MONITORAGGIO DEI BACINI IDRICI TRAMITE GOOGLE EARTH ENGINE: APPLICAZIONE AD IMMAGINI SENTINEL E LANDSAT

F. Bocchino^{1,*}, R. Ravanelli¹, V. Belloni¹

¹ Divisione di Geomatica e Geodesia, DICEA, Sapienza Universita` di Roma, Roma, Italia <filippo.bocchino, roberta.ravanelli, valeria.belloni>@uniroma1.it

Parole chiave: Monitoraggio dei bacini idrici, Obiettivi di sviluppo sostenibile, Google Earth Engine, Sentinel, Landsat.

Key words: Water reservoir monitoring, Sustainable Development Goals, Google Earth Engine, Sentinel, Landsat.

Abstract

I bacini idrici sono sempre più sottoposti a stress idrologici, pertanto è essenziale eseguire un continuo ed accurato monitoraggio di tali risorse, in modo tale da garantirne una gestione sostenibile. Questo lavoro propone una metodologia per il monitoraggio da remoto dell'estensione superficiale dei bacini idrici attraverso l'analisi di immagini satellitari multispettrali e di immagini acquisite con il Synthetic Aperture Radar (SAR). In particolare, e' stata implementata una strategia di segmentazione tramite Google Earth Engine (GEE) per distinguere i corpi d'acqua dalla superficie terrestre circostante e misurarne la loro estensione. Il primo approccio si basa sull'uso dell'Automatic Water Extraction Index (AWEI) e sul metodo Otsu per la selezione della soglia, il secondo approccio si basa sulla conversione dell'immagine da RGB (Rosso-Verde-Blu) a TSV (Tonalità, Saturazione, Valore) e sull'uso di una soglia parametrica, il terzo approccio si basa sull'uso delle immagini SAR e su una soglia selezionata empiricamente. Poi e' stata interamente sviluppata una strategia di validazione "statica" e sono state calcolate delle metriche standard per valutare l'accuratezza dei tre approcci durante la procedura di segmentazione. Il migliore, ovvero il metodo basato su AWEI, e' stato quindi applicato a tre corpi d'acqua in cui gli effetti della siccità' del 2022 sono stati particolarmente significativi: il lago Sawa (Iraq), il lago Poyang (Cina) e il fiume Po (Italia). I risultati hanno evidenziato, anche visivamente, l'ottima performance dell'approccio nella segmentazione dei corpi d'acqua dalle aree circostanti.

Water reservoirs are subjected to increasing hydrological stresses, therefore continuous and accurate monitoring of these resources is essential to ensure their sustainable management. This work proposes a methodology to remotely monitor the surface extent of water reservoirs through the analysis of satellite multispectral and Synthetic Aperture Radar (SAR) images. In particular, a segmentation strategy was implemented within Google Earth Engine (GEE) to distinguish water bodies from the surrounding land surface and measure their extension, by applying three different approaches to Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat-8 imagery. The first approach is based on the use of the Automatic Water Extraction Index (AWEI) and the self-adaptive Otsu's thresholding method, the second approach is based on the image conversion from RGB (Red-Green-Blue) to TSV (Hue, Saturation, Value) and the use of a parametric threshold, the third approach is based on the use of SAR imagery and an empirically selected threshold. A "static" validation strategy was developed from scratch and standard segmentation metrics were computed to evaluate the accuracy of the three approaches. The average values of the F1 scores on the Sentinel imagery were equal to 0.95, 0.90, and 0.84 for the three approaches, respectively. The best approach, i.e. the AWEI-based method, was then applied to three water bodies in which the effects of the 2022 drought were particularly significant: Sawa lake (Iraq), Poyang lake (China), and Po river (Italy). The results visually highlighted the good performance of the approach in segmenting the water bodies from the surrounding areas.

1. Introduzione

Le risorse idriche naturali e artificiali rappresentano fonti essenziali di acqua dolce per il consumo umano e animale, per l'irrigazione agricola e per numerose applicazioni industriali. Attualmente, le misurazioni dei livelli d'acqua vengono generalmente effettuate mediante strumenti tradizionali a terra, come le stazioni di monitoraggio. I dati raccolti da questi strumenti vengono utilizzati per stimare l'area ed il volume dei bacini (e le loro variazioni nel tempo) utilizzando curve di volume-areaelevazione derivate da informazioni batimetriche e topografiche del bacino stesso (Tong et al., 2016, Hamoudzadeh et al., 2023). Tuttavia, e' possibile effettuare il monitoraggio in situ quasi esclusivamente nei Paesi sviluppati. Se si considerano invece delle aree remote, subentra la difficolta' nell'installazione e nella manutenzione delle stazioni di misura. Inoltre, anche nei Paesi sviluppati, le stazioni di misura non sono installate presso i bacini idrici di piccole e medie dimensioni. Al contrario, l'uso delle tecnologie di Osservazione della Terra (EO) può notevolmente ridurre i costi di monitoraggio (indipendentemente dall'estensione effettiva del bacino) e fornire dati frequenti e regolari che facilitano il monitoraggio continuo dei bacini d'acqua, in accordo a procedure omogenee a livello mondiale (Valadão et al., 2021). Lo scopo di questo lavoro e' precisamente inserito in questo contesto: l'obiettivo generale e` quello di gettare le basi per lo sviluppo di una procedura basata su dati EO gratuiti per monitorare in modo continuo l'estensione di qualsiasi bacino idrico. In particolare, in questa analisi preliminare focalizzata su immagini satellitari multispettrali e SAR, sono stati esaminati tre diversi approcci di segmentazione in grado di distinguere i corpi d'acqua dalla superficie terrestre circostante e misurarne l'estensione utilizzando immagini di Sentinel-1, Sentinel-2 e Landsat-8. Infatti, il calcolo continuo di metriche bidimensionali, come il perimetro e l'area, e` un primo passo verso il monitoraggio delle variazioni stagionali ed annuali dei bacini

^{*} Corresponding author

idrici: questi parametri consentirebbero di ricostruire le dinamiche a lungo termine delle acque superficiali. Questo obiettivo e' strettamente correlato agli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile delle Nazioni Unite (SDGs) riguardanti la disponibilita' d'acqua (SDG 6 - Acqua pulita e servizi igienico-sanitari) ed il monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici (SDG 13 - Azione per il clima), nonche' al Piano di Ripresa Next Generation EU.

2. Metodologia

Sono state esaminate ed implementate tramite Google Earth Engine (GEE) tre diverse strategie di segmentazione dell'acqua. GEE e' una piattaforma di cloud computing che integra un vasto archivio di dati di telerilevamento liberamente accessibili, tra cui collezioni di immagini Landsat e Sentinel. Attraverso efficienti Interfacce di Programmazione delle Applicazioni (API), GEE consente di effettuare analisi geospaziali su larga scala, secondo il noto paradigma "data-informationknowledge-wisdom" (Kavvada et al., 2020). In particolare, proseguendo il lavoro iniziato in (Ravanelli et al., 2023), sono stati investigati i tre seguenti approcci di segmentazione dell'acqua:

- il primo (Sengupta et al., 2020, Donchyts et al., 2016) si basa sull'applicazione dell'Automatic Water Extraction Index (AWEI) (Feyisa et al., 2014) a immagini multispettrali e sul metodo Otsu per la selezione della soglia (Otsu, 1979);
- il secondo (Valadão et al., 2021) si basa sull'uso di immagini multispettrali e sulla conversione dal modello di colore RGB (Rosso-Verde-Blu) al modello di colore TSV (Tonalità, Saturazione, Valore) a cui viene applicata una soglia parametrica;
- il terzo (Geohackweek, 2016) si basa sull'uso di immagini SAR (Synthetic Aperture Radar) e su una soglia selezionata empiricamente.

I primi due approcci sono stati applicati alle immagini multispettrali di Sentinel-2 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023a) e Landsat-8 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023c), mentre il terzo e' stato applicato alle immagini SAR di Sentinel-1 (Google Earth Engine Data Catalog, 2023b). Per gli approcci basati su immagini multispettrali, sono state selezionate solo le immagini con una percentuale di pixel nuvolosi inferiore al 30%, e poi e' stata applicata una maschera per le nuvole, utilizzando il band bitmask QA60 di Sentinel-2 (Google Earth Engine Data Catalog, 2022) e i band QA_PIXEL e QA RADSAT di Landsat-8 (ESA, 2022). In tutti gli approcci e' stata utilizzata l'operazione della mediana per aggregare i dati delle immagini nel tempo (Google Earth Engine Documentation, 2023). La mediana permette di aggregare tutte le immagini disponibili in un determinato periodo temporale, ottenendo cos'i un'immagine complessiva calcolata prendendo il valore mediano di ogni pixel, per ogni banda, attraverso lo stack temporale delle immagini. Le immagini mediane sono state l'input per i tre approcci di segmentazione. Nell'analisi e` stato considerato un periodo di un anno (il 2019) e le immagini raccolte sono state analizzate in sottoperiodi trimestrali. In questo modo, tutte le immagini disponibili nel 2019 per i tre satelliti considerati sono state suddivise in quattro sotto-collezioni per investigare separatamente le quattro stagioni. La Figura 1 e la Figura 2 mostrano le immagini mediane ottenute per Sentinel-2 (dopo l'applicazione dei filtri delle nuvole) e per Sentinel-1. Entrambe le immagini sono relative al periodo gennaio-marzo 2019 e alla

zona del porto di Marghera (Venezia, Italia), cioe' l'area che e' stata successivamente utilizzata anche per la fase di validazione, come descritto nella Sezione 3.



Figura 1. Immagine mediana multispettrale di Sentinel-2 (porto di Marghera, gennaio-marzo 2019).



Figura 2. Immagine mediana di Sentinel-1 (porto di Marghera, gennaio-marzo 2019).

Ogni approccio ha restituito come output una maschera di segmentazione dell'acqua, dalla quale e' stata calcolata l'area del bacino idrico. Questa e' stata quantificata grazie ad una funzione che permette di contare i pixel classificati come acqua e poi di moltiplicare questo numero per la risoluzione dell'immagine. La Tabella 1 mostra la risoluzione (dimensione del pixel) delle bande utilizzate nelle analisi. Le sezioni successive descriveranno in dettaglio ciascun approccio.

Risoluzione delle bande (dimensione del pixel) [m]							
Satellite	RGB	NIR	SWIR1/SWIR2	GRD (IW)			
Sentinel-2	10	10	20	-			
Landsat-8	30	30	30	-			
Sentinel-1	-	-	-	10			

Tabella 1. Risoluzione delle bande di Sentinel-2, Landsat-8, and Sentinel-1: RGB, Near-infrared (NIR), Short-wave infrared (SWIR), and Ground Range Detected (GRD) Interferometric Wide (IW).

2.1 Approccio AWEI

Nell'approccio basato sull'AWEI, i pixel d'acqua presenti nell'immagine mediana di input sono stati identificati attraverso l'implementazione dell'indice spettrale AWEI e l'applicazione del metodo di thresholding basato sugli algoritmi di Otsu e di Canny (rilevatore di bordi) (Donchyts et al., 2022). L'indice AWEI e' definito nell'Equazione 1 (Feyisa et al., 2014):

$$AWEI = 4 \cdot (\rho_{GREEN} - \rho_{SWIR1}) - 0.25 \cdot \rho_{NIR} - 2.75 \cdot \rho_{SWIR2}$$
(1)

dove ρ rappresenta la riflettanza per le bande GREEN, SWIR1, SWIR2 e NIR, mentre i coefficienti e le combinazioni aritmetiche delle bande spettrali scelte sono state determinate attraverso un esame critico delle proprieta` di riflettanza delle varie tipologie di copertura del terreno (Feyisa et al., 2014).

L'indice AWEI consente di massimizzare la separabilita' tra i pixel d'acqua e quelli non d'acqua, permettendo quindi di estrarre la superficie d'acqua con elevata precisione (Feyisa et al., 2014). A differenza del Normalized Difference Water Index (NDWI) o del Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), l'uso dell'indice AWEI evita errori di segmentazione dovuti a vari fattori come nuvole, neve e ghiaccio. Inoltre, l'AWEI non commette l'errore di classificare erroneamente come acqua le aree in ombra, dovute ad esempio alla presenza di rilievi topografici o alla presenza di nubi (Donchyts et al., 2016). L'aumento del contrasto tra l'acqua ed altre superfici scure fornito da questo indice (rispetto all'indice NDWI) e' mostrato nella Figura 3.



Figura 3. Confronto tra le immagini NDWI (sopra) and AWEI (sotto) ottenute sulla stessa area (laguna di Venezia).

Dopo il calcolo dell'indice AWEI, e' stato prima applicato l'algoritmo di Canny per rilevare i bordi e poi e' stato applicato il metodo di thresholding di Otsu. La rilevazione dei bordi e' stata fondamentale per poter fornire in input ad Otsu solo i pixel situati sul bordo acqua-terra (Donchyts et al., 2016). Questo ha permesso di ridurre di molto il numero di pixel analizzati, migliorando cos'i le prestazioni del metodo. La rilevazione dei pixel d'acqua e' stata poi affinata applicando una dilatazione morfologica. La Figura 4 mostra la maschera d'acqua generata applicando questo primo approccio alle immagini di Sentinel-2.

2.2 Approccio TSV

Nell'approccio basato su TSV (Valadão et al., 2021), l'immagine mediana di input RGB (vedi Figura 1) e' stata prima trasformata in TSV. È stata poi selezionata solo la banda relativa alla tonalita' per facilitare la successiva identificazione dei



Figura 4. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio AWEI ed utilizzando le immagini di Sentinel-2.

pixel d'acqua (Valadão et al., 2021). In questo caso, la segmentazione dell'acqua si basava su una soglia parametrica: più specificamente, solo i pixel che ricadevano nell'intervallo di tonalita` 0.25-0.95 sono stati classificati come pixel d'acqua. La maschera risultante e` mostrata nella Figura 5.



Figura 5. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio basato su TSV ed utilizzando immagini di Sentinel-2.

2.3 Approccio SAR

Le immagini di Sentinel-1 sono state filtrate selezionando solo la polarizzazione VV. È importante sottolineare due criticità che influenzano le immagini SAR. In primo luogo, alcune superfici alterano la polarizzazione del segnale SAR, ma questo non accade frequentemente per superfici d'acqua. In secondo luogo, le immagini SAR sono spesso affette dal rumore "speckle" che deteriora la qualita' dell'immagine (Geohackweek, 2016). Per ridurre lo speckle e' stato applicato un filtro mediano focale. Successivamente, e' stato implementato un semplice metodo di thresholding per identificare i pixel d'acqua nelle immagini SAR. In particolare, e' stato scelto un valore di soglia per la retrodiffusione (backscattering) e tutti i pixel al di sotto di quella soglia sono stati classificati come acqua. Il valore di soglia selezionato e' stato -16 dB ed e' stato scelto empiricamente tramite ispezione visiva dell'istogramma che rappresenta il numero di pixel e l'intensita' del segnale retrodiffuso (Figura 6).

La maschera ottenuta con questo approceio e` mostrata in figura 7.

Figura 6. Istogramma per la selezione della soglia SAR.

Figura 7. Immagine di segmentazione dell'acqua ottenuta con l'approccio SAR ed utilizzando immagini di Sentinel-1.

3. Validazione

I tre approcci sono stati validati utilizzando una strategia di "validazione statica", ossia considerando come area di validazione una zona in cui le variazioni del livello dell'acqua non influenzassero l'estensione della superficie d'acqua nel tempo: in questo modo la geometria che descrive il confine acqua/terra ha costituito un riferimento totalmente indipendente dalla stagionalità. In particolare, i diversi approcci sono stati applicati all'area del porto di Marghera e si e' considerato il 2019 come anno di riferimento. I risultati dei tre approcci applicati su quest'area sono stati poi confrontati con uno shapefile di riferimento. Lo shapefile utilizzato e' relativo al Sito di Interesse Nazionale (SIN) di Marghera ed e' disponibile sul sito web del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica del Governo Italiano. Nell'area selezionata, i confini dell'acqua sono artificiali e quindi, in teoria, indipendenti dalla variazione del livello dell'acqua: questo ha consentito di confrontare le prestazioni dei tre approcci utilizzando immagini acquisite in epoche diverse. La maschera di riferimento e le maschere d'acqua generate con i tre approcci sono mostrate nella Figura 8.

Le Figure 8-b ed 8-e mostrano qualitativamente come l'approccio AWEI funzioni meglio rispetto agli altri. La Figura 8-c mostra invece che l'approccio basato su TSV genera un numero maggiore di falsi positivi rispetto all'approccio AWEI. Inoltre, l'approccio TSV non riesce a segmentare correttamente i pixel di terra situati sul confine terra-acqua, ma neanche quelli situati

Figura 8. Maschera di riferimento (a) e maschere d'acqua ottenute con il primo approccio applicato sulle immagini Sentinel (b) e sulle immagini Landsat (e), con il secondo approccio su Sentinel (c) e Landsat (f), e con il terzo approccio (d) (Porto di Marghera, gennaio-marzo 2019). Veri positivi in blu, veri negativi in verde, falsi positivi in rosso e falsi negativi in giallo.

molto all'interno. Il motivo di questi errori e' legato alla presenza di alcuni tetti nell'area di validazione: il loro colore rientra nell'intervallo di tonalita' di 0.25-0.95, ovvero nello stesso intervallo che e' stato impostato per classificare l'acqua in questo approccio. Per migliorare ulteriormente le prestazioni di questo metodo, una soluzione potrebbe essere quella di restringere l'intervallo di tonalita' o di selezionare un'area di validazione non urbana. La Figura 8-d evidenzia come l'approccio SAR presenti molti problemi di segmentazione e come quindi fornisca i risultati peggiori. In questo caso, il numero di pixel classificati come falsi negativi e' maggiore, cioe' molti pixel d'acqua vengono classificati come pixel di terra. Infine, continuando ad analizzare la Figura 8-d, e' possibile notare come alcuni pixel situati nell'entroterra siano stati classificati come falsi positivi: in realtà però in questa porzione l'algoritmo funziona correttamente, bens'i e' il riferimento a non essere corretto. Quella zona e' infatti una piccola area umida che nella maschera di riferimento e' stata erroneamente considerata come terra. Questo influisce anche sulle prestazioni del secondo metodo.

Per ciascun approccio, e' stata calcolata la matrice di confusione,

utilizzando sia le collezioni di Sentinel che quelle di Landsat, per indagare le prestazioni degli approcci esaminati. Sono state calcolate le seguenti metriche standard: Accuratezza (A), Intersection over Union (IoU), Precisione (P), Sensibilità` (R) e F1 score (F1). I risultati sono presentati nelle Tabelle 2, 3, 4, 5 e 6.

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	12	0.98	0.92	0.97	0.94	0.96
Q2 2019	7	0.98	0.90	0.99	0.91	0.95
Q3 2019	9	0.98	0.91	0.99	0.92	0.95
O4 2019	8	0.98	0.89	0.95	0.94	0.94

Tabella 2. Metriche relative all'approccio AWEI ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-2).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	15	0.98	0.92	0.98	0.94	0.96
Q2 2019	13	0.98	0.90	0.97	0.93	0.95
Q3 2019	17	0.98	0.91	0.98	0.93	0.95
Q4 2019	10	0.98	0.89	0.95	0.94	0.94

Tabella 3. Metriche relative all'approccio AWEI ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Landsat-8).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	12	0.97	0.86	0.86	0.97	0.92
Q2 2019	7	0.97	0.84	0.86	0.96	0.91
Q3 2019	9	0.96	0.82	0.85	0.97	0.90
Q4 2019	8	0.95	0.78	0.79	0.97	0.87

Tabella 4. Metriche relative all'approccio TSV ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-2).

Temporal range	Images	Α	IoU	P	R	F1
Q1 2019	15	0.97	0.87	0.91	0.96	0.93
Q2 2019	13	0.98	0.88	0.95	0.93	0.94
Q3 2019	17	0.98	0.89	0.95	0.93	0.94
Q4 2019	10	0.97	0.84	0.87	0.95	0.91

Tabella 5. Metriche relative all'approccio TSV ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Landsat-8).

Temporal range	Images	Α	IoU	Р	R	F1
Q1 2019	44	0.95	0.73	0.98	0.74	0.84
Q2 2019	46	0.95	0.71	0.98	0.72	0.83
Q3 2019	47	0.95	0.72	0.98	0.73	0.84
Q4 2019	44	0.95	0.73	0.98	0.73	0.84

Tabella 6. Metriche relative all'approccio SAR ottenute impostando un periodo temporale di tre mesi (Sentinel-1).

Le Tabelle 2, 4 e 6 dimostrano di nuovo che il primo approccio offre prestazioni migliori rispetto agli altri: tutte le metriche, tranne la sensibilità, sono superiori rispetto alle corrispondenti metriche degli altri approcci. In particolare, gli F1-score medi dei tre approcci applicati alle immagini di Sentinel-2 (primo e secondo approccio) e Sentinel-1 (terzo approccio) sono pari rispettivamente a 0.95, 0.90 e 0.84. Gli stessi valori di questa metrica per le immagini di Landsat sono 0.95 per il primo approccio e 0.93 per il secondo.

Inoltre, confrontando le variazioni degli F1-score relative ai sottoperiodi e per ciascun approccio (Tabelle 2, 4 e 6) e' possibile notare che i metodi AWEI e SAR sono meno influenzati dalla stagionalita' rispetto al metodo TSV. Questo comportamento può essere correlato alle diverse condizioni di illuminazione che caratterizzano le immagini mediane durante l'inverno e l'estate. Infatti, il metodo basato su TSV segmenta i pixel dell'acqua in base a un intervallo di tonalità: le variazioni nelle condizioni di luminosità causano un cambiamento nei valori di tonalità, influenzando quindi le prestazioni di questo approccio. Le differenze tra le stagioni possono essere apprezzate visivamente nella Figura 9, in cui le aree cerchiate in nero evidenziano i pixel che vengono erroneamente classificati come falsi positivi nel periodo estivo (a destra) mentre vengono correttamente classificati nel periodo invernale (a sinistra).

Figura 9. Risultati del confronto tra gennaio-marzo 2019 (sinistra) e luglio-settembre 2019 (destra) per il secondo approccio.

Infine, la Tabella 6 mette in evidenza come il numero di immagini SAR disponibili per ciascun periodo sia superiore al numero di immagini multispettrali. Ciò è dovuto a due motivi: in primo luogo, l'area di Marghera si trova in una zona di intersezione di diverse orbite del satellite Sentinel-1, sia ascendenti che discendenti; in secondo luogo, le immagini SAR non sono influenzate dalle nuvole, quindi non e' stato applicato alcun filtro per rimuovere le immagini.

4. Casi studio

Il miglior metodo (cioe` l'approccio AWEI) e` stato applicato a tre casi di studio in cui gli effetti della siccita` del 2022 sono stati particolarmente significativi. Per ragioni di sintesi, di seguito vengono mostrati solo i risultati ottenuti utilizzando le immagini Sentinel-2.

4.1 Lago Sawa

Il lago Sawa e' un lago endoreico (lungo 4,5 km e largo 1,8 km) situato nel sud dell'Iraq nella provincia di Muthanna, vicino al fiume Eufrate. Il livello dell'acqua nel lago solitamente subiva oscillazioni tra la stagione secca e quella umida ma, nonostante fosse situato in una regione arida, non si era mai prosciugato del tutto grazie all'equilibrio tra evaporazione e apporto d'acqua tramite precipitazioni e falde sotterranee (Service, 2015). Tuttavia, negli ultimi dieci anni, il lago ha iniziato a degradarsi a causa della mancanza di manutenzione delle infrastrutture idriche e della costruzione di dighe nei paesi a monte, le quali hanno ridotto il flusso dei fiumi Tigri ed Eufrate (Radeef and Abdulameer, 2023). Nel 2022 il lago Sawa e' stato inoltre gravemente colpito dalla crisi idrica causata dal cambiamento climatico, che ha portato a precipitazioni scarse e siccità: questo evento siccitoso ha portato alla completa scomparsa del lago stesso (Copernicus, 2022). Questo effetto può essere apprezzato nella Figura 10, dove si confronta l'immagine mediana ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 con quella corrispondente del 2022.

L'applicazione del metodo AWEI a questo lago ha restituito le maschere d'acqua mostrate in Figura 11.

Da queste maschere e` stata estratta la superficie classificata come acqua in modo da riuscire a quantificarne la variazione: l'area e` diminunita passando da 3.90 km² nel 2020 a 0.39 km² nel 2022.

Figura 10. Immagine mediana (Sentinel-2) del lago Sawa ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 (sinistra) e gennaio-marzo 2022 (destra).

Figura 11. Maschera d'acqua del lago Sawa ottenuta per il periodo gennaio-marzo 2020 (sinistra) e gennaio-marzo 2022 (destra).

4.2 Lago Poyang

Il lago Poyang si trova a Jiujiang, nella provincia di Jiangxi, in Cina, ed è il più grande lago d'acqua dolce della Cina. Il lago è alimentato dai fiumi Gan, Xin e Xiu, che si collegano al fiume Yangtze attraverso uno stretto canale. Il lago Poyang subisce variazioni periodiche delle proprie dimensioni tra la stagione invernale e quella estiva: in inverno, i livelli d'acqua nel lago sono tipicamente bassi, mentre in estate aumentano significativamente grazie alle piogge estive. Tuttavia, negli ultimi anni, le dimensioni del lago si sono ridotte complessivamente. Durante l'estate del 2022, il bacino del fiume Yangtze e' stato colpito dalla siccità, e quindi il lago Poyang si è prosciugato rapidamente raggiungendo livelli d'acqua che non si vedevano da decenni. In particolare, il 23 giugno, la stazione di Xingzi ha registrato i livelli d'acqua più alti dell'anno sul lago Poyang; in seguito però, il Centro di Monitoraggio Idrologico di Jiangxi ha iniziato a registrare temperature elevate e mancanza di piogge (NASA, 2022). Il 6 agosto, i livelli dell'acqua erano scesi a 11.99 metri ed il Centro ha identificato questa data come l'inizio della stagione di prosciugamento del lago: i livelli dell'acqua sono continuati a diminuire, registrando 8.96 metri il 30 agosto.

In questo caso, il confronto e' stato effettuato tra la primavera 2022 (ovvero l'immagine mediana ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022) e l'estate 2022 (ovvero l'immagine mediana ottenuta per il periodo luglio-settembre 2022). Le immagini mediane illustrate nella Figura 12 mostrano la tendenza descritta in precedenza, che viene confermata dalle misure dell'area: dalle maschere rappresentate nella Figura 13 e' stata ottenuta un'area pari a 2281.48 km² per la primavera 2022 ed un'area pari a 1054.61 km² per l'estate 2022.

4.3 Fiume Po

Il fiume Po è il fiume più lungo d'Italia (652 km), si trova nel Nord del Paese e scorre da est a ovest attraversando citta' italiane molte importanti. La vasta pianura attorno al Po e' chiamata Pianura Padana: circa 20 milioni di persone vivono l'1 (un terzo

Figura 12. Immagine mediana (Sentinel-2) del lago Poyang ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022 (sinistra) e luglio-settembre 2022 (destra).

Figura 13. Maschera d'acqua del lago Poyang ottenuta per il periodo aprile-giugno 2022 (sinistra) e luglio-settembre 2022 (destra).

della popolazione italiana) e rappresenta la principale area industriale nonché la più grande area agricola del Paese, tanto da essere responsabile del 35% della produzione agricola italiana (Borz'1 et al., 2021). Inoltre, l'acqua del fiume Po e' essenziale per la produzione di energia: il suo flusso e' controllato da numerose dighe che funzionano come centrali idroelettriche e diverse centrali termoelettriche utilizzano l'acqua del bacino del Po come refrigerante.

Durante il 2022, a causa dell'intensa siccità, il livello dell'acqua del fiume ha raggiunto il minimo storico nelle sezioni principali ed il flusso di portata ha toccato il suo minimo storico (Po River Basin District Authority, 2022). L'analisi e' stata effettuata confrontando la primavera 2020 e la primavera 2022 in una porzione di 50 km del fiume Po situata vicino a Piacenza. I risultati sono mostrati nelle Figure 14 e 15, dove e' possibile osservare una riduzione della superficie da 14.72 km² a 11.22 km², ovvero la superficie e' diminuita di circa il 25% in soli due anni.

Figura 14. Immagine mediana (Sentinel-2) del fiume Po ottenuta per il periodo aprile-giugno 2020 (sopra) e aprile giugno 2022 (sotto).

5. Conclusioni e sviluppi futuri

L'obiettivo di questo lavoro consisteva nel gettare le basi per lo sviluppo di una metodologia per il monitoraggio continuo dei bacini idrici attraverso l'analisi di immagini satellitari multispettrali e SAR. Il principale obiettivo era quello di implementare una strategia di segmentazione in grado di distinguere

Figura 15. Maschera d'acqua del fiume Po ottenuta per il periodo aprile-giugno 2020 (sopra) e aprile-giugno 2022 (sotto).

l'acqua dalla superficie terrestre circostante e, quindi, misurare l'estensione planimetrica dei bacini idrici partendo dall'area occupata dai pixel d'acqua identificati nelle maschere. In particolare, sono stati implementati tre diverse approcci tramite Google Earth Engine ed applicati alle immagini di Sentinel-1, Sentinel-2 e Landsat-8.

Il primo approccio si basa sull'utilizzo dell'indice AWEI (Automatic Water Extraction Index) e sul metodo di thresholding di Otsu; il secondo approccio si basa sulla conversione dell'immagine da RGB (Rosso-Verde-Blu) a TSV (Tonalità, Saturazione, Valore) e sull'uso di una soglia parametrica; il terzo approccio si basa sull'uso di immagini SAR e su una soglia selezionata empiricamente.

È stata interamente sviluppata una strategia di "validazione statica" e sono state calcolate metriche standard per valutare l'accuratezza dei tre approcci di segmentazione. I valori medi degli F1-score ottenuti per i tre approcci sulle immagini Sentinel erano rispettivamente pari a 0.95, 0.90 e 0.84. La stessa metrica sulle immagini Landsat era 0.95 per il primo approccio e 0.93 per il secondo. Il miglior approccio (quello basato sull'AWEI) e' stato poi applicato a tre corpi idrici in cui gli effetti della siccita` del 2022 sono stati particolarmente significativi: il lago Sawa (Iraq), il lago Poyang (Cina) ed il fiume Po (Italia). I risultati hanno evidenziato buone prestazioni dell'approccio nel segmentare i corpi idrici dalle aree terrestri circostanti. Tuttavia, un adeguato monitoraggio dei bacini idrici non include solo la stima dell'estensione della loro superficie, ma anche la quantificazione del loro volume. In questo articolo e' stata esplorata solo la stima dell'estensione in quanto il calcolo continuo di metriche 2D rappresenta un primo passo verso il monitoraggio delle variazioni stagionali e annuali dei bacini idrici: questo consente infatti di ricostruire le dinamiche delle acque superficiali a lungo termine.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, la validazione verra' estesa ad altre aree. In questo lavoro, la validazione e' stata effettuata nel Sito di Interesse Nazionale del porto di Marghera, e questa scelta ha introdotto errori aggiuntivi nella fase di validazione stessa a causa della presenza nell'area di edifici e vegetazione. Inoltre, e' stata selezionata l'area del porto perche' in questa zona la superficie d'acqua rimane costante nel tempo. La generazione di un dataset a partire da immagini satellitari ad alta risoluzione consentira' di validare la metodologia anche su riferimenti dinamici, aumentando la generalizzazione della metodologia. Inoltre, la generazione del dataset potrebbe aprire la strada all'utilizzo di approcci data-driven, come algoritmi di deep learning. Per quanto riguarda i risultati SAR, sviluppi futuri indagheranno un metodo di selezione delle soglie basato su approcci automatici (ad esempio, il metodo di thresholding di Otsu) al posto delle soglie parametriche utilizzate finora. Infine, verra` esaminato come poter combinare i tre approcci testati per poter migliorare i risultati.

Riconoscimenti

Questo progetto ha ricevuto finanziamenti dalla European High-Performance Computing Joint Undertaking (JU) nell'am- bito dell'accordo di sovvenzione n. 951745. La JU riceve supporto dal programma di ricerca e innovazione dell'Unione Europea Horizon 2020 e dai paesi Germania, Italia, Slovenia, Francia e Spagna.

Bibliografia

Borz'1, I., Monteleone, B., Bonaccorso, B., Martina, M., 2021. Estimating the economic impacts of drought on agriculture th- rough models and surveys in the Po river basin (Northern Italy). EGU General Assembly Conference Abstracts, EGU21–12066.

Copernicus, 2022. Al Sawa Lake has completely dried up — Copernicus — copernicus.eu. www.copernicus.eu/ en/media/imageday-gallery/al-sawa-lake-has- completely-dried. [Accessed 08 February 2023].

Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E., Van de Giesen, N., 2016. A 30 m resolution surface water ma- sk including estimation of positional and thematic differences using landsat 8, srtm and openstreetmap: a case study in the Murray-Darling Basin, Australia. Remote Sensing, 8(5), 386.

Donchyts, G., Winsemius, H., Baart, F., Dahm, R., Schel- lekens, J., Gorelick, N., Iceland, C., Schmeier, S., 2022. High-resolution surface water dynamics in Earth's small and medium-sized reservoirs. Scientific reports, 12(1), 1–13.

ESA, 2022. Cloud Masks. https://sentinel.esa. int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2- msi/level-1c/cloud-masks.

Feyisa, G. L., Meilby, H., Fensholt, R., Proud, S. R., 2014. Automated Water Extraction Index: A new technique for sur- face water mapping using Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 140, 23–35. Geohackweek, 2016. SAR water body classification. https://mbonnema.github.io/GoogleEarthEngine/07- SAR-Water-Classification/.

Google Earth Engine Data Catalog, 2022. Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A. https: //developers.google.com/earth-engine/datasets/ catalog/COPERNICUS_S2_SR. [Accessed 28 February 2023].

Google Earth Engine Data Catalog, 2023a. Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A — de- velopers.google.com. https://developers.google.com/ earth-

engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_ HARMONIZED. [Accessed 28 February 2023].

Google Earth Engine Data Catalog, 2023b. Sentinel-1 SAR GRD: C-band Synthetic Aperture Radar Ground Range Detected, log scaling developers.google.com. https://developers.google.com/earth-engine/ datasets/catalog/COPERNICUS_S1_GRD. [Accessed 28 February 2023]. Google Earth Engine Data Catalog, 2023c. USGS Landsat 8 Le-vel 2, Collection 2, Tier 1 — developers.google.com. https: //developers.google.com/earth-engine/datasets/ catalog/LANDSAT_LC08_C02_T1_L2#description. [Accessed 28 Febbraio 2023]. Google Earth Engine Documentation, 2023. Reducer Overview.https://developers.google.com/earthengine/guides/reducers_intro. [Accessed 28 February 2023].

Hamoudzadeh, A., Ravanelli R., Crespi M., 2023. GEDI da-ta within Google Earth Engine: preliminary analysis of a re- source for inland surface water monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* In press.

Kavvada, A., Metternicht, G., Kerblat, F., Mudau, N., Hal-dorson, M., Laldaparsad, S., Friedl, L., Held, A., Chuvie- co, E., 2020. Towards delivering on the Sustainable Deve- lopment Goals using Earth observations. *Remote Sensing ofEnvironment*, 247.

NASA, 2022. Parched Poyang Lake — earthobservatory.nasa.gov. https://earthobservatory.nasa.gov/ images/150285/parched-poyang-lake. [Accessed 28 February 2023]..

Otsu, N., 1979. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62-66.

Po River Basin District Authority, 2022. Report of 22 July 2022 -Po River. *Permanent observatory on water uses in the hydrographic district of the river Po.*

Radeef, H. A., Abdulameer, I. M.-A., 2023. The Wa-ter

Area of Sawa Lake as Derived from Land SurfaceTemperature and Remote Sensing Data. *Ibn AL-HaithamJournal For Pure and Applied Sciences*, 36(1), 100–112. https://doi.org/10.30526/36.1.2873.

Ravanelli, R., Mazzucchelli, P., Belloni, V., Bocchino, F., Mor-selli, L., Fiorino, A., Gerace, F., Crespi, M., 2023. Earth Ob- servation Big Data exploitation for water reservoirs continuous monitoring: the potential of Sentinel-2 data and HPC. C. Iera- citano, N. Mammone, M. Di Clemente, M. Mahmud, R. Fur- faro, F. C. Morabito (eds), *The Use of Artificial Intelligencefor Space Applications: Workshop at the 2022 International Conference on Applied Intelligence and Informatics*, Studies in Computational Intelligence. In press.

Sengupta, D., Chen, R., Meadows, M. E., Banerjee, A., 2020. Gaining or losing ground? Tracking Asia's hunger for 'new' coastal land in the era of sea level rise. *Science of The Total Environment*, 732, 139290.

Service, R. S. I., 2015. Sawa Lake — Ramsar Sites Information Service — rsis.ramsar.org. https://rsis.ramsar.org/ris/ 2240. [Accessed 28 Febbraio 2023].

Tong, X., Pan, H., Xie, H., Xu, X., Li, F., Chen, L., Luo, X., Liu, S., Chen, P., Jin, Y., 2016. Estimating water volume variations in Lake Victoria over the past 22years using multi- mission altimetry and remotely sensed images. *Remote Sensing of Environment*, 187, 400-413.

Valadão, L. V., Cicerelli, R. E., de Almeida, T., Ma, J. B. C., Garnier, J., 2021. Reservoir metrics estimated by remote sen- sors based on the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 24(100652).