

# NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BẢN ĐỒ HIỂM HỌA XÂM NHẬP MẶN BẰNG ẢNH VỆ TINH, ÁP DỤNG THÍ ĐIỂM CHO VÙNG CỬA SÔNG TIỀN

TRẦN THỊ TÚ<sup>1</sup>, MAI QUANG TUẤN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường Hà Nội

## Tóm tắt

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu ảnh viễn thám đa nguồn (Sentinel-2, Landsat 8/9, Sentinel-1) kết hợp mô hình địa hình số DEM GLO-30 trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) để xây dựng bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn vùng cửa sông Tiền giai đoạn mùa khô từ tháng 11/2019-4/2020. Chỉ số BGRratio (tỷ số phổ giữa kênh xanh-đỏ) được xác định có tương quan cao nhất với độ mặn thực đo (EC,  $r = 0.78-0.84$ ), được sử dụng làm cơ sở phân vùng mặn theo các cấp H0-H4 (từ không mặn đến rất cao). Kết quả cho thấy, đỉnh mặn xảy ra vào tháng 2-3/2020, trùng với đợt hạn mặn lịch sử ở Đồng bằng sông Cửu Long (ĐBSCL); tổng diện tích nước mặn >4‰ đạt khoảng 5.500 ha. Phân vùng hiểm họa cho thấy các xã ven biển như Thạnh Phú, Ba Tri, Bình Đại,.. chịu ảnh hưởng nặng (H3-H4, chiếm 45-60% diện tích), trong khi khu vực trung tâm (Giồng Trôm, Mỏ Cày) ở mức trung bình (H2-H3) và phía Tây (Châu Thành, Chợ Lách) hầu như an toàn (H0-H1). Mô hình đạt độ chính xác tổng thể 87-92%, hệ số Kappa 0.81-0.88. Kết quả chứng minh tính hiệu quả của việc ứng dụng ảnh vệ tinh và nền tảng GEE trong giám sát và cảnh báo sớm xâm nhập mặn, hỗ trợ quy hoạch nguồn nước và nông nghiệp thích ứng biến đổi khí hậu tại địa phương.

**Từ khóa:** Xâm nhập mặn, bản đồ hiểm họa, GEE, sentinel-2, landsat 8/9, Bến Tre.

**Ngày nhận bài:** 15/10/2025; **Ngày sửa chữa:** 8/11/2025; **Ngày duyệt đăng:** 25/11/2025.

## Research on development of salinity intrusion hazard maps using satellite images, pilot application in the Tien river estuary

### Abstract

This study utilized multi-source remote sensing data (Sentinel-2, Landsat 8/9, Sentinel-1) combined with the GLO-30 Digital Elevation Model (DEM) on the Google Earth Engine (GEE) platform to develop a saltwater intrusion hazard map for the Tien River estuarine region during the dry season from November 2019 to April 2020. The BGRratio index (spectral ratio between the blue-red bands) was found to have the strongest correlation with measured salinity (EC,  $r = 0.78-0.84$ ) and was used as the basis for classifying salinity hazard levels from H0 to H4 (ranging from non-saline to very high hazard). Results indicated that peak salinity occurred during February-March 2020, coinciding with the historic drought-salinity event in the Mekong Delta. The total saline area (>4‰) reached approximately 5,500 hectares. Hazard classification results revealed that coastal communes such as Thanh Phu, Ba Tri, and Binh Dai were severely affected (H3-H4, accounting for 45-60% of the area), whereas central communes (Giong Trom, Mo Cay) experienced moderate impacts (H2-H3), and western communes (Chau Thanh, Cho Lach) remained largely unaffected (H0-H1). The model achieved an overall accuracy of 87-92% and a Kappa coefficient of 0.81-0.88. The findings demonstrate the effectiveness and feasibility of applying satellite imagery and the GEE platform for monitoring and early warning of saltwater intrusion, supporting water resource management and climate-resilient agricultural planning at the local scale.

**Keywords:** Saltwater intrusion, Hazard mapping, GEE, Sentinel-2, Landsat 8/9, Song Tien.

**JEL Classifications:** Q53, O44, Q54.

### 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Xâm nhập mặn là một trong những thách thức nghiêm trọng trên toàn cầu, ảnh hưởng đến hơn 1 tỷ người, gây suy thoái tài nguyên đất, nước, giảm năng suất nông nghiệp và đe dọa sinh kế của người dân. Dưới tác động của biến đổi khí hậu, nước biển dâng và thay đổi dòng chảy sông Mekong làm tình trạng xâm nhập mặn ở Đồng bằng sông Cửu Long ngày

càng trầm trọng. Vùng cửa sông Tiền với địa hình thấp và hệ thống sông ngòi dày đặc, là khu vực chịu ảnh hưởng nặng nề nhất, đặc biệt trong mùa khô khi mặn xâm nhập sâu 40 - 60 km vào nội đồng. Phương pháp quan trắc truyền thống chủ yếu tại các cửa sông, tốn kém và không phản ánh đầy đủ diễn biến mặn theo không gian và thời gian[3]. Do đó, việc ứng dụng ảnh vệ tinh trong giám sát xâm nhập mặn là hướng tiếp



cận mới, giúp theo dõi liên tục, diện rộng và tiết kiệm chi phí. Nhiều nghiên cứu gần đây tại khu vực nghiên cứu đã chứng minh hiệu quả của công nghệ này như: Nguyễn Thị Lan (2018) với ảnh Landsat[5]; Phạm Văn Hùng (2019) dùng Sentinel-2[5]; Nguyễn Văn Tài (2020) mô phỏng bằng MIKE 11; Lê Minh Đức (2021) kết hợp Landsat-Sentinel-1; Trung tâm KTTV Quốc gia (2022) xây dựng hệ thống cảnh báo sớm[2]. Từ thực tế đó, việc nghiên cứu xây dựng bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn bằng ảnh vệ tinh áp dụng cho khu vực nghiên cứu là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao [1,6] (Hình 1).

Vùng cửa sông Tiền nằm ở hạ lưu sông Mekong, thuộc vùng ĐBSCL, phía Đông giáp Biển Đông với đường bờ biển dài khoảng 65 km. Địa hình thấp, bị chia cắt bởi hệ thống sông Tiền, Ba Lai, Hàm Luông và Cổ Chiên, tạo điều kiện thuận lợi cho phát triển nông nghiệp, nuôi trồng thủy sản nhưng cũng khiến tính dễ bị ảnh hưởng bởi xâm nhập mặn trong mùa khô.

## 2. SỐ LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Số liệu

Vùng nghiên cứu: Vùng cửa sông Tiền

Thời gian: 5 tháng mùa khô từ tháng 11/2019 đến 4/2020.

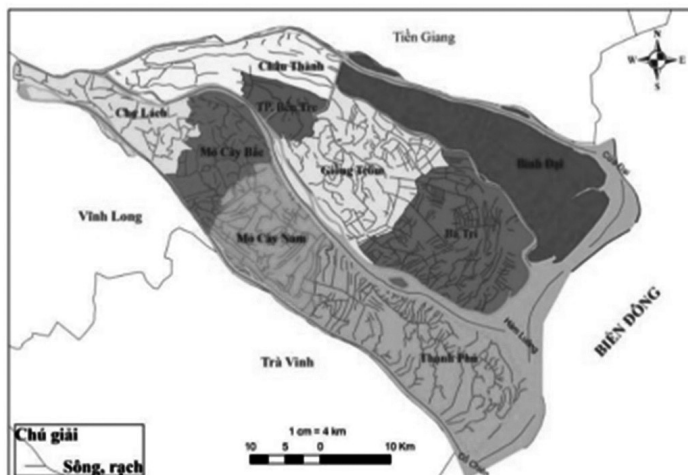
Dữ liệu: Sentinel-2, Landsat 8/9, Sentinel-1, DEM (Hình 2, Bảng 1).

### 2.2. Phương pháp nghiên cứu

Nghiên cứu sử dụng phương pháp tích hợp ảnh viễn thám đa nguồn và xử lý trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) nhằm đánh giá mức độ xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre giai đoạn 12/2019 - 4/2020. Các dữ liệu chính bao gồm ảnh Sentinel-2 SR (10–

20 m), Landsat 8/9 SR (30 m), Sentinel-1 radar (VV, VH) và DEM GLO-30. Ảnh được lọc mây, hiệu chỉnh phân xạ và cắt theo ranh giới tỉnh, sau đó tạo ảnh trung vị hàng tháng để giảm nhiễu (Hình 3).

Các chỉ số NDWI được dùng xác định mặt nước, còn BGR ratio = (Blue + Green)/Red phản ánh biến động độ mặn bề mặt. Chỉ số BGR ratio được chuẩn hóa theo phân vị p50 và p75, tương ứng vùng mặn nhẹ và mặn cao. Từ đó, diện tích nước có độ mặn > 4‰ được xác định



Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu[2]

```

// ***** TIỀN XỬ LÝ DỮ LIỆU *****
// Sentinel-2
function maskS2(img){
  var qa = img.select('QA60');
  var mask = qa.bitwiseAnd(1<<10).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(1<<11).eq(0));
  return img.updateMask(mask).divide(10000)
    .select(['B2', 'B3', 'B4', 'B8', 'B11', 'B12'],
    ['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2'])
    .toFloat();
}
// Landsat 8/9
function maskL89(img){
  var qa = img.select('QA_PIXEL');
  var cloud = qa.bitwiseAnd(1<<3).neq(0)
    .or(qa.bitwiseAnd(1<<4).neq(0))
    .or(qa.bitwiseAnd(1<<5).neq(0));
  return img.select(['SR_B2', 'SR_B3', 'SR_B4', 'SR_B5', 'SR_B6', 'SR_B7'])
    .multiply(0.0000275).add(-0.2)
    .rename(['blue', 'green', 'red', 'nir', 'swir1', 'swir2'])
    .updateMask(cloud.not()).toFloat();
}
// Sentinel-1
function prepS1(start,end){
  var s1 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
    .filterBounds(benTre).filterDate(start,end)
    .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode','IW'))
    .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation','VW'))
    .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation','VH'))
    .select(['VW','VH']);
  var med = s1.median().clip(benTre);
  var ratio = med.select('VW').divide(med.select('VH')).rename('VW_VH');
  return med.addBands(ratio).toFloat();
}
// DEM
var dem = ee.ImageCollection('COPERNICUS/DEM/GLO30')

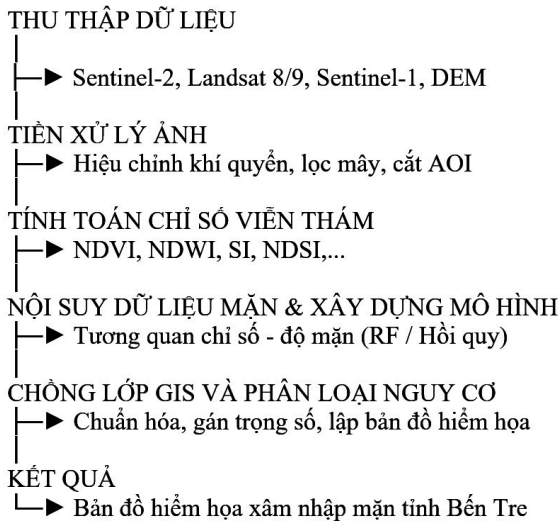
```

Hình 2. Thể hiện lấy dữ liệu vùng nghiên cứu

Bảng 1. Dữ liệu được xuất ra dưới dạng thông số

Nguồn	Bộ sưu tập GEE	Mức xử lý	Độ phân giải	Băng dùng	Tần suất/quỹ đạo
Sentinel-2	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED	SR (phản xạ mặt đất)	10-20 m	B2, B3, B4, B8, B11, B12	5 ngày
Landsat 8/9	LANDSAT/LC08.../T1_L2, LANDSAT/LC09.../T1_L2	SR (C2 L2)	30 m	SR_B2-SR_B7	16 ngày
Sentinel-1	COPERNICUS/S1_GRD	GRD sigma0	~10 m	VV, VH (IW mode)	6-12 ngày
DEM	COPERNICUS/DEM/GLO30	Mosaicked	30 m	DEM	—
Ranh giới hành chính	users/tttukttv/SongTien	Vector	—	Thuộc tính NAME_2	—

Nguồn [4,12,15,16]



Hình 3. Sơ đồ nghiên cứu

**Bảng 2. Các chỉ số viễn thám sử dụng trong nghiên cứu xâm nhập mặn tỉnh Bến Tre**

STT	Tên chỉ số	Công thức tính toán	Ký hiệu
1	Chỉ số thực vật NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = \frac{NIR+Red}{NIR-Red}$	(NDVI)
2	Chỉ số nước NDWI (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = \frac{Green+NIR}{Green-NIR}$	(NDWI)
3	Chỉ số EVI (Enhanced Vegetation Index)	$EVI = \frac{2.5 \times (NIR-Red)}{NIR+6 \times Red-7.5 \times Blue+1}$	(EVI)
4	Chỉ số SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index)	$SAVI = (1+L) \times \frac{NIR-Red}{NIR+Red+L}$	(SAVI)
5	Chỉ số RVI (Ratio Vegetation Index)	$RVI = (1+L) \times \frac{NIR-Red}{NIR+Red+L}$	(RVI)
6	Chỉ số sáng BI (Brightness Index)	$BI = \sqrt{Green^2 + NIR^2}$	(BI)
7	Tỷ số phổ BGRratio	$BGR = (Blue + Green) / Red$	(BGRratio)
8	Chỉ số SI1 (Salinity Index 1)	$SI_1 = \sqrt{(Green \times Red)}$	(SI_1)
9	Chỉ số SI2 (Salinity Index 2)	$SI_2 = \sqrt{(Green^2 + Red^2)}$	(SI_2)
10	Chỉ số SI3 (Salinity Index 3)	$SI_3 = \sqrt{(Green^2 + Red^2 + NIR^2)}$	(SI_3)
11	Tỷ số R1	$R_1 = \frac{Blue}{Red}$	(R_1)
12	Tỷ số R2	$R_2 = \frac{Blue}{NIR}$	(R_2)
13	Tỷ số R3	$R_3 = \frac{Green}{Red}$	(R_3)
14	Tỷ số R4	$R_4 = \frac{Green}{NIR}$	(R_4)

cho từng tháng, cộng dồn để tính tổng số ngày mặn.

Kết quả được phân cấp theo 5 mức hiểm họa H0-H4 và thống kê theo từng huyện. Các sản phẩm đầu ra gồm bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn, biểu đồ xu hướng diện tích mặn theo tháng, và bảng thống kê diện tích - tỷ lệ mặn theo huyện.

**2.3. Các chỉ số đánh giá chất lượng mô hình**

Các chỉ số trên được tính từ dải phổ Sentinel-2 và Landsat 8/9. Trong nghiên cứu, BGRratio được chọn là chỉ số chủ đạo phản ánh xâm nhập mặn, trong khi NDWI dùng để mask vùng nước, còn các chỉ số khác được sử dụng kiểm chứng và hiệu chỉnh mối tương quan với EC (dS/m). Việc kết hợp đa chỉ số giúp mô hình phân vùng mặn H0-H4 đạt độ chính xác cao, giảm nhầm lẫn giữa các lớp mặn - ngọt - đất trống (Bảng 2, 3).

**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

Dựa trên chuỗi ảnh vệ tinh Sentinel-2, Landsat 8/9 kết hợp Sentinel-1 và dữ liệu địa hình DEM, chỉ số mặn (BGRratio, SI1-SI3) được tính toán và tổng hợp theo tháng từ tháng 11/2019 đến tháng 4/2020 (Hình 4).

Ranh mặn >4‰ (đường đỏ) kéo dài sâu theo ba nhánh chính của sông Tiền: Cửa Đại, Cửa Hàm Luông, Cửa Cổ Chiên.

Vùng mặn cao (>4‰) chiếm toàn bộ khu vực ven biển Ba Tri – Bình Đại – Thạnh Phú (tỉnh Vĩnh Long). Vùng mặn trung bình (1-4‰) lan sâu đến trung tâm tỉnh, khoảng 40-50 km từ biển. Vùng nước ngọt (<1‰) chỉ còn lại ở phía Tây.

Kết quả cho thấy, biến động xâm nhập mặn rõ rệt theo thời gian và không gian, phản ánh chính xác quá trình xâm nhập mặn mùa khô năm 2019 - 2020, đây là một trong những đợt mặn khốc liệt nhất trong hơn 100 năm ở ĐBSCL.

Kết quả từ biểu đồ diện tích nước mặn >4‰ cho thấy xu hướng diễn biến như Bảng 4.

Tháng 2/2020 là đỉnh mặn lịch sử, diện tích nước mặn >4‰ đạt cao nhất (~5.500 ha), trùng khớp với các số liệu thực đo của Đài KTTV Nam Bộ. Sau đó, diện tích mặn giảm nhanh do xuất hiện mưa trái mùa và lưu lượng sông Mekong tăng nhẹ.

- Phân loại theo SVM hoặc Random Forest (tùy dữ liệu huấn luyện), kết quả đánh giá:

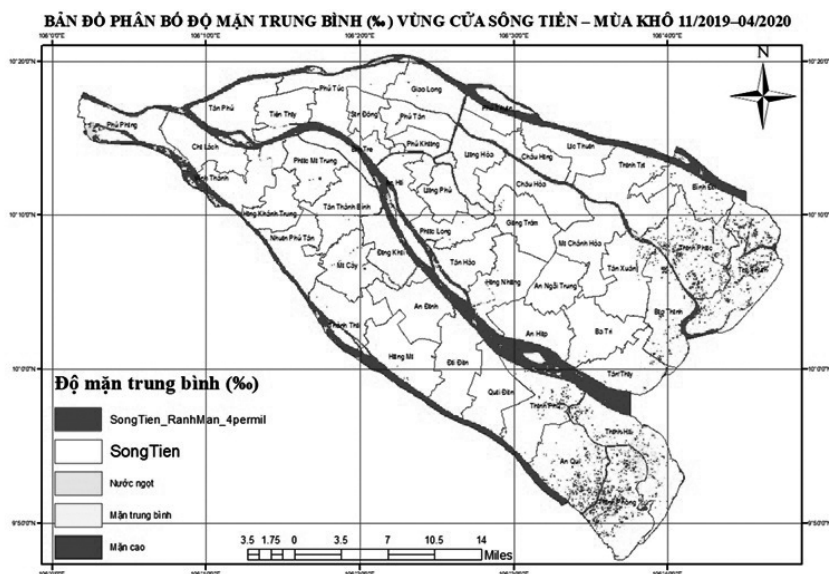
- + Độ chính xác tổng thể (OA): ~87-92%.
- + Hệ số Kappa: 0.81-0.88 (rất tốt).
- + Độ chính xác người sản xuất (PA): >85% cho các lớp H3-H4.

Nguồn [17,18,19]

**Bảng 3. Các chỉ số đánh giá chất lượng mô hình phân vùng xâm nhập mặn**

STT	Tên chỉ số	Công thức tính toán	Ký hiệu
1	Độ chính xác tổng thể (Overall Accuracy – OA)	$OA = (\sum_{(i=1)}^n x_{ii}) / N$	(OA)
2	Độ chính xác người sản xuất (Producer's Accuracy – PA)	$PA_i = x_{ii} / x_{i+}$	(PA <sub>i</sub> )
3	Độ chính xác người sử dụng (User's Accuracy – UA)	$UA_i = x_{ii} / x_{+i}$	(UA <sub>i</sub> )
4	Hệ số Kappa (Cohen's Kappa)	$K = \frac{N \times \sum_{(i=1)}^n x_{ii} - \sum_{(i=1)}^n (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{(i=1)}^n (x_{i+} \times x_{+i})}$	(\kappa)
5	Hệ số tương quan với độ mặn thực đo (EC)	$R^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2}}$	(R <sup>2</sup> )

Nguồn [7,14]


**Hình 4. Bản đồ phân bố độ mặn trung bình (%) vùng cửa sông Tiền - mùa khô (tháng 11/2019 - 4/2020)**
**Bảng 4. Thống kê diện tích bị ảnh hưởng mặn tại khu vực nghiên cứu**

Tháng	Diện tích mặn >4‰ (ha)	Xu thế
12/2019	~5.200 ha	Mặn bắt đầu xuất hiện nhẹ
01/2020	~5.350 ha	Mặn tăng nhanh
02/2020	~5.550 ha	<b>Đỉnh mặn khu vực nghiên cứu</b>
03/2020	~4.900 ha	Mặn giảm dần
04/2020	~4.850 ha	Mặn kết thúc sớm

+ Độ chính xác người sử dụng (UA): &gt;80% cho vùng mặn cao.

 - So sánh với độ mặn thực đo (EC) tại các trạm Ba Tri, Bình Đại, Thạnh Phú cho hệ số tương quan  $r \approx 0.76-0.84$ , thể hiện mối tương quan chặt chẽ giữa chỉ số BGRratio và độ mặn thực tế (Hình 5).

Tháng 11-12/2019: diện tích mặn bắt đầu tăng nhẹ (từ ~500 ha → ~1.200 ha), báo hiệu xâm nhập mặn sớm. Tháng 1/2020: mặn lan sâu nhanh, diện tích tăng gấp 3 lần (~3.200 ha). Tháng 2/2020: đạt đỉnh 5.500 ha, là thời kỳ mặn cao nhất, ranh 4‰ tiến sâu nhất. Tháng 3/2020: mặn duy trì ở mức cao (~5.200 ha). Tháng 4/2020: mưa đầu mùa và dòng chảy sông tăng khiến diện tích mặn giảm mạnh xuống còn ~1.500 ha. Xu thế

này phù hợp với cả số liệu trạm EC thực đo và kết quả bản đồ hiểm họa H0-H4, khẳng định đỉnh mặn rơi vào tháng 2-3/2020 và giảm rõ rệt sau tháng 4/2020.

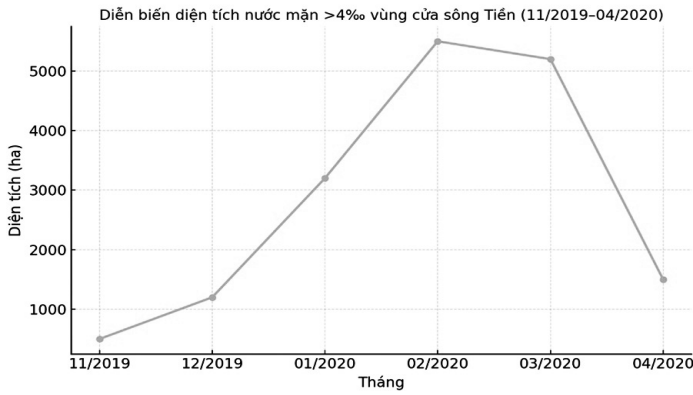
 Ứng dụng ảnh vệ tinh đa nguồn, đặc biệt Sentinel-2 SR (10m) với khả năng quan sát tốt vùng nước, đã giúp nhận diện chính xác mức độ nhiễm mặn bề mặt. Các chỉ số quang học và phổ như NDVI, NDWI, EVI, SAVI, RVI, BI, SI1-SI3, R1-R4, BGRratio được tính toán và kiểm định, trong đó BGRratio thể hiện tương quan cao nhất với độ mặn thực đo (EC) với hệ số tương quan  $r = 0.76-0.84$ . Kết hợp Sentinel-1 (VV, VH, VV/VH) giúp giảm nhiễu mây và tăng độ tin cậy cho phân loại. Phương pháp phân loại Random Forest/SVM đạt độ chính xác tổng thể (OA) từ 87-92% và Kappa = 0.81-0.88, chứng tỏ mô hình ổn định và đáng tin cậy.

Bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn (Hazard H0-H4) được phân cấp theo tổng số ngày nước có độ mặn &gt;4‰ trong toàn mùa khô được thể hiện dưới đây.

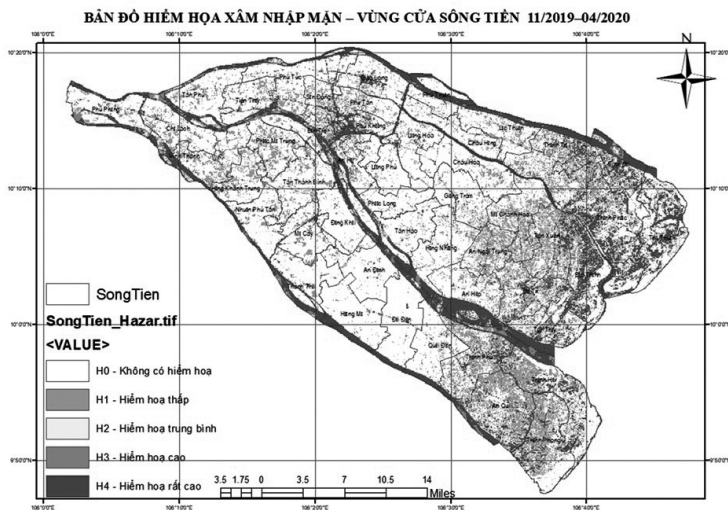
Khu vực phía Bắc (giáp sông Tiền, Bến Tre - Chợ Lách - TP. Bến Tre), bao gồm các phường: Phú Khương, Phú Tân, An Hội, Sơn Đông và các xã Giao Long, Tân Phú, Tiên Thủy, Châu Hòa, Hưng Khánh Trung, Phước Mỹ Trung... Bao gồm các phường Phú Khương, Phú Tân, An Hội, Sơn Đông và các xã Giao Long, Tân Phú, Tiên Thủy, Châu Hòa, Hưng Khánh Trung, Phước Mỹ Trung...

Khu vực trung tâm (Đồng Khởi, Giồng Trôm, Mỏ Cày) Các xã như Tân Thành Bình, Hương Mỹ, Lương Hòa, Long Mỹ, Tân Hòa, Tân Phú, An Bình Tây, Châu Bình, Lộc Thuận... H2 - H3 (trung bình đến cao), là vùng chuyển tiếp giữa ngọt và mặn, chịu ảnh hưởng theo sông Ba Lai và Hàm Luông.

Khu vực ven biển (Ba Tri, Bình Đại, Thạnh Phú). Các xã: An Thủy,



Hình 5. Biểu đồ diễn biến diện tích nước mặn >4‰ vùng cửa sông Tiền (11/2019 - 4/2020)



Hình 6. Bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn vùng cửa sông Tiền (tháng 11/2019 - 4/2020)

Bảo Thuận, Tân Thủy, Mỹ Hưng, An Qui, Thạnh Hải, Thạnh Phong, Phước Tuy, Thạnh Trị, Bình Thắng, Đại Hòa Lộc... H3 - H4 (cao đến rất cao), xâm nhập mặn mạnh nhất, độ mặn >4‰ duy trì nhiều tháng, vùng cửa Ba Lai - Cổ Chiên - Hàm Luông (Hình 6).

Sự phân bố hiểm họa theo tenhc phản ánh quy luật xâm nhập mặn dọc theo ba cửa sông lớn: Cửa Đại, Ba Lai, Hàm Luông.

Xã ven biển (H4): Chịu ảnh hưởng nặng, cần kiểm soát nguồn nước, chuyển đổi sản xuất sang nuôi trồng thủy sản - muối. Xã trung gian (H2-H3): vùng có thể canh tác lúa – tôm luân canh. Xã đầu nguồn (H0-H1): vùng trồng cây ăn trái, có thể cung cấp nước ngọt hỗ trợ vùng khác.

Kết quả thống kê cho thấy, các xã Thạnh Phong, Bảo Thuận, Bình Thắng, An Thủy có tỷ lệ diện tích H4 (hiểm họa rất cao) trên 70%. Vùng H3 (cao) tập trung ở Giồng Trôm, Ba Tri nội đồng, chiếm 40-60%. Vùng H1-H2 (thấp đến trung bình) chủ yếu ở Châu Thành, phường Bến Tre. Các vùng H0-H1 có thể xem là vùng ngọt ổn định, thích hợp cây ăn trái và cấp nước sinh hoạt.

Như vậy, trên 60-70% diện tích khu vực nghiên cứu bị ảnh hưởng mặn ở các mức độ khác nhau trong mùa khô 2019-2020. H4 (rất nặng), chiếm gần 25-30% diện tích, tập trung ở các xã ven biển. H3-H2 (nặng đến trung bình) chiếm khoảng 40% diện

tích, chủ yếu ở trung lưu. H0-H1 (ít ảnh hưởng) chỉ còn 30-35%, nằm ở thượng nguồn sông Tiền.

Bản đồ xâm nhập mặn và hiểm họa H0-H4 đã thể hiện đầy đủ: Phạm vi không gian và cường độ mặn trung bình trên toàn vùng cửa sông Tiền; Mức độ, thời gian và phạm vi ảnh hưởng của đợt xâm nhập mặn lịch sử 2019-2020; Cung cấp cơ sở khoa học và trực quan cho việc phân vùng nguy cơ, quy hoạch thủy lợi, bố trí mùa vụ và ứng phó hạn mặn.

Cần tăng cường tích hợp dữ liệu đo đặc độ mặn thực địa (EC) tại các trạm quan trắc và khu vực sản xuất nông nghiệp để hiệu chỉnh ngưỡng

mặn (1‰, 4‰) chính xác hơn cho từng vùng. Tích hợp dữ liệu mô hình thủy văn (MIKE11, SWAT, HEC-RAS) với dữ liệu viễn thám để mô phỏng kịch bản xâm nhập mặn theo các cấp lưu lượng thượng nguồn. Xây dựng bản đồ rủi ro tổng hợp (Risk Map) kết hợp Hazard - Exposure - Vulnerability, hướng đến đánh giá thiệt hại tiềm năng do mặn trong bối cảnh biến đổi khí hậu.

Giám sát liên tục bằng ảnh vệ tinh thời gian thực (near real-time): Ứng dụng ảnh Sentinel-2, Landsat và MODIS để theo dõi diễn biến mặn theo tuần hoặc theo chu kỳ thủy triều. Xây dựng quy trình xử lý ảnh tự động trên nền tảng điện toán đám mây để cập nhật nhanh bản đồ mặn và bản đồ hiểm họa. Kết hợp số liệu EC từ các trạm quan trắc, mực nước, lưu lượng, triều với ảnh vệ tinh để hiệu chỉnh và nâng độ chính xác ngưỡng mặn.

#### 4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu sử dụng ảnh Sentinel-2, Landsat 8/9, Sentinel-1 và dữ liệu DEM (GLO-30) để xây dựng bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn (H0-H4) giai đoạn mùa khô 2019-2020.

Toàn vùng nghiên cứu trong mùa khô 2019-2020 chịu mức độ xâm nhập mặn nghiêm trọng và kéo dài nhất trong hơn 10 năm. Hơn 2/3 diện tích có độ mặn trung bình trên 1‰, và 1/3 diện tích bị mặn >4‰. Ranh mặn 4‰ tiến sâu hơn trung bình 20-30 km so với các năm trước.

Sự khác biệt rõ giữa vùng ven biển (mặn ổn định) và thượng nguồn (nước ngọt ổn định) cho thấy gradient mặn-ngọt điển hình của vùng hạ lưu sông Tiền.

Các chỉ số quang học và phổ được tính toán gồm: NDVI, NDWI, EVI, SAVI, RVI, BI, SI1-SI3, R1-R4, BGRratio. Chỉ số



BGRratio cho tương quan cao với độ mặn thực đo (EC), hệ số  $r \approx 0.78-0.84$ . Phân loại bằng Random Forest/SVM đạt độ chính xác tổng thể (OA) 87-92%, Kappa 0.81-0.88.

Kết quả cho thấy, mặn tăng mạnh từ tháng 12/2019, đạt đỉnh tháng 2-3/2020, giảm nhanh sau tháng 4/2020. Tổng diện tích nước mặn >4‰ toàn tỉnh đạt cực đại ~5.500 ha vào tháng 2/2020. Đỉnh mặn tháng 2-3/2020 trùng với đợt hạn - mặn lịch sử 2019-2020 tại ĐBSCL.

Bản đồ Hazard phản ánh rõ không gian - thời gian và mức độ rủi ro mặn trên toàn tỉnh. Kết quả có thể ứng dụng trong quy hoạch nguồn nước, cảnh báo sớm và chuyển đổi mùa vụ nông nghiệp. GEE giúp tự động hóa quy trình giám sát mặn nhanh, chi phí thấp, cập nhật định kỳ. Đề xuất tăng cường dữ liệu EC thực đo, hiệu chỉnh ngưỡng mặn và mở rộng sang các tỉnh ven biển lân cận. Nghiên cứu khẳng định hiệu quả và tính khả thi của ảnh vệ tinh trong đánh giá hiểm họa mặn, hỗ trợ quy hoạch thích ứng biến đổi khí hậu.

Kiến nghị cần xây dựng hệ thống dự báo sớm xâm nhập mặn dựa trên tích hợp dữ liệu ảnh vệ tinh, quan trắc thực địa và mô hình thủy văn - thủy lực. Việc giám sát liên tục bằng ảnh Sentinel-2 và Landsat kết hợp mô phỏng cho phép dự báo phạm vi và cường độ mặn trong ngắn hạn và theo kịch bản. Các bản đồ cảnh báo H0-H4 được cập nhật theo thời gian thực sẽ hỗ trợ cơ quan quản lý chủ động phân bổ nguồn nước, vận hành công trình thủy lợi và bố trí mùa vụ hiệu quả, góp phần giảm thiểu thiệt hại trong các mùa khô cực đoan.

**Lời cảm ơn:** Nhóm tác giả xin cảm ơn Đề tài “Nghiên cứu xây dựng bản đồ hiểm họa xâm nhập mặn bằng ảnh vệ tinh, áp dụng thử nghiệm tại tỉnh Bến Tre” Mã số: HUNRE.2025.09.02, đã hỗ trợ về phương pháp nghiên cứu. ■

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Bộ Nông nghiệp và Phát triển Nông thôn (2020). Báo cáo tổng hợp tình hình hạn hán, xâm nhập mặn khu vực miền Nam 2019-2020. Hà Nội: Nhà xuất bản Nông nghiệp.
2. Tổng cục Khí tượng Thủy văn (2020). Đánh giá nguyên nhân và tác động của đợt hạn hán, xâm nhập mặn lịch sử năm 2019-2020 tại Đồng bằng sông Cửu Long. Hà Nội: Bộ TN&MT.
3. Sở TN&MT tỉnh Bến Tre (2021). Báo cáo hiện trạng môi trường tỉnh Bến Tre giai đoạn 2016-2020. Bến Tre: UBND tỉnh Bến Tre.
4. Nguyễn Văn Thắng, Trần Minh Đức, & Phan Thanh Tùng (2021). Ứng dụng ảnh Sentinel-2 và Google Earth Engine trong giám sát xâm nhập mặn vùng hạ lưu sông Cổ Chiên, tỉnh Trà Vinh. Tạp chí Khoa học Trường Đại học Cần Thơ, 57(4A), 82-92.
5. Nguyễn Thị Lan Anh, & Phạm Văn Hùng (2022). Đánh giá nguy cơ xâm nhập mặn tại ĐBSCL bằng công

nghệ viễn thám và GIS. Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 730(1), 25-35.

6. UBND tỉnh Bến Tre (2021). Kế hoạch hành động ứng phó xâm nhập mặn và biến đổi khí hậu tỉnh Bến Tre giai đoạn 2021-2030. Bến Tre: UBND tỉnh Bến Tre.
7. Nguyen, T. G., Tran, D. Q., & Pham, C. T. H. (2021). Salinity intrusion prediction using remote sensing and machine learning: Case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105124. Elsevier.
8. Sarkar, S. K., et al. (2023). Coupling of machine learning and remote sensing for soil salinity mapping in coastal areas of Bangladesh. *Scientific Reports*, 13(17056). Nature Publishing Group.
9. Habibnejad Roshan, M., et al. (2017). Digital mapping of topsoil salinity using Landsat 8 OLI and machine learning algorithms in arid regions of Iran. *Geoderma*, 308, 1-12. Elsevier.
10. Bauer, J., & Lentz, E. E. (2025). Seawater intrusion in river deltas: Inter-annual variability controlled by upstream discharge. *Journal of Hydrology*, 632, 130043. Elsevier.
11. Tanushree, S., et al. (2021). Seawater intrusion and salinity mapping in coastal aquifers using remote sensing data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(9), 4865-4883. European Geosciences Union.
12. Gatdula, N. C., et al. (2024). Assessment of coastal agriculture vulnerability to seawater intrusion using remote sensing, GIS, and multi-criteria decision analysis (MCDA). *Journal of Coastal Research*, 40(3), 512-526. Taylor & Francis.
13. O'Donnell, K. L., & Smith, R. A. (2024). Saltwater intrusion and sea-level rise threaten U.S. rural and coastal communities. NOAA Technical Report, 2024-08. U.S. Department of Commerce.
14. Goebel, M., et al. (2019). Understanding saltwater intrusion through remote sensing and hydrologic models. *Stanford University Sustainability Reports*, Stanford, USA.
15. Abdelfattah, M., et al. (2023). Mapping the impacts of anthropogenic activities and seawater intrusion on coastal ecosystems using Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1204742.
16. Colasa, P., & Trần, H. P. (2021). Đánh giá tác động của xâm nhập mặn đến sản xuất nông nghiệp vùng Đồng bằng sông Cửu Long. Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ, 24(2), 45-53.
17. McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432. Taylor & Francis.
18. Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. Elsevier.
19. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127-150. Elsevier.