Vulnerabilità dei siti archeologici alle inondazioni: un'analisi GIS-AHP nella Valle di Moche (Perù)

Francesco Di Stefano[1][0000-0002-0604-7163], Marsia Sanità[1][0009-0002-9828-2626] e Eva Savina Malinverni[1][0000-0001-6582-2943]

[1] DICEA, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia – f.distefano@staff.univpm.it, m.sanita@staff.univpm.it, e.s.malinverni@staff.univpm.it

Abstract. Si presenta un'analisi GIS-AHP della suscettibilità alle inondazioni nella Valle del Moche (Perù), riferita a *El Niño* 2017. Sei indicatori ambientali definiscono una mappa in cinque classi, confrontata con CEMS EMSR199. Il 19,55% delle aree allagate analizzate ricade nelle classi alta e molto alta, che comprendono 26 delle 76 localizzazioni archeologiche valutabili. Il modello orienta gli approfondimenti sull'esposizione dei siti, senza stimare il danno ai manufatti.

Parole chiave: Remote Sensing, Vulnerabilità, Siti Archeologici, Perù.

1 Introduzione

Nella costa settentrionale del Perù, gli eventi *El Niño* possono modificare rapidamente il funzionamento idrologico di territori prevalentemente aridi. Piogge intense, esondazioni e riattivazione delle *quebradas*, gli impluvi normalmente asciutti o a deflusso intermittente, interessano insediamenti e paesaggi di elevato valore culturale. Nella Valle del Moche la conservazione delle architetture in terra cruda richiede una lettura congiunta del contesto geomorfologico e dell'esposizione dei siti [1]. L'integrazione tra GIS, dati remote sensing e analisi multicriterio (MCDA) permette di individuare le aree predisposte alle inondazioni anche dove mancano serie idrometriche sufficienti per una modellazione dettagliata. L'Analytic Hierarchy Process (AHP) consente di ponderare gli indicatori ambientali per costruire un indice sintetico di suscettibilità alle inondazioni [2]. Applicazioni recenti combinano morfometria, prossimità al reticolo e copertura del suolo per produrre mappe di suscettibilità, sottoposte a verifica con osservazioni indipendenti [3, 4]. La trasferibilità di questi approcci dipende tuttavia dalla pertinenza locale degli indicatori e dalla qualità dei dati. Una mappa multicriterio esprime una predisposizione relativa: non restituisce automaticamente una probabilità di allagamento, un tirante idrico o un danno atteso. Per il patrimonio archeologico, inoltre, la localizzazione in un'area suscettibile deve essere distinta dalla fragilità fisica delle strutture. La combinazione di cartografia territoriale e inventari dei siti costituisce pertanto un primo livello di selezione delle priorità, da approfondire con rilievi e osservazioni conservative.

Il contributo presenta l'applicazione di un modello GIS-AHP alla Valle del Moche (Perù) limitatamente all'evento *El Niño* del 2017. L'obiettivo è descrivere la costruzione dell'indice territoriale, leggere la posizione dei siti rispetto alle classi ottenute e impostare il confronto con le aree allagate cartografate dal Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Il termine vulnerabilità territoriale è qui utilizzato in senso operativo; l'indice misura principalmente la suscettibilità ambientale alle inondazioni e non la vulnerabilità strutturale dei beni.

2 Metodologia

2.1 Area di studio e organizzazione dei dati

L'area di interesse (AOI) comprende circa 424,2 km² nella regione di La Libertad, attorno a Trujillo e al fiume Moche (Perù). Le quote variano dal livello del mare a circa 2154 m; approssimativamente il 70% della superficie si colloca sotto i 500 m. Il passaggio dalla pianura costiera ai rilievi interni determina condizioni morfologiche differenziate e connessioni tra asse fluviale, canali e drenaggi secondari (*quebradas*).

Le elaborazioni sono state organizzate in QGIS 3.40 nel sistema WGS84/UTM17S (EPSG: 32717). Il geodatabase integra i limiti territoriali, l'idrografia e i siti storico-archeologici individuati (Fig. 1).

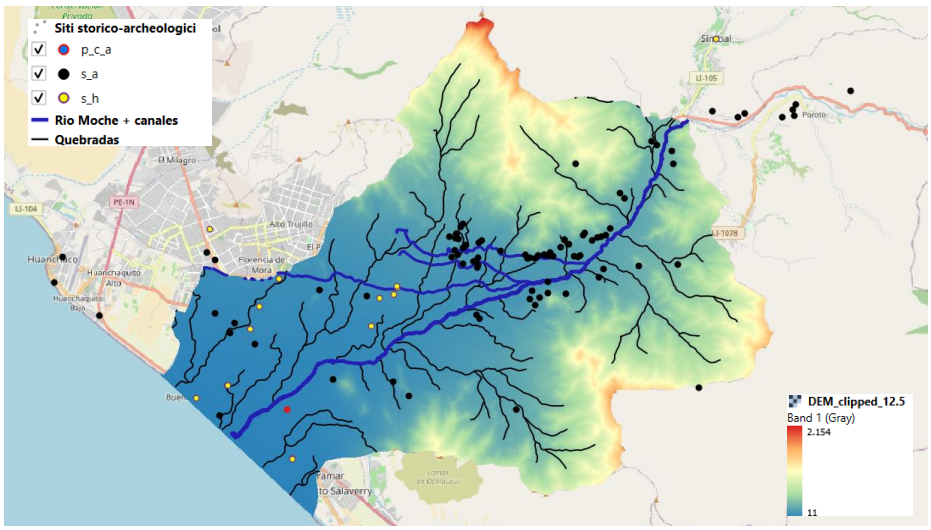
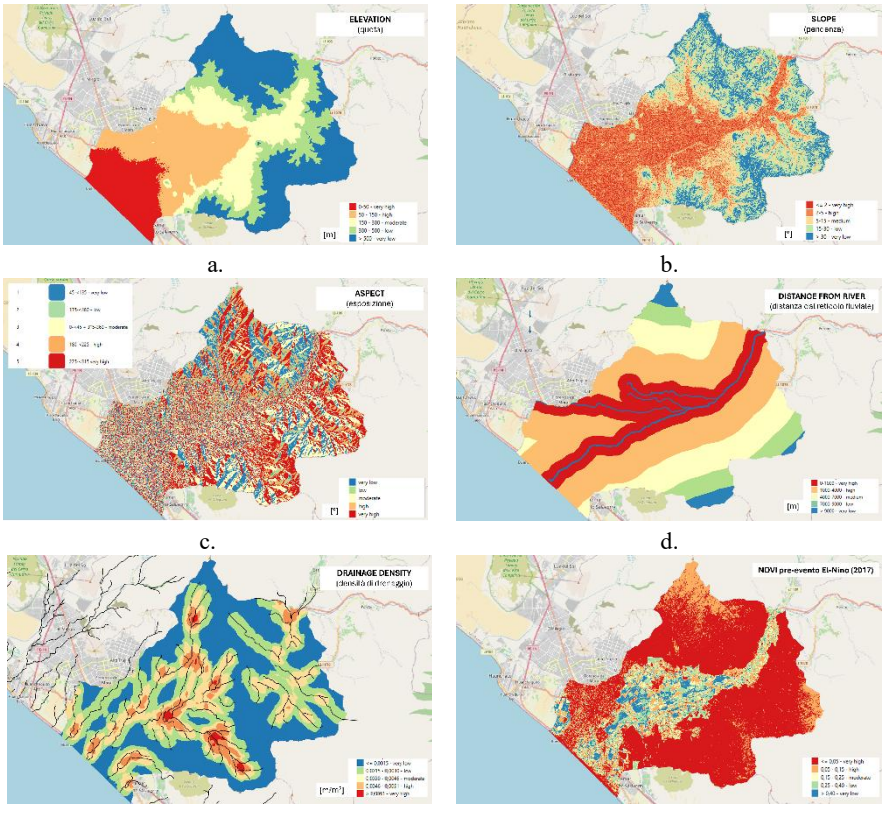


Fig. 1. Inquadramento della Valle del Moche, visualizzazione del DEM sovrapposto da corsi fluviali, *quebradas* e posizione dei siti storico-archeologici (EPSG: 32717).

2.2 Indicatori e classificazione

Dal DEM associato al prodotto ALOS PALSAR distribuito da ASF (Alaska Satellite Facility)[1], con passo di griglia di 12,5 m, sono ricavati quota, pendenza ed esposizione (Fig. 2a–c). La distanza dal fiume Moche e dai canali è calcolata mediante analisi di prossimità (Fig. 2d); la densità di drenaggio descrive la concentrazione del reticolo delle *quebradas* (Fig. 2e). I layer sono ritagliati sull'AOI e armonizzati nello stesso sistema di riferimento.

La configurazione antecedente all'evento *El Niño* 2017 è descritta dall'NDVI ricavato dalle immagini Sentinel-2 MSI L2A del 28 novembre 2016 (Copernicus Data Space Ecosystem)[2]. L'indice è calcolato come (B8−B4)/(B8+B4), utilizzando le bande dell'infrarosso vicino e del rosso a 10 m (Fig. 2f).



a. b. c. d. e. f.

Fig. 2. Indicatori utilizzati nel modello di vulnerabilità, riclassificati in cinque classi di vulnerabilità: (a) quota, (b) pendenza, (c) esposizione, (d) distanza dal reticolo, (e) densità di drenaggio, (f) NDVI.

[1] https://www.earthdata.nasa.gov/data/projects/alos-palsar-rtc-project
[2] https://dataspace.copernicus.eu/ecosystem/services/copernicus-browser

I sei indicatori sono riclassificati nella scala ordinale (Tab. 1), da vulnerabilità molto bassa (1) a molto alta (5). Le soglie rendono confrontabili grandezze eterogenee, ma introducono discontinuità che vanno considerate nell'interpretazione dei risultati.

Tab. 1. Classificazione dei sei indicatori utilizzati nel modello MCDA-AHP nelle cinque classi di vulnerabilità alle inondazioni, da molto bassa (1) a molto alta (5).

Indicatore	1	2	3	4	5
Quota (m)	>500	300–500	150–300	50–150	0–50
Pendenza (°)	>30	15–30	5–15	2–5	≤2
Esposizione (°)	45–135	135–180	315–360 ; 0–45	180–225	225–315
Densità di Drenaggio (m/m^2)	≤0,0015	0,0015–0,0030	0,0030–0,0046	0,0046–0,0061	>0,0061
Distanza dal fiume (m)	>9000	7000–9000	4000–7000	1000–4000	0–1000
NDVI	>0,40	0,25–0,40	0,15–0,25	0,05–0,15	≤0,05

2.3 Pesi AHP e indice di vulnerabilità

L'AHP definisce l'importanza relativa degli indicatori attraverso una matrice reciproca di confronti a coppie. I giudizi attribuiscono maggiore rilevanza alla prossimità al corso d'acqua (DR) e alla densità di drenaggio (DD). La matrice riportata è riprodotta in Tab. 2, rendendo esplicito il passaggio dai giudizi qualitativi alla ponderazione.

Il controllo mediante autovalore principale della matrice fornisce $\lambda_{max} \approx 6{,}0475$ e un rapporto di consistenza $CR \approx 0{,}0077$, assumendo $RI = 1{,}24$ per sei criteri. Il valore indica una buona coerenza interna dei giudizi; non dimostra, da solo, la capacità del modello di rappresentare gli allagamenti.

Tab. 2. Matrice AHP: DR: distanza dal reticolo; DD: densità di drenaggio; E: quota; S: pendenza; N: NDVI; A: esposizione.

	DR	DD	S	E	N	A
DR	**1**	2	3	3	5	7
DD	1/2	**1**	2	2	4	5
S	1/3	1/2	**1**	1	2	4
E	1/3	1/2	1	**1**	2	3
N	1/5	1/4	1/2	1/2	**1**	2
A	1/7	1/5	1/4	1/3	1/2	**1**

Per descrivere la mappa di vulnerabilità all'alluvione si tiene conto dei pesi operativi attribuiti a ciascun indicatore: DR = 0,382; DD = 0,241; S = 0,136; E = 0,129; N = 0,070; A = 0,043. La loro somma è 1,001; la normalizzazione elimina lo scarto

dovuto agli arrotondamenti. La mappa di suscettibilità (FVI) è ottenuta mediante una combinazione lineare ponderata dei sei indicatori:

$$FVI(x) = \frac{\sum_{i=1}^{6} w_i \; r_i(x)}{\sum_{i=1}^{6} w_i}$$

dove $r_i(x)$ è il valore dell'indicatore i, riclassificato nella scala 1–5 nella cella x, e w_i è il relativo peso. Applicando i pesi operativi si ottiene:

$$FVI = (0{,}382\ DR + 0{,}241\ DD + 0{,}136\ S + 0{,}129\ E + 0{,}070\ N + 0{,}043\ A) / 1{,}001 \quad (5)$$

La combinazione lineare restituisce un indice adimensionale compreso teoricamente tra 1 e 5, successivamente organizzato in cinque classi ordinali.

3 Risultati

3.1 Mappa di vulnerabilità territoriale alle inondazioni

La mappa relativa alla configurazione antecedente all'evento del 2017 evidenzia una distribuzione articolata delle cinque classi (Fig. 3). I livelli alto e molto alto si concentrano lungo il corridoio vallivo del Moche, con fasce che attraversano il settore centrale dell'AOI e proseguono verso la costa. Le classi basse interessano soprattutto i margini collinari e i settori più distanti dal reticolo principale. Questa lettura è coerente con la struttura dei pesi e con l'attribuzione di punteggi maggiori alle superfici pianeggianti e prossime ai corsi d'acqua.

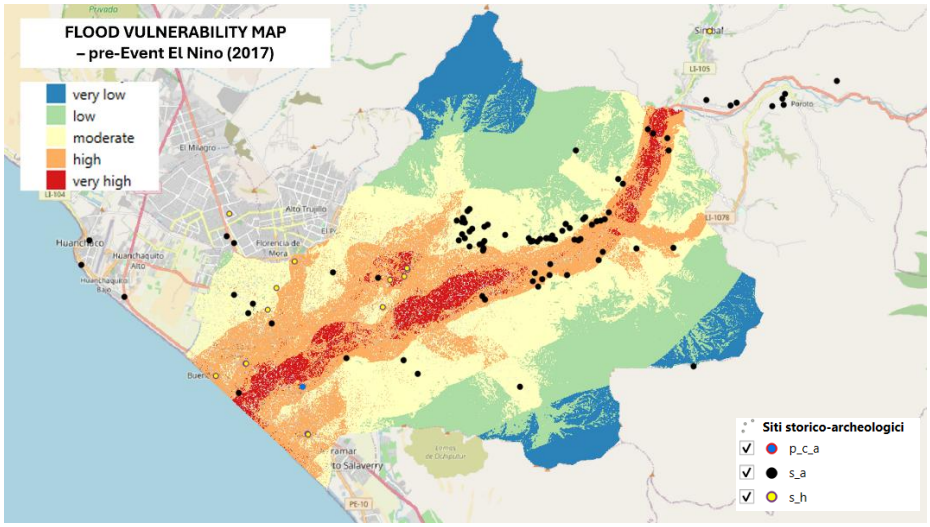


Fig. 3. Vulnerabilità territoriale alle inondazioni (FVI) e localizzazione dei siti storico-archeologici. Classi dalla molto bassa (blu) alla molto alta (rosso).

All'interno del corridoio ad alta suscettibilità sono presenti variazioni locali, dovute alla combinazione degli indicatori classificati. La carta non individua una superficie allagata continua, ma un insieme di condizioni territoriali relativamente più favorevoli al fenomeno. L'estensione delle fasce segue anche le soglie di distanza adottate, per cui il passaggio tra classi non deve essere interpretato come un limite fisico certo della piena.

3.2 Confronto quantitativo con le aree inondate CEMS del 2017

Il confronto della mappa di vulnerabilità territoriale alle inondazioni è stato effettuato utilizzando i prodotti dell'attivazione CEMS EMSR199, "Floods in Peru", del 22 marzo 2017[3]. Sono stati considerati il prodotto 13TRUJILLO DELINEATION MONIT01, contenente geometrie associate a osservazioni del 23, 24 e 27 marzo 2017, e i prodotti di *grading* 18TRUJILLOSOUTH e 21LAREDO, riferiti al 1° aprile 2017. I dati sono stati impiegati come cartografia già elaborata dal servizio. La selezione degli elementi da confrontare è stata effettuata attraverso l'attributo *interpret*, includendo esclusivamente i poligoni classificati come *Flooded Area*.

I layer vettoriali sono stati armonizzati nel sistema WGS84/UTM17S (EPSG: 32717), verificati geometricamente e rasterizzati sulla medesima griglia del FVI, con celle di 10×10 m. L'assegnazione è stata effettuata sulla base della posizione del centro della cella rispetto ai poligoni. L'analisi ha considerato esclusivamente i pixel FVI appartenenti alle classi 1–5, escludendo NoData e valori non classificati. Per il confronto complessivo è stata utilizzata l'unione delle aree allagate dei tre prodotti, contando una sola volta i pixel presenti in poligoni sovrapposti. Tale unione rappresenta una sintesi delle osservazioni disponibili in date differenti, non l'estensione simultanea dell'allagamento.

L'intersezione ha individuato 169.259 pixel allagati entro la superficie classificata, corrispondenti a 16,926 km². Di questi, il 3,64% ricade nella classe bassa (FVI_2), il 76,81% nella classe moderata (FVI_3), il 15,42% nella classe alta (FVI_4) e il 4,14% nella classe molto alta (FVI_5); nessun pixel ricade nella classe molto bassa (FVI_1). La quota degli allagamenti intercettata complessivamente dalle classi alta e molto alta, espressa dall'indicatore:

$$C_{45} = \frac{n_4 + n_5}{n_F} = 0{,}1955 = 19{,}55\%$$

dove n_4 e n_5 sono i pixel allagati CEMS nelle rispettive classi e n_F è il totale dei pixel allagati nel dominio analizzato. Il confronto separato restituisce valori di C45 del 14,93% per 13TRUJILLO MONIT01, del 100% per 18TRUJILLOSOUTH e del 97,76% per 21LAREDO, su superfici allagate rispettivamente pari a 15,991, 0,389 e 0,576 km².

I risultati evidenziano una corrispondenza elevata nei due prodotti locali e più limitata nel prodotto esteso di Trujillo, che domina il confronto complessivo per superficie allagata. La prevalenza della classe moderata indica che la soglia costituita

[3] https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/EMSR199/

dalle sole classi alta e molto alta intercetta una porzione ridotta delle inondazioni documentate. C_{45} misura, pertanto, la copertura degli allagamenti osservati da parte delle classi elevate e non l'accuratezza complessiva del modello, la probabilità di inondazione o il danno ai beni archeologici.

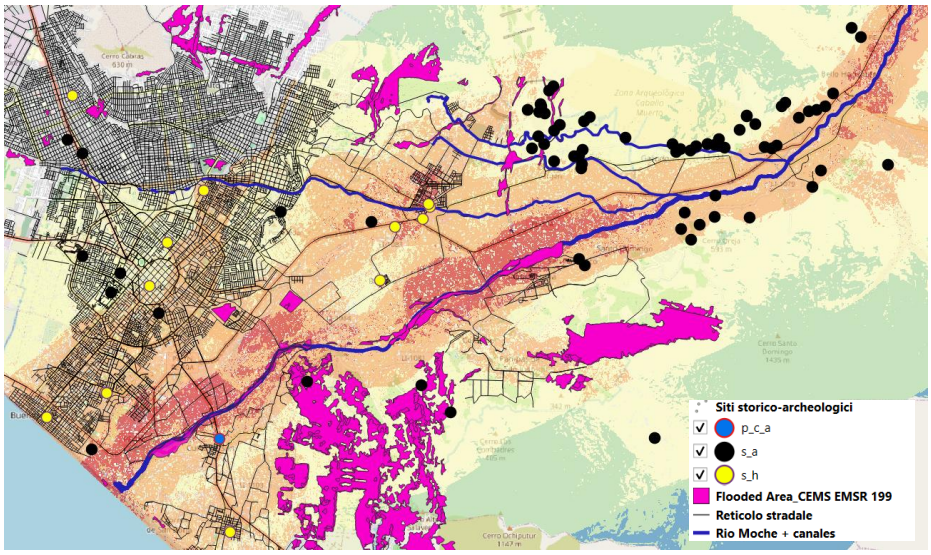


Fig. 4. Sovrapposizione delle aree inondate cartografate da CEMS EMSR199 (poligoni magenta) alla mappa di vulnerabilità alle inondazioni relativa all'evento *El Niño* del 2017 nella Valle del Moche (zoom su aree urbane di Trujillo e Laredo, Perù).

3.3 Esposizione del patrimonio storico-archeologico

L'esposizione del patrimonio è stata analizzata mediante sovrapposizione del layer puntuale relativo ai siti storico-archeologici individuati alla mappa FVI dell'evento 2017, attribuendo a ciascuna localizzazione la classe della cella raster corrispondente. Il dataset comprende 110 elementi, di cui 92 classificati come siti archeologici (s_a), 17 come siti storici (s_h) e uno come paesaggio culturale archeologico (p_c_a). Complessivamente, 88 punti ricadono su celle con valori FVI validi, mentre 22 risultano esterni alla superficie classificata o in corrispondenza di celle prive di una classe utilizzabile.

Considerando esclusivamente i siti archeologici, è stato possibile attribuire una classe a 76 localizzazioni: una ricade nella classe bassa (FVI_2), 49 nella moderata (FVI_3), 23 nell'alta (FVI_4) e 3 nella molto alta (FVI_5). Le due classi più elevate comprendono quindi 26 punti, pari al 34,2% delle localizzazioni archeologiche valutabili. Questi risultati individuano ambiti prioritari per approfondimenti geomatici e conservativi, senza attribuire automaticamente la medesima classe all'intera estensione dei siti.

4 Discussione e conclusioni

L'integrazione di dati territoriali, indicatori ambientali e localizzazioni archeologiche permette di individuare ambiti prioritari per ricognizioni e approfondimenti. Il confronto con CEMS EMSR199 evidenzia che il 19,55% della superficie allagata analizzata ricade nelle classi alta e molto alta, mentre il 76,81% appartiene alla classe moderata. I valori più elevati nei prodotti locali di Trujillo South e Laredo non sono quindi generalizzabili all'intera area. Queste percentuali descrivono la distribuzione degli allagamenti tra le classi, senza misurare l'accuratezza complessiva del modello.

La predominanza dei criteri idrografici spiega la concentrazione delle classi elevate lungo il fiume Moche, ma rende il risultato sensibile alla completezza del reticolo e alle soglie adottate. Quota, pendenza e prossimità possono introdurre ridondanze, mentre il ruolo dell'esposizione dei versanti richiede una motivazione locale. L'NDVI calcolato nel pre-evento (2017) evita di incorporare gli effetti delle inondazioni, ma non sostituisce informazioni su permeabilità e gestione dei canali. Il passo di griglia del DEM non garantisce inoltre la rappresentazione di argini, muri archeologici e micro-depressioni.

Tra le 76 localizzazioni archeologiche valutabili, 26 ricadono nelle classi alta e molto alta. L'attribuzione riguarda la cella campionata, non l'intera estensione del sito né il danno atteso. La vulnerabilità dei manufatti richiede ulteriori informazioni su materiali, stato di conservazione e caratteristiche del flusso.

Il FVI (Flood Vulnerability Index) costituisce pertanto uno strumento preliminare di selezione delle priorità. Il confronto quantitativo svolto deve essere integrato con la superficie delle classi nel dominio effettivamente osservato da CEMS e con analisi di sensibilità ai pesi. Rilievi di dettaglio e osservazioni conservative potranno approfondire la vulnerabilità dei singoli complessi archeologici.

Riferimenti bibliografici

1. UNESCO: Recovery of Peru's Culture Sector following the Recent Floods caused by El Niño (2017). https://www.unesco.org/en/articles/recovery-perus-culture-sector-following-recent-floods-caused-el-nino, ultimo accesso il 2026/10/10.
2. Saaty, T.L.: Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences* 1(1), 83–98 (2008). https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590
3. Hossain, M.N., Mumu, U.H.: Flood susceptibility modelling of the Teesta River Basin through the AHP-MCDA process using GIS and remote sensing. *Natural Hazards* 120, 12137–12161 (2024). https://doi.org/10.1007/s11069-024-06677-z
4. M. Sanità, H. D. T. Viet, R. Pierdicca, E. S. Malinverni and F. Di Stefano, "Remote Sensing and GIS Applications for Assessing Flood Vulnerability of Cultural Heritage Sites in Hue City, Central Vietnam," *IGARSS 2025 - 2025 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Brisbane, Australia, 2025, pp. 1644-1648, doi: 10.1109/IGARSS55030.2025.11242625.