEN': img.select('green'),
    'RED': img.select('red'),
    'NDVI': img.select('ndvi'),
    'EVI': img.select('evi'),
    'SAVI': img.select('savi'),
    'SI4': img.select('SI4'),
    'BI': img.select('BI'),
    'PCA1': img.select('pc1'),
    'PCA2': img.select('pc2')
  }).float();
  img = img.addBands(SEC9.rename('SEC9'));

  return img;
}

var out_bands = ee.List(['blue','green','red','nir','swir1','swir2']);

s2_collections = s2_collections.select(out_bands)
print(ee.Image(s2_collections.first()));

var tpalette= [
  '040274', '040281', '0502a3', '0502b8', '0502ce', '0502e6',
  '0602ff', '235cb1', '307ef3', '269db1', '30c8e2', '32d3ef',
  '3be285', '3ff38f', '86e26f', '3ae237', 'b5e22e', 'd6e21f',
  'fff705', 'ffd611', 'ffb613', 'ff8b13', 'ff6e08', 'ff500d',
  'ff0000', 'de0101', 'c21301', 'a71001', '911003'
];

var tvdipalette= [
  '000000', 'a50026', 'd73027', 'f46d43', 'fdae61', 'fee08b',
  'ffffbf', 'd9ef8b', 'a6d96a', '66bd63', '1a9850', '006837', '8bc4f9'
];

var ndvipalette = ['b5e9a5', 'a5e494', '95e084', '86dc73', '67d452', '19bf00'];

function imageYear(collection, s, e){

  var list = ee.List([]); // Here this creates an empty list

```

```

for (var i = s; i <= e; i++){

  var imagem = collection.filterDate(i+'-03-01', i+'-05-31')
  //print('imagem', imagem);
  imagem = imagem.median().set('system:time_start', ee.Date(i+'-01-01').millis())
    .set('date', 1).set('month', 1).set('year', i)
    .set('system:id', ee.Date.fromYMD(i,1,1).format("YYYY-MM-dd"))
    .set('date', ee.Date.fromYMD(i,1,1))
    .set('system:index',
ee.Date.fromYMD(i,1,1).format("YYYY_MM_dd"))
    .set('system:time_start',ee.Date.fromYMD(i,1,1).millis());

  Map.addLayer(imagem, {bands: 'ndvi', min: 0, max: 0.5, palette:ndvipalette},
'NDVI' + '_' + i, 0);
  list = list.add(imagem);
}

return ee.ImageCollection(list);
}

var img = s2_collections.filterDate('2018-03-01', '2018-05-31').median()

img = img.divide(10000)

  // PCA Code////////////////////////////////////
var boundary = studyArea;

function PCA(maskedImage){
  var image = maskedImage.unmask();
  var scale = 200;
  var region = boundary;
  var bandNames = image.bandNames();
  // Mean center the data to enable a faster covariance reducer
  // and an SD stretch of the principal components.
  var meanDict = image.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.mean(),
    geometry: region,
    scale: scale,
    maxPixels: 1e9,
    bestEffort: true,
    tileScale: 16
  });
  var means = ee.Image.constant(meanDict.values(bandNames));
  var centered = image.subtract(means);

```

```

// This helper function returns a list of new band names.
var getNewBandNames = function(prefix) {
  var seq = ee.List.sequence(1, bandNames.length());
  return seq.map(function(b) {
    return ee.String(prefix).cat(ee.Number(b).int());
  });
};
// This function accepts mean centered imagery, a scale and
// a region in which to perform the analysis. It returns the
// Principal Components (PC) in the region as a new image.
var getPrincipalComponents = function(centered, scale, region) {
  // Collapse the bands of the image into a 1D array per pixel.
  var arrays = centered.toArray();

  // Compute the covariance of the bands within the region.
  var covar = arrays.reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.centeredCovariance(),
    geometry: region,
    scale: scale,
    maxPixels: 1e9,
    bestEffort: true,
    tileSize: 16
  });
  // Get the 'array' covariance result and cast to an array.
  // This represents the band-to-band covariance within the region.
  var covarArray = ee.Array(covar.get('array'));

  // Perform an eigen analysis and slice apart the values and vectors.
  var eigens = covarArray.eigen();

  // This is a P-length vector of Eigenvalues.
  var eigenValues = eigens.slice(1, 0, 1);
  // Compute Percentage Variance of each component
  var eigenValuesList = eigenValues.toList().flatten();
  var total = eigenValuesList.reduce(ee.Reducer.sum());
  var percentageVariance = eigenValuesList.map(function(item) {
    return (ee.Number(item).divide(total)).multiply(100).format('%0.2f');
  });
  // This will allow us to decide how many components capture
  // most of the variance in the input
  print('Percentage Variance of Each Component', percentageVariance);
  // This is a PxP matrix with eigenvectors in rows.
  var eigenVectors = eigens.slice(1, 1);
  // Convert the array image to 2D arrays for matrix computations.

```

```

var arrayImage = arrays.toArray(1);

// Left multiply the image array by the matrix of eigenvectors.
var principalComponents = ee.Image(eigenVectors).matrixMultiply(arrayImage);
  // Turn the square roots of the Eigenvalues into a P-band image.
var sdImage = ee.Image(eigenValues.sqrt())
  .arrayProject([0]).arrayFlatten([getNewBandNames('sd')]);

// Turn the PCs into a P-band image, normalized by SD.
return principalComponents
  // Throw out an an unneeded dimension, [[]] -> [].
  .arrayProject([0])
  // Make the one band array image a multi-band image, [] -> image.
  .arrayFlatten([getNewBandNames('pc')])
  // Normalize the PCs by their SDs.
  .divide(sdImage);
};
var pcImage = getPrincipalComponents(centered, scale, region);
return pcImage.mask(maskedImage.mask());
}
var pca = PCA(img).select(['pc1', 'pc2', 'pc3']);
var img = img.addBands(pca);

print('img', img)

var imageVisParam = {"opacity":1,
  "bands":["red","green","blue"],
  "min":0.03596875071525574,
  "max":0.25026053190231323,
  "gamma":1};

img = addIndicators(img)
img = addEVI(img)
img = addSAVI(img)
img = SI4index(img)
img = Blindex(img)

var S_EC9_IMG = S_EC9(img)
print(S_EC9_IMG)
Map.addLayer(S_EC9_IMG.select('SEC9'), '', 'S_EC9_IMG')

////////////////////////////////////

```

```
/*---6. STEP-6: EXPORT THE COMPOSITE---*/
```

```
Export.image.toDrive({  
  image: S_EC9_IMG.select('SEC9'),  
  description: 'EC_S',  
  scale: 10,  
  region: studyArea,  
  maxPixels: 2000000000000  
});
```