

STIMA DEGLI EFFETTI DELLA PANDEMIA COVID-19 SULLE AREE ARCHEOLOGICHE ATTRAVERSO TECNICHE DI REMOTE SENSING: SITO UNESCO CHAN CHAN (PERÙ)

ESTIMATING THE IMPACT OF THE COVID-19 PANDEMIC ON ARCHAEOLOGICAL AREAS BY REMOTE SENSING TECHNIQUES: CHAN CHAN UNESCO SITE (PERU)

M. Sanità^a, F. Colosi^b, F. Di Stefano^a, E. S. Malinverni^a, R. Pierdicca^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche, Via Brecce Bianche, 12, 60131, Ancona, Italy – m.sanita@pm.univpm.it; f.distefano@staff.univpm.it; e.s.malinverni@staff.univpm.it; r.pierdicca@staff.univpm.it

^b Istituto di Scienze del Patrimonio Culturale, Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Via Salaria, 300, 00016 Rome, Italy - francesca.colosi@cnr.it

PAROLE CHIAVE: Remote Sensing, Sentinel-2, Change Detection, COVID-19, Area Archeologica

KEY WORDS: Remote Sensing, Sentinel-2, Change Detection, COVID-19, Archaeological Area

RIASSUNTO

Chan Chan, patrimonio UNESCO dal 1986, è la più grande città precolombiana dell'America Latina situata a circa 550 km a nord di Lima, lungo la costa settentrionale del Perù. Durante la pandemia COVID-19, a causa della mancanza di interventi da parte delle autorità di tutela e vigilanza, le comunità locali hanno ampliato le attività agricole e edilizie oltre i limiti consentiti. Tali attività incontrollate e difficilmente valutabili possono rappresentare una minaccia per l'intero sito archeologico. Per stimare come l'area circostante il sito archeologico sia cambiata in seguito alla pandemia, è stata effettuata una classificazione LC/LU e un'analisi *change detection* su dati *remote sensing*. Grazie alle serie temporali fornite dalle immagini satellitari (Sentinel-2), nel periodo 2016-2022, è stata condotta una valutazione dei cambiamenti ambientali e della crescita urbana. Sono stati importati in ambiente GIS le elaborazioni effettuate col software Sentinel Application Platform (SNAP). La valutazione degli effetti della pandemia è avvenuta attraverso l'analisi dei seguenti indici di classificazione: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-Up Index (NDBI), Normalized Archaeological Index (NAI). Estrapolati gli istogrammi delle immagini NDVI, NDBI e NAI, sono state create delle mappe tematiche per uno studio più dettagliato. Una correlazione inversamente proporzionale si è riscontrata tra gli indici NDVI e NDBI: all'aumentare di uno, diminuiva l'altro e viceversa. L'indice NAI è risultato essere un indice di riconoscimento degli elementi del sito archeologico.

ABSTRACT

Chan Chan, a UNESCO World Heritage Site since 1986, is the largest pre-Columbian city in Latin America located about 550 km north of Lima, along the northern coast of Peru. During the COVID-19 pandemic, due to the lack of intervention by the protection and supervisory authorities, local communities expanded agricultural and building activities beyond the permitted limits. Such uncontrolled and difficult-to-assess activities may pose a threat to the entire archaeological site. To estimate how the area surrounding the archaeological site has changed because of the pandemic, an LC/LU classification and change detection analysis was performed on remote sensing data. Using the time series provided by satellite imagery (Sentinel-2), an assessment of environmental changes and urban growth was conducted over the period 2016-2022. The processing carried out with the Sentinel Application Platform (SNAP) software was imported into the GIS environment. The effects of the pandemic were assessed by analyzing the following classification indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-Up Index (NDBI), Normalized Archaeological Index (NAI). After extrapolating the histograms of the NDVI, NDBI and NAI images, thematic maps were created for a more detailed study. An inversely proportional correlation was found between the NDVI and NDBI indices: as one increased, the other decreased and vice versa. The NAI index was found to be a recognition index of the archaeological site elements.

1. INTRODUZIONE

La tutela del patrimonio culturale e la sua conservazione sono fondamentali per mantenere l'identità culturale di una comunità, del suo territorio e la sua permanenza. Diventa così di necessaria importanza poter preservare i siti archeologici e difenderli in quanto essi possono essere rappresentativi, sia dal punto di vista economico che sociale, di un Paese.

La geomatica è una disciplina scientifica che può fornire strumenti efficaci per scopi di conservazione e tutela del

patrimonio culturale tangibile (Tapete, 2018). In questo caso, il *remote sensing* risulta essere la scelta più opportuna poiché permette la raccolta dati da distanza remota senza dover svolgere alcun rilievo diretto sul campo. In particolare, esso risulta fondamentale per l'analisi delle zone ad accesso limitato. In questo lavoro di ricerca il caso studio è l'area archeologica di Chan Chan. Tale sito, riconosciuto patrimonio UNESCO dal 1986, è situato in Perù, nella regione della Libertad, in prossimità dall'agglomerato urbano di Trujillo. Esso si estende su un'area di 20 km² ed è considerato come uno dei migliori esempi di

conservazione architettonica precolombiana. Chan-Chan era la capitale dell'antica civiltà Chimù, stabilitasi in quella regione tra il IX e il XV secolo (d.C.). Nel sito archeologico è possibile trovare resti della civiltà Chimù, che conteneva diverse *ciudadelas* (palazzi) e *huacas* (piramidi a gradoni) (Fig.1). Le *ciudadelas* sono considerate grandi capolavori architettonici che ospitavano piazze, magazzini e piattaforme funerarie per i reali ed erano racchiuse da alte mura. Tali costruzioni venivano erette con mattoni di terra cruda (Colosi et al., 2013).



Figura 1. Vista aerea dell'area archeologica di Chan Chan (Perù)

Durante la pandemia COVID-19, a causa della mancanza di interventi di salvaguardia del sito da parte delle autorità di tutela e vigilanza, le comunità locali hanno ampliato le attività agricole e edilizie oltre i limiti consentiti. Alcune popolazioni nomadi, trattasi di migranti che svolgono attività prettamente agricole, si sono stabilite in alcune zone in prossimità del sito archeologico di Chan-Chan. Tali attività incontrollate e difficilmente valutabili possono rappresentare una seria minaccia per l'intero sito. La cartografia tematica potrebbe essere un valido strumento per mettere in evidenza i cambiamenti occorsi al sito archeologico e guidare la conservazione con un costante monitoraggio. Grazie all'analisi delle immagini satellitari, si possono operare stime su come sia cambiata quest'area nel corso degli anni caratterizzati dalla pandemia COVID-19, attraverso una analisi di *change detection*. Si è posta l'attenzione sulla variazione della distribuzione della vegetazione, del posizionamento delle strutture edificate e sul cambiamento delle caratteristiche archeologiche del sito.

Questo contributo vuole quindi descrivere il lavoro svolto per il monitoraggio del sito archeologico e stimare gli effetti che hanno interessato quest'area a partire dagli anni precedenti e successivi alla pandemia (2016-2022). Il presente articolo è strutturato come segue: la Sezione 2 riporta un breve stato dell'arte; la Sezione 3 descrive la metodologia di lavoro attraverso la descrizione delle procedure adottate per la raccolta dati e le analisi effettuate; la Sezione 4 presenta i risultati significativi ottenuti. Le conclusioni sono riportate nella Sezione 5.

2. STATO DELL'ARTE

Recentemente, vari ricercatori si sono dedicati all'utilizzo di dati provenienti da *remote sensing* al fine di mappare, monitorare e analizzare differenti aspetti del patrimonio archeologico e in quello naturale, oltre che allo sviluppo urbano. Grazie all'uso di indici spettrali è possibile operare un'analisi più approfondita

attraverso la classificazione dei pixel delle immagini ottenute da sensori ottici satellitari. Tra gli indici più comunemente usati per l'analisi territoriale, si annoverano l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) per la classificazione della copertura vegetativa, NDBI (Normalized Difference Built-UP Index) e NAI (Normalized Archaeological Index) per contesti urbani e archeologici.

In (Agapiou et al., 2019), viene approfondita la potenzialità dei *dataset* forniti dall'osservazione della Terra per fini di studi archeologici. In particolare, le immagini da satellite vengono utilizzate per la gestione del patrimonio culturale, proponendo un caso di studio in Grecia. Le bande spettrali vengono combinate tra loro per una analisi più specifica del territorio. Queste operazioni consentono di determinare una serie di indici spettrali, tra cui NDVI e NAI. In (Abate et al., 2020) vengono utilizzate immagini satellitari Sentinel-2 al fine di identificare resti archeologici sepolti nella zona agricola del Tavoliere delle Puglie (Italia) impiegando indici spettrali. In (Zanni et al., 2019), alcuni indici di vegetazione, come NDVI e GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index) e SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), derivati da dati Sentinel-2, sono stati utilizzati per identificare e ricostruire antiche strade tra Italia e Serbia. In (Atefi et al., 2022), la piattaforma Google Earth Engine (GEE) viene utilizzata per effettuare la rilevazione automatica di aree inondate mediante l'utilizzo di tecniche basate su indici spettrali e in particolare indici di vegetazione. GEE permette di accedere ad un vasto catalogo di immagini satellitari, tra cui quelli ottenuti da satelliti Landsat e Sentinel, ed ha una elevata capacità computazionale.

In (Rayne et al., 2020) gli autori propongono un lavoro di ricerca basato sull'analisi di *change detection* su siti archeologici situati nell'Africa del Nord tramite immagini Sentinel-2 elaborate con GEE. La scelta degli autori è caduta su queste aree perché esse erano caratterizzate da una diversità territoriale rappresentata sia dalla crescita della vegetazione che da quella urbana. Anche in (Agapiou 2021) è stata condotta un'analisi di *change detection* basata, in questo caso, su immagini del sensore radar Sentinel-1 acquisite durante il periodo 2015-2020 sull'area del sito archeologico di Cipro. Tali immagini sono state elaborate tramite piattaforma GEE. Sono stati utilizzati differenti metodi di *change detection*, con lo scopo di individuare la crescita urbana avvenuta negli ultimi anni. I risultati ottenuti hanno rilevato che, oltre alla crescita urbana, vi erano anche altri tipi di fenomeni legati al diverso uso del suolo. Questi ultimi sono stati isolati e analizzati nel dettaglio mediante una classificazione *supervised* basata su immagini ottenute dai sensori ottici Sentinel-2.

Una questione da affrontare al giorno d'oggi è la frammentazione della densità urbana. L'espansione urbana avviene in modo sconnesso soprattutto per quanto riguarda le aree verdi, mettendo in grande rischio la vegetazione. La grande richiesta di terreni è dovuta anche alla rapida urbanizzazione, come viene descritto in (Kadhim et al., 2022). I dati Sentinel-2 sono stati utilizzati per mappare i centri urbani frammentati e il loro sviluppo utilizzando l'indice spettrale NDVI per calcolare la copertura vegetale iniziale e lo sviluppo urbano successivo. Gli autori fanno uso di un approccio che combina *remote sensing* e GIS.

Il problema della crescita urbana è stato analizzato anche in (Zhang et al., 2018). Il caso di studio è localizzato nell'altopiano Qinghai-Tibet ed è stato preso in considerazione il periodo 1993-2013. Mediante dati *remote sensing*, gli autori hanno rilevato un incremento del livello di urbanizzazione dal 1993 al 2013.

Altri autori hanno studiato gli effetti del COVID-19 mediante tecniche di *remote sensing*, quantificando l'impatto che il lockdown ha causato sul territorio. Vengono applicati parametri ambientali basati su satellite mediante diversi indici, come ad esempio indici per l'analisi di vegetazione, di acqua, di superficie della terra, di temperatura. Lo scopo di uno di questi lavori

consisteva nel valutare l'impatto della pandemia COVID-19 sull'espansione urbana (Nigam et al., 2022).

3. METODOLOGIA

3.1 Raccolta dei dati

In questo lavoro di ricerca sono state utilizzate immagini, georeferenziate in WGS84 UTM-17S, ad alta risoluzione ottenute dai sensori ottici di Sentinel-2 A e B¹. Una costellazione di satelliti dell'ESA (European Space Agency), che vengono scaricate attraverso la piattaforma Copernicus (Copernicus Open Access Hub)² (Fig. 2).

Per questo progetto sono state prese in considerazione due serie temporali: una riguardante il periodo estivo e una quello invernale (emisfero australe). Il periodo di riferimento copre una linea temporale che va dal 2016, anno successivo al lancio del primo satellite Sentinel-2 A, al 2022. Per la scelta delle immagini satellitari da scaricare si è tenuto conto della minor presenza di nuvole, in modo da non coprire l'area del sito archeologico. Tale informazione oltre ad essere visibile nell'anteprima dell'immagine da scaricare, viene espressa numericamente attraverso un valore in percentuale della copertura nuvolosa (*cloud cover*) (Fig. 3).

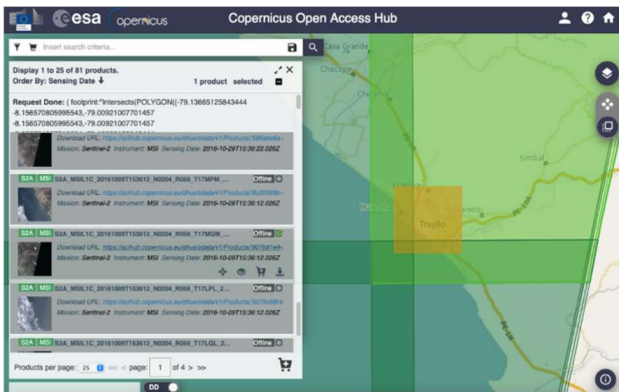


Figura 2. Piattaforma Copernicus per la ricerca delle immagini da Sentinel-2 A e B

No	Image ID	Date Acquired	Cloud Cover	Relative Orbits	Pass Direction	Processing Level	Final choice
1	52A_MSIL1C_20160123T133602	23 January 2016	4	68	DESCENDING	Level-1C	*
2	52A_MSIL1C_20160807T133622	10 August 2016	0,14	68	DESCENDING	Level-1C	*
3	52A_MSIL1C_20161108T133622	8 November 2016	1,97	68	DESCENDING	Level-1C	*
4	52A_MSIL1C_20170122T133614	27 January 2017	48,95	68	DESCENDING	Level-1C	*
5	52A_MSIL1C_20170427T133621	27 April 2017	24,51	68	DESCENDING	Level-1C	*
6	52A_MSIL1C_20170517T133621	17 May 2017	6,18	68	DESCENDING	Level-1C	*
7	52B_MSIL1C_20171128T133609	28 November 2017	55,34	68	DESCENDING	Level-1C	*
8	52A_MSIL1C_20180221T133621	21 February 2018	31,5	68	DESCENDING	Level-1C	*
9	52A_MSIL1C_20180509T133621	9 May 2018	32,17	68	DESCENDING	Level-1C	*
10	52A_MSIL1C_20181029T133621	29 October 2018	10,10	68	DESCENDING	Level-1C	*
11	52A_MSIL1C_20181228T133611	28 December 2018	9,39	68	DESCENDING	Level-1C	*
12	52A_MSIL1C_20190107T133611	7 January 2019	23,22	68	DESCENDING	Level-1C	*
13	52A_MSIL1C_20190209T133621	17 April 2019	27,74	68	DESCENDING	Level-1C	*
14	52B_MSIL1C_20190731T133629	31 July 2019	1,07	68	DESCENDING	Level-1C	*
15	52A_MSIL1C_20191024T133621	24 October 2019	20,59	68	DESCENDING	Level-1C	*
16	52A_MSIL1C_20200221T133611	21 February 2020	4,05	68	DESCENDING	Level-1C	*
17	52A_MSIL1C_20200511T133621	11 May 2020	1,73	68	DESCENDING	Level-1C	*
18	52B_MSIL1C_20200821T133619	24 August 2020	0,01	68	DESCENDING	Level-1C	*
19	52B_MSIL1C_20201221T133619	22 December 2020	50,8	68	DESCENDING	Level-1C	*
20	52A_MSIL1C_20210327T133621	27 March 2021	20,92	68	DESCENDING	Level-1C	*
21	52A_MSIL1C_20210506T133621	6 May 2021	32,54	68	DESCENDING	Level-1C	*
22	52A_MSIL1C_20210814T133621	14 August 2021	11,98	68	DESCENDING	Level-1C	*
23	52A_MSIL1C_20211212T133621	12 December 2021	39,95	68	DESCENDING	Level-1C	*
24	52A_MSIL1C_20220111T133621	11 January 2022	0,64	68	DESCENDING	Level-1C	*
25	52A_MSIL1C_20220327T133621	22 March 2022	17,97	68	DESCENDING	Level-1C	*
26	52A_MSIL1C_20221207T133621	7 December 2022	0	68	DESCENDING	Level-1C	*
27	52B_MSIL1C_20220705T133629	5 July 2022	11,11	68	DESCENDING	Level-1C	*

Figura 3. Selezione delle immagini Sentinel-2 *raw* nella serie temporale 2016-2022

A partire dalle immagini *raw* (originali), sono state ottenute immagini ridimensionate (*subset*) contenenti l'area che preserva il sito di Chan Chan (area di *amortiguamento*) (Fig. 4) e parte dell'area urbana di Trujillo. Per effettuare tale operazione è stato utilizzato il software SNAP (Sentinel Application Platform)³.

Selezionando le coordinate geografiche che definiscono il perimetro, le immagini delle singole bande spettrali sono state tagliate creando un nuovo *subset* di immagini aventi come area di interesse l'area archeologica di Chan Chan.

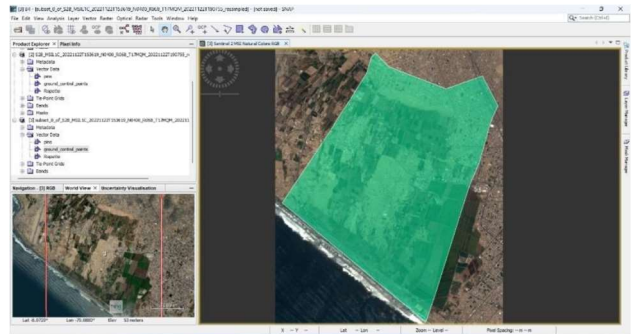


Figura 4. *Subset* delle immagini satellitari con individuazione dell'area di *amortiguamento* di Chan Chan

3.2 Elaborazione dei dati

Ciascuna immagine ottenuta da Sentinel-2 è costituita da 12 bande spettrali, raggruppate in tre valori di risoluzione spaziale: 10, 20 e 60 metri. Per poter eseguire un'analisi di *change detection* in maniera corretta le bande di una stessa immagine vengono convertite, quando necessario, nella stessa risoluzione spaziale. Ad esempio, la banda B1 ha una risoluzione 60x60 m mentre la banda B2 ha una risoluzione 10x10 m (Fig. 5-6). Per effettuare una corretta conversione di risoluzione delle bande in modo da poterle combinare tra loro, nel calcolo degli indici spettrali si è operato seguendo il valore crescente di *pixel spacing*.

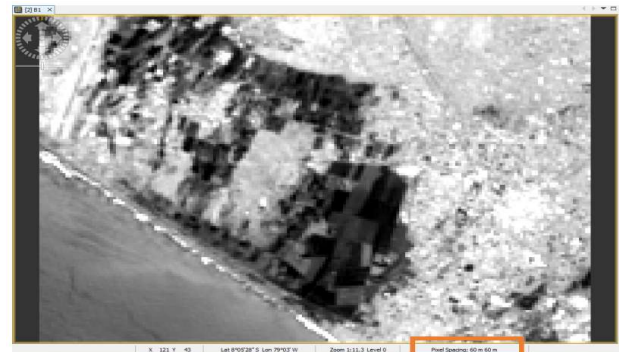


Figura 5. Immagine Sentinel-2 con risoluzione 60x60 m (B1)

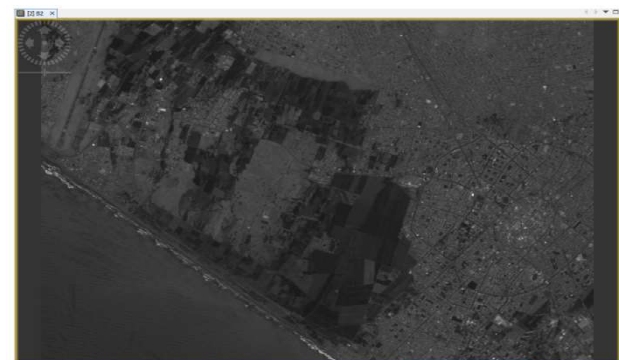


Figura 6. Immagine Sentinel-2 con risoluzione 10x10 m (B2)

¹ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>

² <https://scihub.copernicus.eu/>

³ <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>

3.3 Analisi dei dati

Per effettuare l'analisi di *change detection* sull'area interessata sono stati utilizzati alcuni indici di classificazione, di seguito riportati. Tali indici vengono calcolati attraverso operazioni basate su bande spettrali delle immagini selezionate.

3.3.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).

L'indice NDVI è utilizzato per descrivere il livello di vegetazione presente sul territorio. In particolare, tale indice oltre a rilevare la distribuzione della vegetazione, può anche quantificarla. L'indice deriva dal rapporto tra la differenza delle bande del vicino infrarosso (*near-infrared*, NIR) e del rosso. Le corrispondenti bande dell'immagine Sentinel-2 sono la banda 8 e la banda 4. Entrambe hanno la stessa risoluzione spaziale di 10 m.

$$NDVI = \frac{NIR (Band 08) - Red (Band 04)}{NIR (Band 08) + Red (Band 04)} \quad (1)$$

I valori NDVI sono compresi nel range -1 (assenza di vegetazione) e +1 (presenza di vegetazione) (Rouse et al., 1974).

3.3.2 NDBI (Normalize Difference Built-Up Index).

L'indice NDBI viene utilizzato per mappare e monitorare le zone edificate in ambiente urbano. Esso prende in considerazione la banda dello *shortwave-infrared* (SWIR) e del NIR, che sono rispettivamente la banda 11 e la banda 8. La banda 11 ha risoluzione spaziale 20 m, la banda 8 ha risoluzione spaziale di 10 m. Come detto nella Sezione 3.2, si è operata una conversione trasformando la banda 8 in un'immagine con una risoluzione spaziale di 20 m.

Di seguito si procede al calcolo dell'indice NDBI con la seguente formula:

$$NDBI = \frac{SWIR (Band 11) - NIR (Band 08)}{SWIR (Band 11) + NIR (Band 08)} \quad (2)$$

I valori NDBI sono nel range compreso tra -1 (assenza di edificato) e +1 (presenza di edificato).

3.3.3 NAI (Normalized Archaeological Index).

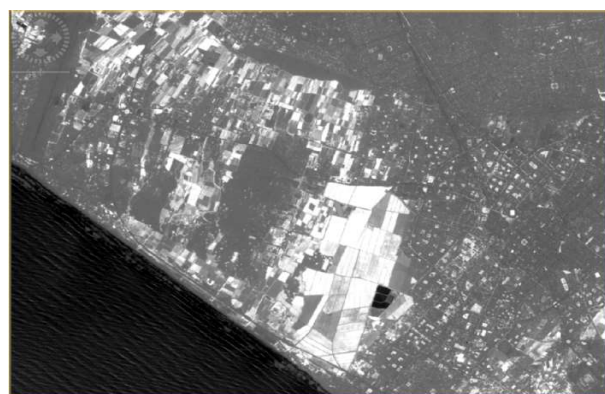
L'indice NAI è una variazione dell'indice NDVI, utilizzato per le applicazioni archeologiche. Esso si calcola analogamente al NDVI ma prende in considerazione una banda differente per il NIR, ovvero la banda 7 che ha risoluzione spaziale 20 m. Anche qui è stato necessario operare una conversione per la banda 4 trasformandola in una banda con risoluzione uguale alla banda 7. La formula per il calcolo dell'indice è la seguente:

$$NAI = \frac{NIR (Band 07) - Red (Band 04)}{NIR (Band 07) + Red (Band 04)} \quad (3)$$

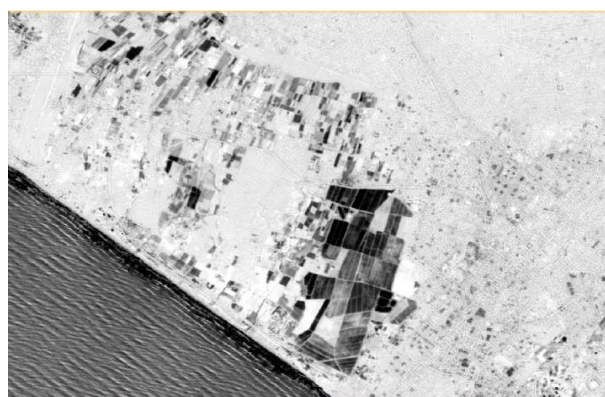
I valori NAI sono nel range compreso tra -1 (assenza di caratteristiche archeologiche) e +1 (presenza di caratteristiche archeologiche).

La valutazione di *change detection* si è basata principalmente sugli indici NDVI e NDBI poiché con essi è possibile indagare le aree con vegetazione e quelle con presenza di costruito. Per quanto riguarda l'area archeologica non vengono riscontrati cambiamenti nel tempo, attribuibili solamente a presenza di scavi o ad esempio alla crescita di vegetazione spontanea. L'indice NAI viene invece considerato come un indice di individuazione degli elementi caratterizzanti l'area archeologica stessa. In Fig. 7 vengono mostrati esempi di elaborazioni della stessa immagine

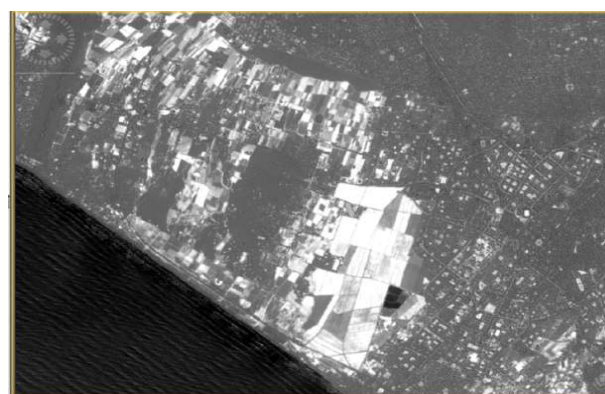
Sentinel-2 del 10/08/2016 per gli indici NDVI (Fig. 7a), NDBI (Fig. 7b) e NAI (Fig. 7c).



a.



b.



c.

Figura 7. Immagine Sentinel-2 del 10/08/2016. a. analisi NDVI; b. analisi NDBI; c. analisi NAI

3.4 Analisi degli istogrammi

Oltre alla rappresentazione sotto forma di immagini, i valori degli indici NDVI, NDBI, NAI vengono analizzati anche attraverso gli istogrammi. Per l'analisi degli istogrammi è stato utilizzato il software open-source QGIS⁴. Gli istogrammi presentano dei valori di picco. Ogni picco viene definito da un intervallo di valori e ai *pixel* che ricadono in quell'intervallo viene associato un colore di riferimento: in questo modo si può avere una rappresentazione più chiara e immediata di raggruppamenti con caratteristiche simili individuati che descrivono così una mappa tematica.

⁴ <https://www.qgis.org/it/site/>

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

La presente sezione riporta alcuni risultati ottenuti con l'applicazione della metodologia proposta al caso di studio selezionato. Vengono mostrati e discussi i risultati riguardanti gli indici di classificazione e l'analisi degli istogrammi.

4.1 Analisi NDVI

In Fig. 8 è rappresentato l'istogramma dell'immagine NDVI del 05/07/2022. L'intervallo dei valori che definiscono il picco visibile a sinistra dell'istogramma comprende quei *pixel* che rappresentano la componente oceano a cui viene associato il colore blu. L'intervallo dei valori del picco a destra dell'istogramma comprende i *pixel* che definiscono la terraferma, associati al colore giallo. Questo approccio, con attribuzione del colore, permette di avere una visualizzazione immediata della rappresentazione delle due classi nelle immagini NDVI lungo la serie temporale (Fig. 9). Analizzando in dettaglio la gradazione di colore relativa alla terraferma, in colore rosso si hanno *pixel* con valori NDVI prossimi a +1, mentre con il colore giallo quei *pixel* con valori NDVI intorno allo 0. È possibile notare come l'indice NDVI cambi tra la stagione estiva e quella invernale (emisfero australe) per lo stesso anno (Figg. 9a e 9b). All'interno dei cerchi verdi, riportati nelle Figg. 9a e 9c, viene mostrato come cambia la distribuzione della vegetazione dal 2017 al 2019 per la stessa stagione.

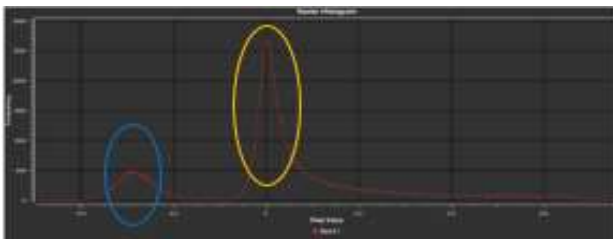


Figura 8. Istantanea NDVI dell'immagine Sentinel-2 del 05/07/2022 con evidenziazione dei due picchi relativi a elementi oceano (blu) e terraferma (giallo)

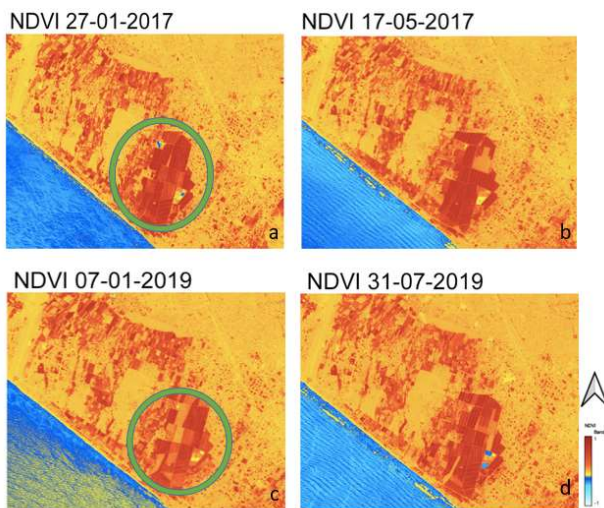


Figura 9. Analisi NDVI immagini Sentinel-2. Attraverso la lettura della legenda a lato, il blu indica l'oceano e con le gradazioni dal giallo al rosso i diversi valori della copertura vegetativa.

Tenendo conto della variazione della copertura vegetativa tra estate e inverno, è stata effettuata un'analisi NDVI per ciascun

anno al fine di approfondire nel dettaglio i vari cambiamenti stagionali. Per fare questa valutazione viene applicata un'analisi statistica attraverso la differenza degli istogrammi NDVI di un'immagine della stagione estiva con una della stagione invernale, appartenenti allo stesso anno. La formula utilizzata è la seguente:

$$A = NDVI(2^{nd} \text{ image}) - NDVI(1^{st} \text{ image}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} A > 0 \rightarrow \text{la vegetazione è aumentata} \\ A < 0 \rightarrow \text{la vegetazione è diminuita} \\ A = 0 \rightarrow \text{la vegetazione non è cambiata} \end{cases} \quad (5)$$

ove: $NDVI(x \text{ image}) =$ istogramma NDVI dell'immagine x

Si fa presente che per la stagione estiva vengono considerati il mese dicembre e i mesi da gennaio a marzo; per la stagione invernale vengono considerati i mesi da giugno a settembre. Trattandosi di un'area che rientra nella fascia climatica del Tropico del Capricorno non ci sono differenze sostanziali sulle temperature ma solo una diversità nella distribuzione delle piogge.

La differenza (4) viene calcolata tra l'indice NDVI calcolato nell'immagine più recente e l'indice NDVI calcolato nell'immagine meno recente per ogni anno. Per la stagione estiva vengono considerati i primi tre mesi dell'anno e per la stagione invernale valgono i mesi da giugno a settembre. Se per la stagione estiva viene considerata un'immagine scattata nel mese di dicembre, i sottraendi della formula si invertono.

Nel caso in cui la differenza tra gli istogrammi NDVI tra inverno ed estate dà come risultato un picco nella parte positiva del grafico ($A > 0$) relativamente alla numerosità dei *pixel* vuol dire che si è verificato un incremento nella presenza di vegetazione. La stessa interpretazione la si ha nel caso in cui per la stagione estiva va considerato il mese di dicembre e nel grafico si ottiene una curvatura nella parte negativa dei valori di *pixel*, a sinistra dello zero. In caso contrario, se il calcolo dà risultati inversi a quelli appena citati, la copertura vegetativa presenta un decremento ($A < 0$). In questa area geografica le stagionalità non presentano differenze sostanziali sulla copertura vegetativa come dimostra l'elevato numero di *pixel* che si trovano sul valore 0 della differenza degli istogrammi NDVI tra inverno ed estate di ciascun anno.

In Fig. 10 viene mostrato un esempio di rappresentazione tematica che evidenzia la differenza NDVI tra inverno ed estate dell'anno 2022 e che mostra l'incremento della copertura vegetativa (verde) e il decremento della stessa (rosso).

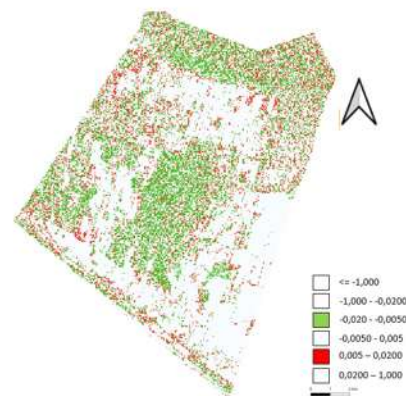


Figura 10. Mappa tematica di *change detection* dell'indice NDVI inverno-estate dell'anno 2022.

Mediante il confronto e l'analisi delle immagini relative all'indice NDVI, si può notare un cambiamento nei terreni intorno all'area archeologica di Chan-Chan. I principali motivi della variazione della copertura vegetativa sono legati ad aspetti legati alla stagionalità, alla frequenza delle precipitazioni e in particolare alla rotazione delle colture. Queste ultime sono quelle su cui porre maggiore attenzione per verificare l'individuazione di eventuali nuove aree destinate alle coltivazioni che si trovano a ridosso del confine dell'area archeologica.

4.2 Analisi NDBI

La Fig. 11 mostra l'andamento di un istogramma tipo di un'immagine Sentinel-2 indicizzata per l'analisi NBDI. Analogamente al caso NDVI, si ottiene una distribuzione di valori che presentano due picchi. Il secondo picco, a destra, cerchiato in giallo, è generalmente costante ogni anno e non viene influenzato dalla stagionalità. Esso rappresenta le aree edificate registrando valori che vanno da 0 a 0.2 e viene associato all'area urbanizzata della città di Trujillo e dell'area archeologica di Chan Chan. Il primo picco, a sinistra, cerchiato in viola, invece subisce delle mutazioni nel tempo cambiando i suoi valori e facendo riferimento alla presenza di aree non coltivate e edificate. Questi valori soglia che definiscono gli estremi dei due picchi sono stati attribuiti a tutte le immagini Sentinel-2 del database a cui è stato applicato l'indice NDBI, per verificare lo scenario di cambiamento dell'area edificata per la serie temporale 2016-2022 (Fig. 12).

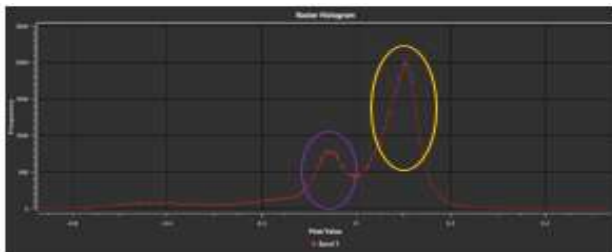


Figura 11. Istogramma NDBI dell'immagine Sentinel-2 del 23-01-2016

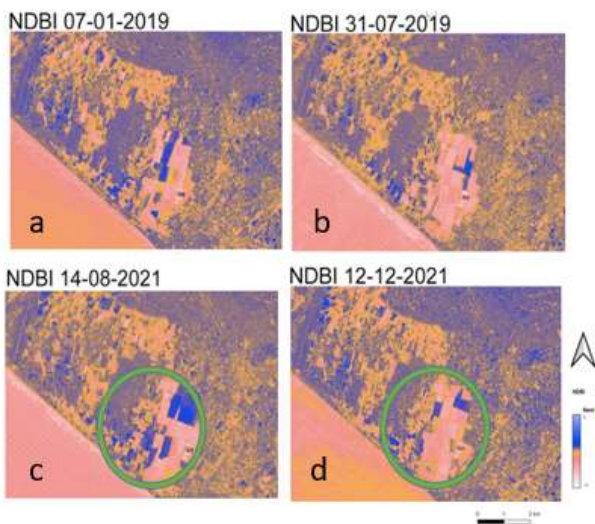


Figura 12. Analisi NDBI immagini Sentinel-2. Attraverso la lettura della legenda a lato, il giallo viene associato all'area edificata che non è mutata nel tempo, con il viola invece vengono evidenziate le variazioni delle aree non coltivate o edificate.

Analizzando nel dettaglio le immagini nelle Figg. 12c e 12d si nota come alcune zone vengono indicate come aree urbanizzate quando invece si tratta soltanto di aree agricole incolte nelle fasi di rotazione delle colture e quindi con *pixel* che presentano valori costanti come quelli che determinano la presenza dell'edificato nell'area urbana o del costruito nell'area archeologica. Analogamente a quanto fatto per l'analisi NDVI, anche per l'indice NDBI è stata applicata la stessa formula (6) per calcolare la differenza degli istogrammi della distribuzione di *pixel* tra un anno e il successivo. In questo caso non ci si è basati sulla variazione stagionale, ma sul cambiamento di anno in anno mantenendo come riferimento lo stesso periodo mensile.

$$B = NDBI(2^{nd} \text{ image}) - NDBI(1^{st} \text{ image}) \quad (6)$$

$$\begin{cases} B > 0 \rightarrow \text{l'area edificata è aumentata} \\ B < 0 \rightarrow \text{l'area edificata è diminuita} \\ B = 0 \rightarrow \text{l'area edificata non è cambiata} \end{cases} \quad (7)$$

ove: $NDBI(x \text{ image}) =$ istogramma NDBI dell'immagine x

In Fig. 13 viene riportata la mappa tematica di *change detection* dell'indice NDBI tra gli anni 2016 e 2022. Per indicare quei *pixel* che ricadono all'interno degli estremi che definiscono le curvature presenti, a seguito del calcolo della differenza, viene usata l'attribuzione del colore: con il blu si indica l'eventuale aumento e con il rosso la diminuzione degli elementi che descrivono la variazione dell'indice NDBI.

Entrando nel dettaglio della distribuzione dei *pixel*, che definiscono le variazioni di NDBI intorno all'area di *amortiguamento*, vengono fatte le seguenti osservazioni: nella parte a nord e nord-est sono visibili le variazioni che hanno interessato l'area urbana di Trujillo prossima all'area archeologica e l'accrescimento dell'urbanizzazione, sebbene di poco, in questi sei anni.

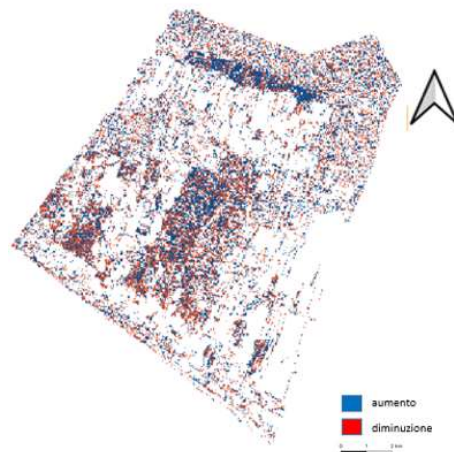


Figura 13. Immagine NDBI che mostra la variazione dal 2016 al 2022 (in blu viene indicato l'aumento dell'indice NDBI e in rosso la relativa diminuzione)

Come si è visto ci sono diversi fattori che possono contribuire alla variazione sia dell'indice NDVI che dell'indice NDBI. Inoltre, si evince che esiste un certo livello di correlazione tra i due indici analizzando nel dettaglio la distribuzione dei *pixel* che determinano l'aumento o la diminuzione del valore di un indice e dell'altro. Ad esempio, in Fig. 14 si può notare che le aree in cui si registra un aumento della vegetazione (a) (*pixel* verdi nell'analisi NDVI) tra gli anni 2016 e 2022, corrispondono ad aree in cui vi è una presenza inferiore del costruito (b) (*pixel* arancioni nell'analisi NDBI).

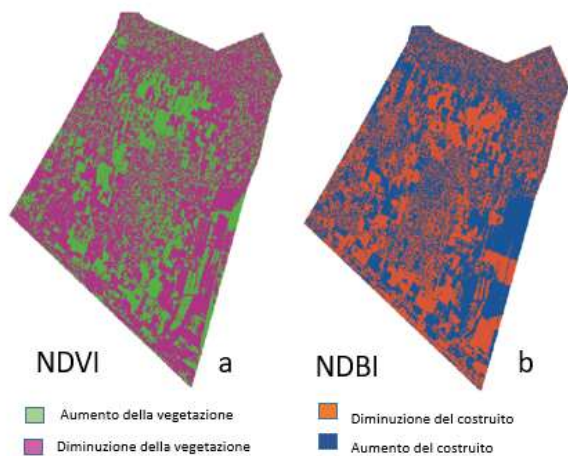


Figura 14. Variazione degli indici NDVI (sinistra) e NDBI (destra) tra gli anni 2016 e 2022

4.3 Analisi NAI

Gli istogrammi delle immagini indicizzate NAI sono caratterizzati da una distribuzione di *pixel* che presentano un andamento pressoché simile agli istogrammi dei precedenti indici (Fig. 15). Anche per l'analisi dell'indice NAI sono stati definiti gli estremi dei due picchi e viene assegnato un colore a ciascun raggruppamento di valori simili. Il primo picco, a sinistra dell'istogramma, fa riferimento ai *pixel* che rappresentano l'oceano mentre l'intervallo che definisce il secondo picco, al centro dell'istogramma, racchiude quei *pixel* che si riferiscono ad aree senza vegetazione.

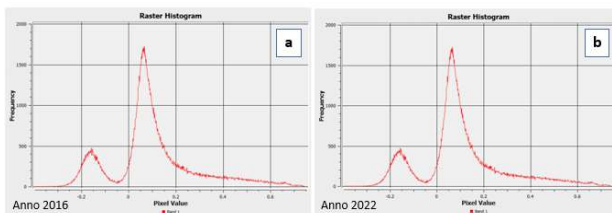


Figura 15. Istogramma NAI. a. anno 2016; b. anno 2022

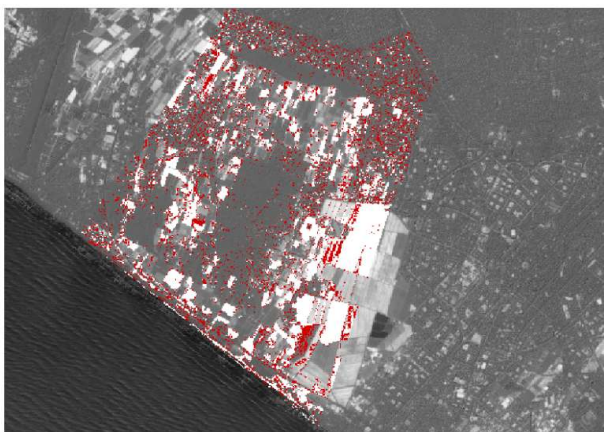


Figura 16. Rappresentazione dei *pixel*, in rosso, della decrescita dell'indice NAI 2016-2022 sovrapposta all'immagine indicizzata NAI del 2016

Passando ad analizzare nel dettaglio l'area di *amortiguamento* si può quindi, come già fatto per i precedenti indici, calcolare la

differenza dell'indice NAI dal 2016 al 2022 per ottenere la variazione di *pixel* che descrivono gli elementi dell'area archeologica. L'istogramma differenza presenta due valori principali: valore 0 per cambiamento nullo, valore compreso tra -0.1 e -0.01 con leggera diminuzione dell'indice legata a causa antropiche e naturali.

Sovrapponendo il risultato del picco diverso da 0, ovvero prendendo l'immagine contenente i soli *pixel* aventi valore compreso tra -0.1 e -0.05, indicati con il colore rosso, con l'immagine indicizzata NAI del 2016, si ottiene la Fig. 16. Si può notare che i *pixel* rossi che ricadono all'interno dell'area archeologica possano rappresentare le varie attività di scavo che sono state effettuate e gli effetti di fenomeni naturali che compromettono l'esistenza delle costruzioni in terra cruda. Inoltre, la maggior parte di questi *pixel* sono situati nelle prossimità dell'area urbanizzata di Trujillo dove qui l'indice si comporta analogamente a quello NDBI considerando la presenza degli elementi costruiti.

5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro si è focalizzato sull'utilizzo di dati e tecniche di *remote sensing* per lo sviluppo di metodologie di *change detection*. La metodologia di *change detection* proposta si è basata su un'accurata selezione dei dataset da utilizzare; i dati *raw* sono stati scaricati dalla piattaforma online Copernicus e hanno riguardato immagini ad alta risoluzione Sentinel-2. Mediante il software SNAP è stato eseguito un *subset* delle immagini *raw* al fine di focalizzare l'analisi su un'area predefinita: il sito UNESCO Chan Chan e parte della città di Trujillo (Perù), per il quale è stata proposta una stima degli effetti della pandemia COVID-19. Tramite il software QGIS sono stati calcolati gli indici di classificazione NDVI, NDBI e NAI, sono stati estrapolati i relativi istogrammi.

Dall'analisi dell'indice NDVI e dalla sua variazione dovuta alla stagionalità è stato possibile osservare un tasso costante di aumento e diminuzione della vegetazione. Per calcolare la differenza tra l'NDVI negli anni analizzati si è considerata la stagione invernale e la precedente stagione estiva. Dunque, è stata possibile riconoscere una tendenza costante di crescita della vegetazione passando dalla stagione estiva a quella invernale, mentre passando dalla stagione invernale a quella estiva si è registrata una diminuzione di vegetazione.

Confrontando i risultati, ottenuti dalla differenza fatta tra anni consecutivi e dal 2016 al 2022 del valore NDBI delle immagini satellitari, è stato possibile osservare che il tasso di aumento e diminuzione risulta vicino al valore zero. Ciò significa che il livello dell'edificato nell'area del caso di studio rimane pressoché costante o al massimo con un leggero aumento o diminuzione, registrando una variazione media dell'indice pari a 0.025.

Si è inoltre evidenziata una correlazione tra gli indici NDBI e NDVI poiché un aumento della vegetazione sembra essere correlato ad una diminuzione delle aree edificate e viceversa.

Per quanto riguarda i risultati avuti con l'indice NAI, i cambiamenti tra un anno e l'altro sono risultati minimi. Stessa cosa è risultata anche dall'analisi di un periodo più lungo (dal 2016 al 2022) dove le variazioni dei valori NAI sono stati prevalentemente pari a zero, se non per una piccola quantità di *pixel* aventi valore negativo (riduzione del NAI). Sovrapponendo quest'ultimo picco all'indice NAI calcolato nel 2016 è stato possibile osservare che solo pochi *pixel* della variazione NAI (2016-2022) sono all'interno o in prossimità dell'area archeologica; tutti gli altri sono all'interno della città di Trujillo e dei campi circostanti. Infine, si presume non ci sia stata un'importante riduzione dell'area archeologica nel periodo dal 2016 al 2022.

Contributi dei singoli autori

Idea e concezione, M.S., F.D.S., E.S.M., R.P. e F.C.; metodologia, M.S., F.D.S. e E.S.M.; software, M.S. e F.D.S.; validazione, M.S., F.D.S. e E.S.M.; analisi, M.S. e F.D.S.; revisione, E.S.M., R.P. e F.C.; supervisione, E.S.M. e F.C.

Tutti gli autori hanno letto e sono in accordo con quanto scritto nella versione dell'articolo pubblicata.

Conflitti di interessi: Tutti gli autori dichiarano di non avere conflitti di interesse da riportare.

BIBLIOGRAFIA

Abate, N., Elfadaly, A., Masini, N., Lasaponara, R., 2020. Multitemporal 2016-2018 Sentinel-2 Data Enhancement for Landscape Archaeology: The Case Study of the Foggia Province, Southern Italy. *Remote Sens.*, 12, 1309.

Agapiou, A., 2021. Multi-Temporal Change Detection Analysis of Vertical Sprawl over Limassol City Centre and Amathus Archaeological Site in Cyprus during 2015–2020 Using the Sentinel-1 Sensor and the Google Earth Engine Platform. *Sensors*, 21, 1884.

Agapiou, A., Alexakis, D.D., Hadjimitsis, D.G., 2019. Potential of Virtual Earth Observation Constellations in Archaeological Research. *Sensors*, 19, 4066.

Atefi, M.R., Miura, H., 2022. Detection of Flash Flood Inundated Areas Using Relative Difference in NDVI from Sentinel-2 Images: A Case Study of the August 2020 Event in Charikar, Afghanistan. *Remote Sensing*, 14, 3647.

Colosi, F., Gabrielli, R., Orazi, R., & Malinverni, E. S. (2013). Discovering Chan Chan: modern technologies for urban and architectural analysis. *Archeologia e calcolatori*, 24, 187-207.

Kadhim, N., Ismael, N.T., Kadhim, N.M., 2022. Urban Landscape Fragmentation as an Indicator of Urban Expansion Using Sentinel-2 Imageries. *Civil Engineering Journal*, 8(9).

Nigam, R., Tripathi, G., Priya, T., Luis, A.J., Vaz, E., Kumar, S., et al., 2022. Did Covid-19 lockdown positively affect the urban environment and UN- Sustainable Development Goals? *PLoS ONE*, 17(9), e0274621.

Rayne, L., Gatto, M.C., Abdulaati, L., Al-Haddad, M., Sterry, M., Sheldrick, N., Mattingly, D., 2020. Detecting Change at Archaeological Sites in North Africa Using Open-Source Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 12, 3694.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., Harlan, J.C., 1974. Monitoring the Vernal Advancements and Retrogradation (Greenwave Effect) of Nature Vegetation; NASA: Washington, DC, USA.

Tapete, D., 2018. Remote Sensing and Geosciences for Archaeology. *Geosciences*, 8, 41.

Zanni, S., De Rosa, A., 2019. Remote Sensing Analyses on Sentinel-2 Images: Looking for Roman Roads in Srem Region (Serbia). *Geosciences*, 9, 25.

Zhang, Y., Zhang, H., Sun, Z., 2018. Effects of Urban Growth on Architectural Heritage: The Case of Buddhist Monasteries in the Qinghai-Tibet Plateau. *Sustainability*, 10, 1593.