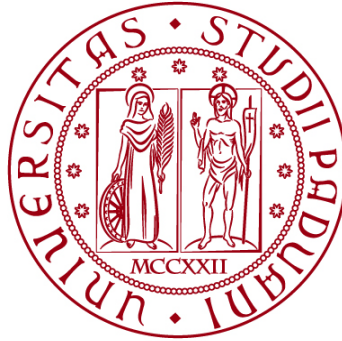


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Scienze Naturali



ELABORATO DI LAUREA

**Analisi diacronica dell'espansione urbana di città
amazzoniche tramite strumenti GIS e remote sensing:
il caso di Pucallpa in Perù**

*Diachronic analysis of the urban expansion of Amazonian cities through GIS tools
and remote sensing: the case of Pucallpa in Peru*

Tutor: Prof. De Marchi Massimo

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA)

Co-tutor: Dott. Codato Daniele

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA)

Laureando: Francesco Busolo

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

INDICE

ABSTRACT	
1. INTRODUZIONE	1
1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E SOCIALE DELL'AREA DI STUDIO ...	1
1.2 PROBLEMATICHE	4
1.3 IL TELERILEVAMENTO PER L'ANALISI DELL'AMAZZONIA PERUVIANA	5
1.4 OBIETTIVI.....	8
2. MATERIALI E METODI	9
2.1 ESPLORAZIONE IMMAGINI SATELLITARI CON GLOVIS e USGS.....	9
2.2 RICERCA E SCARICAMENTO IMMAGINI CON GOOGLE EARTH ENGINE	10
2.3 ANALISI SPAZIALE DELLE IMMAGINI CON QGIS.....	11
2.4 ANALISI STATISTICHE CON MICROSOFT EXCEL	15
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	16
3.1 SCELTA ED ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI PER IL CASO DI STUDIO	16
3.2 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI E MODIFICHE MANUALI.....	17
3.3 RISULTATI QUANTITATIVI DELL'EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO	19
3.4 ANALISI QUANTITATIVA E QUALITATIVA DELL'EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO.....	20
3.5 EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO RISPETTO AI CORPI D'ACQUA	29
4. CONCLUSIONI	32
BIBLIOGRAFIA	34
SITOGRAFIA	36
RINGRAZIAMENTI	37
ALLEGATI	38

ABSTRACT

Lo sviluppo delle tecnologie per il telerilevamento terrestre negli ultimi decenni ha consentito l'espandersi del loro utilizzo in diversi campi di ricerca. Uno di questi è l'analisi dell'impatto umano sull'ambiente. L'installazione di sensori multispettrali nei satelliti ha consentito di esaminare la Terra con occhi diversi, ottenendo informazioni specifiche sulla vegetazione, sulle acque e varie altre componenti. Nello specifico in questo elaborato verrà analizzato l'impatto antropico all'interno del territorio amazzonico attraverso lo studio dell'espansione urbana della città di Pucallpa in Perù.

Il capitolo 1 si aprirà con un inquadramento geografico della zona di analisi, ovvero l'Amazzonia peruviana ed il dipartimento dello Ucayali, seguirà una breve descrizione della città di Pucallpa, attraverso le sue caratteristiche socioeconomiche. Verranno presentate le problematiche che l'espansione urbana ed il flusso migratorio hanno comportato nel territorio, nello specifico la deforestazione, con un breve excursus legato ai *wicked problems* (problemi contorti), tema affrontato in una serie di incontri all'interno del programma *Virtual Exchange To Tackle Wicked Problems* (VAMOS, progetto KA2 Erasmus+), insieme a studenti brasiliani dell'Università Federale di Pará durante il periodo di tirocinio.

Nel capitolo 2 saranno descritti i dati, i programmi utilizzati e la procedura seguita per l'analisi diacronica che comprende un arco temporale tra il 1985 e il 2021. Si partirà dalla scelta delle immagini satellitari Landsat per poi passare all'individuazione del costruito tramite specifici indici attraverso il software QGIS. Infine, si avrà un'elaborazione dei dati ottenuti per quantificare la percentuale di costruito all'interno del perimetro di studio e nell'arco temporale stabilito.

In conclusione, nel capitolo 3 saranno riassunti e discussi i vari risultati delle analisi, mettendoli a confronto per individuare le dinamiche che hanno caratterizzato l'espansione urbana della città di Pucallpa negli ultimi quattro decenni e le eventuali correlazioni con l'evoluzione dei corpi d'acqua della zona, in particolare quella del fiume Ucayali.

1. INTRODUZIONE

1.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E SOCIALE DELL'AREA DI STUDIO

L'Amazzonia peruviana copre un'area di circa 800.000 km², poco più del 60% del territorio totale del Perù (Yáñez & Sevilla, 2010). Nonostante sia un territorio molto vasto, questa parte di Amazzonia contribuisce “solamente” per l'11,27% alla superficie totale del paese.

L'Amazzonia si estende per circa 6.700.000 km² interessando il territorio di 8 paesi dell'America meridionale (Bolivia, Brasile, Colombia, Ecuador, Guyana, Guyana Francese, Perù, Suriname) ed è un sistema estremamente complesso ed interdipendente di foreste pluviali tropicali e fiumi che interagiscono con l'atmosfera (Charity et al., 2016, p. 14). Lo stato di salute di questa preziosa regione naturale è fondamentale per preservare anche quello globale: la foresta pluviale immagazzina da 90 a 140 miliardi di tonnellate di CO₂, e la sua continua distruzione provoca il rilascio nell'atmosfera di enormi quantità di questa sostanza, con conseguenze catastrofiche per l'ambiente (WWF Svizzera, Amazzonia, 2022). L'Amazzonia è anche un hotspot di biodiversità, al cui interno si stima che vivano 40.000 specie di piante, 427 di mammiferi, 1294 di uccelli, 378 di rettili, 427 di anfibi e circa 3.000 di pesci (da Silva et al., 2005) e continuano ad esserne registrate di nuove, basti pensare che dal 1999 al 2015 sono state scoperte 1.155 nuove specie di piante, 468 di pesci, 321 di anfibi, 112 di rettili, 79 di uccelli, 65 di mammiferi e che si siano descritte finora tra il 2-10% di specie di insetti. Per quanto riguarda la popolazione umana, nel 2011, questa era stimata intorno alle 34 milioni di persone, delle quali circa il 70% vive in Brasile e l'11% in Perù (Charity et al., 2016, pp. 22, 26).

Il dipartimento dello Ucayali, situato nell'Amazzonia peruviana, confina con il dipartimento di Loreto a nord, il Brasile a est, di Madre de Dios e Cusco a sud, di Junín a sud-est e di Pasco e Huánuco a ovest (UNICEF, Perù, 2022). Con 102.199,28 km² di estensione (INEI, dati estensione Ucayali, 2022), Ucayali è il secondo dipartimento più grande del Perù, al suo interno sono presenti 8 province e 53 distretti, con una popolazione di circa 614.993 abitanti nel 2022 (Ministerio de Salud del Perù, 2022). Ucayali è anche culturalmente, e linguisticamente molto diversificato. Ci sono 18 popolazioni indigene che vivono nella regione che parlano

circa 14 lingue diverse (UNICEF, Perù, 2022). Il nome deriva dal fiume Ucayali, il braccio principale del Rio delle Amazzoni, che si estende per circa 2670 km e nasce dalla confluenza del Rio Tambo e del Rio Urubamba (Schwenk et al., 2017). Questo fiume è stato di grande importanza per le società che lo hanno popolato per migliaia di anni, per i suoli fertili forniti dalla pianura alluvionale, per la pesca e la connettività che fornisce tra le comunità; il fiume gioca ancora oggi un ruolo fondamentale per queste stesse ragioni, poiché le strade regionali sono minime: il 90% del traffico merci e passeggeri del dipartimento che contiene la porzione meridionale del fiume Ucayali viaggia sulla rete fluviale (Dauer, 2015, p. 13).

Il capoluogo del dipartimento dello Ucayali è la città di Pucallpa. Nel 2017 contava una popolazione di 326.040 abitanti secondo l'istituto nazionale di statistica ed informatica INEI del Perù, un aumento superiore a 12 volte rispetto al 1961 (Arquiñigo et al., 2021). La città è raggiungibile tramite l'aeroporto internazionale *Captain David Abensur Rengifo*, il fiume Ucayali o la *ruta nacional* PE-22 (PE-22), denominata *Carretera Central*, che la mette in comunicazione con la capitale Lima. Per quanto riguarda la produzione primaria, "I terreni di Pucallpa sono poveri per l'agricoltura ma si coltivano riso, banane, caffè e cacao. Nel suo territorio crescono numerosi alberi da legno utili per l'industria del legno del paese, come mogano, cedro, gomma, ishpingo e vite. Pucallpa è considerato in Perù il più importante centro di legname con industrie di segagione e laminazione del legno", richiamando a sé numerosa manodopera che migra dalla periferia verso la città (Pucallpa.com, Ciudad della Tierra Colorada, 2022).

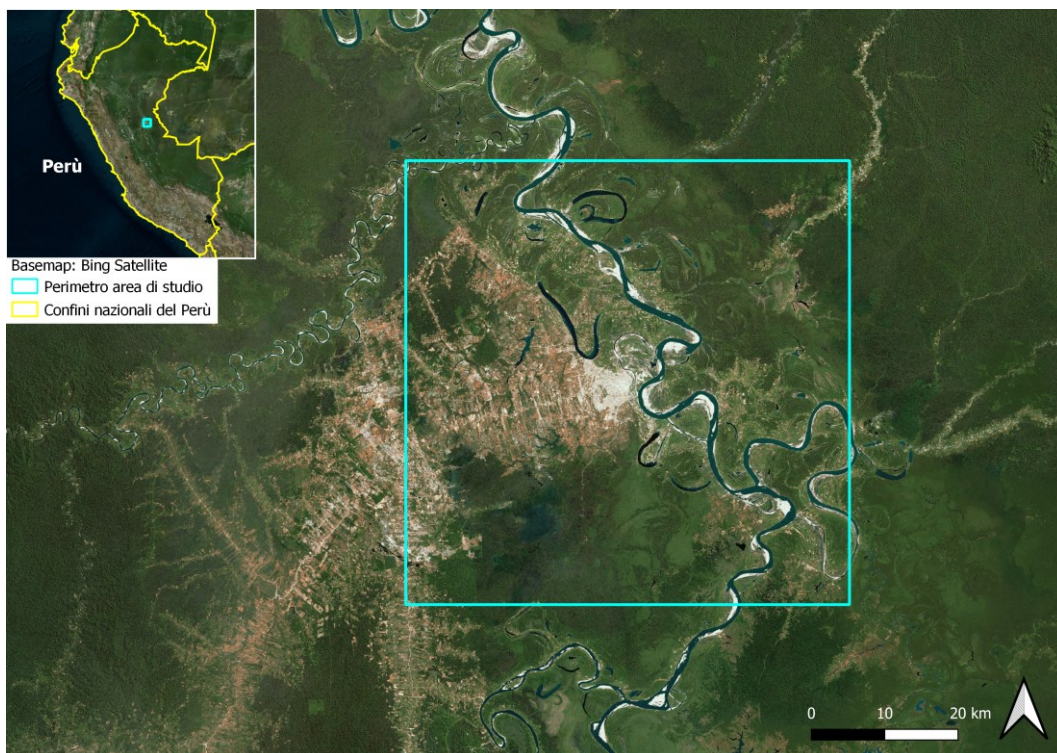


Figura 1: Delimitazione dell'area di studio. Si può notare la città di Pucallpa, il fiume Ucayali ed i territori della Foresta Amazzonica confinanti. È fornito anche un inquadramento della zona di analisi rispetto all'intero territorio del Perù. Si osservi lo sviluppo antropico lungo le strade. Elaborazione propria.

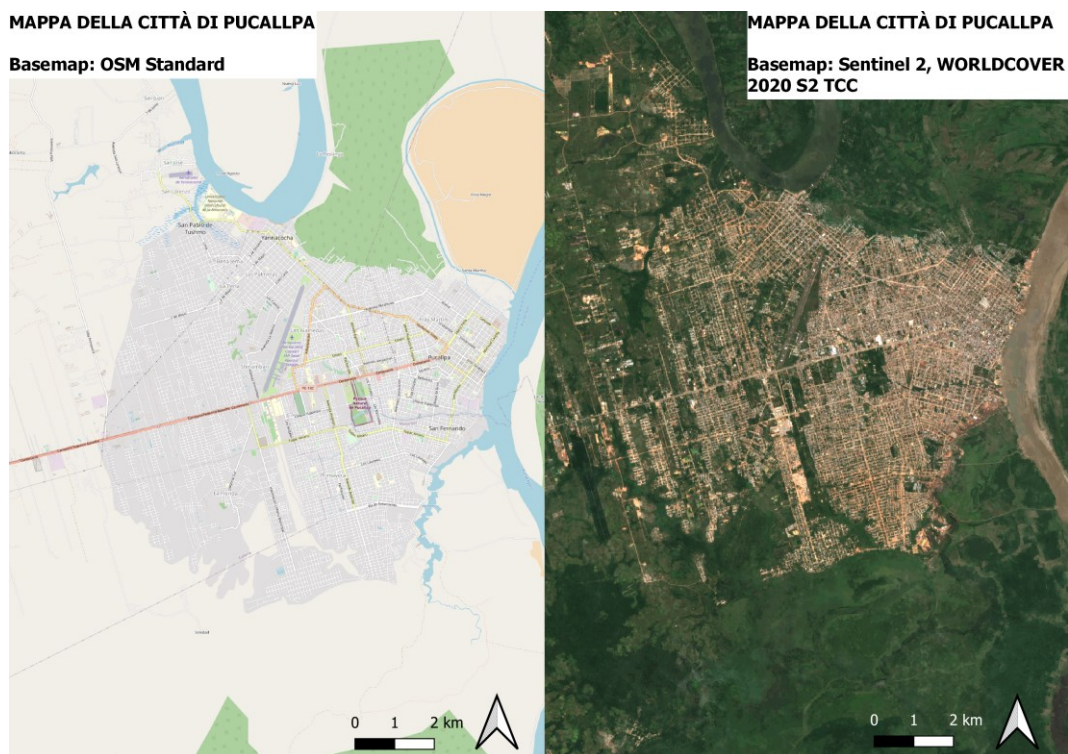


Figura 2: Mappa della città di Pucallpa. Oltre al centro urbano si può notare la strada nazionale PE-18 C, informalmente nota come autostrada Federico Basadre, ad ovest, ed il fiume Ucayali ad est. Elaborazione propria.

1.2 PROBLEMATICHE

Come accennato nel paragrafo precedente, uno dei principali motivi di migrazione all'interno della regione dello Ucayali è dato dalla possibilità di lavorare all'interno dell'industria del legno, e Pucallpa è uno dei principali centri di quest'attività. Secondo i dati forniti dall' Organizzazione delle Nazioni Unite per l'alimentazione e l'agricoltura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*, FAO), la domanda globale di derivati del legno sta raddoppiando ogni sette anni. A livello distrettuale, nella regione in esame ci sono 669 aziende per la lavorazione del legno, tra cui: il 59% quelle dedicate al taglio e alla spazzolatura, il 24,5% alla lavorazione delle foglie, 14% ad altri prodotti, e il 2,5% per la produzione di strumenti di carpenteria. Inoltre, se nel 2010 le imprese impegnate nella lavorazione primaria del legno erano 131, nel 2018 se ne contavano 393 (Arquiñigo et al., 2021), si può intuire, quindi, quanto questo settore industriale sia in costante crescita.

Oltre alla lavorazione del legno, altri fattori hanno contribuito a creare un flusso migratorio tanto intenso quanto quello presente nel distretto peruviano, ovvero la possibilità di lavorare nelle coltivazioni di palma da olio, di peperoni e di coca, i progetti di disboscamento per la costruzione di strade e edifici, ma anche per sfuggire dalla minaccia del terrorismo, specialmente tra gli anni 80' e 90' (Ichikawa et al., 2014).

Il disboscamento e la coltivazione mobile su piccola scala che si basa su pratiche di taglio e bruciatura sono le cause principali della deforestazione nell'Amazzonia peruviana che tende a verificarsi principalmente lungo strade e fiumi. Negli anni '70 fu asfaltata la strada Frederico Basadre (843 km) che collegava, insieme alla *Carretera Central*, Pucallpa a Lima, provocando un grande afflusso di coloni e cercatori che hanno trasformato il paesaggio a un ritmo allarmante. Pucallpa detiene il titolo del più grande centro per le operazioni di disboscamento e fresatura dell'Amazzonia peruviana. Sono rimaste poche foreste indisturbate e il paesaggio è caratterizzato da un mosaico di boschi secondari, pascoli, terreni incolti e colture agricole (Srinivas & Koh, 2016). La coltivazione su larga scala di colture commerciali, però non è stata ancora osservata nell'Amazzonia peruviana, a differenza dell'Amazzonia brasiliana. Tuttavia, negli ultimi anni, sono stati visti alcuni cambiamenti, tra cui, ad esempio, l'espansione delle piantagioni di palma da

olio e l'acquisto di manioca da parte di intermediari di Lima. Osservando tutte queste possibilità economiche, si può capire quindi, il motivo per cui Pucallpa sia il luogo dove è presente il maggior numero di migranti della regione, oltre ad essere un luogo importante per la migrazione a tappe da, e verso, altri dipartimenti (Ichikawa et al., 2014).

Questi processi appena descritti hanno come variabile comune, la deforestazione. Si capisce che questo fenomeno non è dato da una singola causa, ma è il risultato di innumerevoli fattori, a sua volta collegati a molteplici altri, andando a formare un complesso groviglio di cause e conseguenze. È proprio questa complessità che pone la deforestazione all'interno dei '*wicked problems*', un termine che non trova una stretta traduzione ma che viene utilizzato per indicare tutte quelle problematiche la cui soluzione non può essere ottenuta attraverso approcci tradizionali, lineari ed analitici. Non c'è una soluzione unica, perché quando si pensa di aver trovato una possibile soluzione, questa genera altre problematiche da risolvere. Inoltre, la loro complessità è data dall'associazione con problematiche di carattere etico, sociale, politico e la loro continua evoluzione nel tempo in risposta alle pratiche attuate per risolverli (Ritchey, 2013).

Quindi, in conclusione, è possibile affermare che la deforestazione è sì causa di diverse problematiche, tra cui la diminuzione della biodiversità della Foresta Amazzonica e della fissazione di CO₂ atmosferica da parte delle piante (Culas, 2009), ma allo stesso tempo è legata al modello sociale ed economico di estrazione delle risorse e di generazione d'impiego nella lavorazione del legno, nello sviluppo di strade e nella costruzione di edifici. La sfida per i governi e le organizzazioni, quindi, non è trovare una soluzione unica e definitiva, ma trovare quella "migliore", che possa beneficiare, o, a seconda dei punti di vista, svantaggiare il meno possibile, tutte le parti coinvolte.

1.3 IL TELERILEVAMENTO PER L'ANALISI DELL'AMAZZONIA PERUVIANA

Si è potuto capire come la Foresta Amazzonica peruviana abbia una grande rilevanza ed influenza per diversi aspetti, ed il suo continuo monitoraggio, di conseguenza, sia di notevole importanza. Le analisi di queste zone via terra però,

sono difficoltose e poco accessibili, rendendo necessario quindi, l'intervento di metodi e strumenti più efficaci, come il telerilevamento (o *remote sensing*, RS).

Per telerilevamento si intende: l'acquisizione e la misurazione d'informazioni di determinate proprietà di fenomeni, oggetti o materiali attraverso strumenti di registrazione non direttamente in contatto con le caratteristiche in analisi. In un contesto riguardante l'ambiente, l'RS si riferisce tipicamente a tecnologie per registrare l'energia elettromagnetica che viene emanata da aree o oggetti presenti sulla superficie terrestre, dagli oceani ma anche dall'atmosfera. Essenzialmente, i livelli di energia elettromagnetica emessi da diversi oggetti o aree sono diversi tra loro e permettono così una loro identificazione e distinzione, in sostanza ogni oggetto presenta una sua 'impronta elettromagnetica', discretizzata in bande spettrali. Per le rilevazioni vengono utilizzati principalmente sensori installati su aerei oppure satelliti orbitali (Khorram et al., 2012, p. 2).

In questo caso di analisi sono state sfruttate le immagini catturate dai satelliti del programma Landsat, in particolare i satelliti Landsat 5 (periodo di attività: 1 marzo 1984 - 5 giugno 2013), 7 (periodo di attività: 15 aprile 1999 - ancora attivo), 8 (periodo di attività: 11 febbraio 2013 - ancora attivo). "Landsat rappresenta la più lunga raccolta al mondo di dati di telerilevamento terrestre acquisita ininterrottamente a risoluzione moderata basata sullo spazio. Quasi quattro decenni di immagini forniscono una risorsa unica per coloro che lavorano nei settori dell'agricoltura, della geologia, della silvicoltura, della pianificazione regionale, dell'istruzione, della mappatura e della ricerca sul cambiamento globale. Le immagini Landsat sono preziose anche per la risposta alle emergenze e i soccorsi in caso di calamità" (USGS, *What is the Landsat satellite program and why is it important?*, 2022).

La capacità di discriminare i diversi oggetti sulla superficie terrestre da parte dei sensori di questi satelliti è anche dovuta dalla loro capacità di analisi multibanda, ovvero la possibilità di registrare diverse bande dello spettro elettromagnetico che gli oggetti emettono. In questo studio le bande principalmente utilizzate sono state quelle della porzione del visibile (nello specifico blu, verde e rosso o RGB), dell'infrarosso vicino (o *Near InfraRed*, NIR) e dell'infrarosso termico (*Short-Wave InfraRed*, SWIR).

Durante i passaggi di analisi, che verranno descritti successivamente in questo elaborato, sono state fatte operazioni tra bande diverse per risaltare elementi diversi, allo scopo di isolare le aree di costruito dal resto. Ci sono diversi indici spettrali che si possono ottenere operando tra le bande, ma di seguito si limiterà la descrizione solo a quelli utilizzati nelle analisi.

I suddetti indici sono stati: l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Indice di Vegetazione Differenziale Normalizzato), l'NDWI (*Normalized difference water index*, Indice d'Acqua Differenziale Normalizzato), NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*, Indice di Costruito Differenziale Normalizzato) e l'MBI (*Modified Built-up Index*, Indice di Costruito Modificato). L'NDVI, come suggerisce il nome, si utilizza per investigare lo stato della vegetazione, e viene impiegato anche per discriminare pixel che presentano biomassa vegetale. Per calcolare questo indice si utilizzano la banda del rosso e del vicino infrarosso (le formule utilizzate con i vari indici saranno mostrate nel capitolo 'Materiali e metodi'), questo perché le piante tendono ad assorbire le lunghezze d'onda corrispondenti al rosso, mentre riflettono quelle vicino all'infrarosso. Quindi una superficie ricca di vegetazione rifletterà le due bande in maniera diversa (predominerà quella del vicino infrarosso su quella del rosso) rispetto ad una prava, che fornirà invece valori simili. L'NDWI è stato utilizzato per separare i corpi d'acqua dal resto del territorio in esame, utilizzando la riflettanza dello spettro del verde e dell'infrarosso termico, quest'ultimo soggetto a forte assorbimento e bassa radiazione. L'NDBI e l'MBI sono stati sfruttati per la rilevazione delle aree di costruito, in particolare, l'NDBI è calcolato attraverso le bande dell'infrarosso termico e dell'infrarosso vicino, questo perché il costruito riflette maggiormente lo SWIR (infrarosso termico) rispetto al NIR (infrarosso vicino), che quindi, vengono rilevati diversamente dal sensore. Questo indice però presenta una problematica, non permette una distinzione precisa tra suolo costruito e suolo nudo perché entrambi presentano una significativa quantità in comune di elementi che li compongono. È per questo motivo che, per gli anni in cui è stato possibile, è stato utilizzato l'MBI, che permette di isolare il suolo nudo, separandolo da quello costruito, e che sfrutta come bande due tipologie di SWIR (SWIR1 e SWIR2) ed il NIR (Bevington et al., 2018; Valdiviezo-N et al., 2018).

1.4 OBIETTIVI

In questo studio verrà analizzata l'espansione urbana della città di Pucallpa e delle zone periferiche nel corso degli ultimi 40 anni (1985-2021). Saranno impiegate immagini satellitari provenienti dai satelliti Landsat 5, 7 ed 8, per gli anni 1985, 1990, 2000, 2013 e 2021. Tali immagini saranno elaborate all'interno del programma QGIS al fine di estrarre le superfici di costruito (o *built-up*) ed ottenere sia risultati quantitativi per le variazioni percentuali di suolo urbanizzato attraverso gli anni, ma anche qualitativi, attraverso la produzione di mappe. In questo studio per definire il termine '*built-up*' ci si è basati sulla seguente definizione: "costruzioni chiuse al di sopra del terreno, utilizzate per il rifugio di umani, animali, oggetti, oppure per la produzione di beni economici" (Pesaresi et al., 2013). Sono escluse quindi strade o altre superfici antropizzate che non offrono riparo.

Oltre alla variazione del costruito, verrà posta sotto esame anche la relazione tra l'espansione della città con i corpi d'acqua presenti sul territorio, in particolare il fiume Ucayali, che sono stati caratterizzati da importanti cambiamenti nel corso di questi ultimi quattro decenni.

2. MATERIALI E METODI

In questo capitolo saranno descritti i mezzi ed i procedimenti che hanno permesso di ottenere i risultati di questo studio attraverso l'analisi di immagini satellitari raffiguranti la città peruviana di Pucallpa e le zone limitrofe. Tale lavoro si pone come obiettivo l'individuazione delle variazioni di estensione di suolo costruito nell'arco temporale compreso tra il 1985 e il 2021. Si è deciso di partire dall'anno più recente di cui si avessero i dati (2021), per poi andare a ritroso con un intervallo di circa 10 anni, tranne per l'anno 2010, data una problematica riscontrata con i sensori del Landsat 7, sostituito quindi con il Landsat 8 per il 2013. Infine, si è concluso con le prime immagini Landsat disponibili della zona di studio (1984-85).

Verranno presi in esame le principali operazioni e i software utilizzati nell'ordine cronologico di applicazione, indicando le procedure attuate ed i risultati ottenuti.

2.1 ESPLORAZIONE IMMAGINI SATELLITARI CON GLOVIS e USGS

Lo studio è iniziato consultando il sito di *Global Visualization Viewer* (GloVis), uno strumento di ricerca e di gestione online di dati satellitari ed aerei (USGS, GloVis, 2022) liberi e gratuiti di proprietà della *United States Geological Survey* (USGS), l'unica agenzia scientifica del dipartimento dell'Interno degli Stati Uniti d'America, risalente al 1879. Infatti, come riportato dal sito web istituzionale "L'USGS monitora, analizza e prevede le interazioni attuali e l'evoluzione del sistema Terra e fornisce informazioni utilizzabili su scale e tempi rilevanti per i responsabili delle decisioni. L'USGS fornisce alla comunità scientifica dati sui rischi naturali, le risorse naturali, gli ecosistemi e la salute ambientale e gli effetti del cambiamento climatico e dell'uso del suolo" (USGS, *Who we are*, 2022).

La modalità *Viewer* di GloVis consente di visualizzare immagini satellitari fornite da vari dataset ed applicare filtri in base alle proprie necessità. Nel seguente caso l'obiettivo si poneva di individuare le immagini migliori rispetto all'assenza di copertura nuvolosa e di conseguenza le date o i periodi ai quali queste appartenessero. Tale lavoro ha permesso di facilitare la successiva ricerca in *Google Earth Engine*, una piattaforma *GIS cloud* che verrà descritta nel paragrafo successivo.

Nello specifico si è trattato di selezionare i dataset *Landsat 4-5 Thematic Mapper Collection 1 Level-1*, *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus Collection 1*

Level-1 e Landsat 8 OLI/TIRS CI Level-1. Le immagini sono state selezionate utilizzando due filtri all'interno della categoria *Common Metadata Filters: il Cloude Cover*, per la copertura nuvolosa in un intervallo compreso tra 0% – 10%, e l'*Aquisition Date*, per definire un range temporale di acquisizione dei dati, nel caso di studio sono stati selezionati gli anni 2021, 2013, 2000, 1990 e 1985.

Dai risultati ottenuti si è avuta la conferma delle informazioni già precedentemente ricavate dall'articolo "*Spatial planning of the timber industry and the social-environmental and economic impact in Pucallpa-Ucayali (Peru), 2000-2019*" per cui, nella regione amazzonica dello Ucayali, il periodo in cui è possibile trovare una minor copertura nuvolosa dovuta alle scarse precipitazioni è compreso tra il mese di aprile e quello di settembre (Arquiñigo et al., 2021). Tale risultato ha permesso di mirare ulteriormente la scelta delle immagini su *Google Earth Engine*. Nell'allegato 1 è fornita una tabella supplementare con l'elenco di tutte le immagini dei satelliti Landsat 5, 7, 8, ricercate su GloVis, aventi un livello di copertura nuvolosa all'interno dell'intervallo prescelto con le corrispettive caratteristiche (codici identificativi, data di acquisizione e tipo di satellite).

2.2 RICERCA E SCARICAMENTO IMMAGINI CON GOOGLE EARTH ENGINE

La scelta finale delle immagini satellitari Landsat da utilizzare nello studio è stata effettuata sulla piattaforma online *open source* di *Google Earth Engine* (GEE). "*Google Earth Engine* è una piattaforma informatica che consente agli utenti di eseguire analisi geospaziali all'interno dell'infrastruttura di Google" (Google Earth Engine, Platform, 2022). La funzione utilizzata per quest'operazione è stata il *Code Editor* di GEE, un "*web-based*" (IDE) ("*Integrated Development Environment*", ambiente di sviluppo integrato) per l'API ("*Application Programming Interface*", interfaccia di programmazione per applicazione) *JavaScript* di GEE.

È stato fornito il codice della variabile necessaria per delimitare spazialmente le successive computazioni: un poligono quadrato di 60 km di lato che comprende la zona di analisi della città di Pucallpa, per un totale di 3600 km². A seconda dell'anno di studio sono state utilizzate collezioni di immagini di diversi satelliti Landsat:

- 1985 e 1990: Landsat 5, *USGS Landsat 5 Level 2, Collection 2, Tier 1*

- Collection Snippet:* ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_L2");
- 2000: Landsat 7, *USGS Landsat 7 Level 2, Collection 2, Tier 1;*
Collection Snippet: ee.ImageCollection("LANDSAT/LE07/C02/T1_L2");
- 2013 e 2021: Landsat 8, *USGS Landsat 8 Level 2, Collection 2, Tier 1;*
Collection Snippet: ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C02/T1_L2");

La scelta di passare a GEE per la ricerca e scaricamento delle immagini di interesse è dipesa dal fatto che il sistema permette un migliore sistema di filtraggio per la selezione delle immagini più idonee e le immagini satellitari possono essere scaricate già con delle pre-elaborazioni, in particolare la correzione atmosferica che limita l'effetto "aerosol" dato dall'atmosfera, facilitando in questo modo le successive analisi in GIS. Il procedimento che verrà descritto di seguito è stato ripetuto per i vari anni e per le varie collezioni di immagini. Dopo aver definito il perimetro e i dataset di immagini, è stata introdotta la funzione *filterDate()*, per selezionare l'anno o il periodo di interesse. L'insieme di immagini definite così nell'intervallo di tempo prescelto sono state poi poste in ordine ascendente in base ai valori di copertura nuvolosa tramite la funzione *sort()* contenente il comando '*CLOUD_COVER_LAND*'. Ciò ha consentito di ottenere le date precise delle immagini con il miglior rapporto tra copertura nuvolosa e presenza di dati disponibili.

Infine, attraverso la funzione *Export.image.toDrive()*, sono state esportate le cinque immagini multibanda, una per ogni anno d'interesse, come file .tiff in *Google Drive*, così da poterle trasferire ed elaborare attraverso il software di QGIS. Nell'allegato 2 è disponibile una tabella supplementare con le date di tutte le immagini dei Landsat 5,7,8 con una copertura nuvolosa uguale o inferiore al 10% ottenute tramite GEE.

2.3 ANALISI SPAZIALE DELLE IMMAGINI CON QGIS

La maggior parte delle operazioni e dei calcoli eseguiti sulle immagini sono state effettuate su QGIS (versione 3.22.6). QGIS è un progetto ufficiale della *Open Source Geospatial Foundation (OSGeo)* (*Open Source Geospatial Foundation, 2022*) ed è un'applicazione GIS professionale che è costruita su un Software Libero ed *Open Source (FOSS)* (QGIS, 2022).

Per ottenere la superficie di costruito per ogni anno oggetto di analisi si è seguita la procedura descritta di seguito.

Dopo aver importato le immagini multibanda scaricate da GEE in QGIS è risultato necessario calcolare, per ciascuna immagine, degli indici attraverso la funzione “*Raster calculator*”. Gli indici analizzati sono stati:

- *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI)

Formula di calcolo:

$$\frac{((red\ band)-(near\ infrared\ band))}{((red\ band)+(near\ infrared\ band))}$$

- *Normalized Difference Water Index* (NDWI)

Formula di calcolo:

$$\frac{((green\ band)-(short\ wave\ infrared\ 1\ band))}{((green\ band)+(short\ wave\ infrared\ 1\ band))}$$

- *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI)

Formula di calcolo:

$$\frac{((short\ wave\ infrared\ 1\ band)-(near\ infrared\ band))}{((short\ wave\ infrared\ 1\ band)+(near\ infrared\ band))}$$

- *Modified Built-up Index* (MBI) (solo per Landsat 8)

Formula di calcolo:

$$\frac{((short\ wave\ infrared\ 1\ band)-(short\ wave\ infrared\ 2\ band)-(near\ infrared\ band))}{((short\ wave\ infrared\ 1\ band)+(short\ wave\ infrared\ 2\ band)+(near\ infrared\ band))} + 0.5$$

I *raster* ottenuti da tali analisi con gli indici NDVI, NDWI e MBI sono stati filtrati tramite un valore soglia consultando i rispettivi istogrammi, basati sui valori dei pixel che li costituivano. Tale passaggio è stato necessario per creare delle maschere, ovvero nuovi *layers* che permettevano una distinzione più precisa delle aree vegetate (NDVI), le aree coperte da acqua (NDWI) e quelle coperte da suolo nudo (MBI), attribuendo alle suddette il valore 0 mentre al resto 1.

I nuovi *raster* filtrati sono stati moltiplicati tra loro (NDVI, NDWI e MBI per Landsat 8, solo NDVI e NDWI per Landsat 5 e 7); il risultato poi, è stato a sua volta moltiplicato per l’NDBI. Si è ottenuto così un *raster* i cui pixel con valore 0 rappresentavano le aree riconosciute semi-automaticamente come ‘non costruito’ mentre quelli con valore 1 come ‘possibile costruito’.

Successivamente a questa procedura semi-automatica che ha visto l’utilizzo di indici per estrarre il costruito, si è proceduto con delle operazioni di pulizia manuale

del risultato ottenuto per eliminare eventuali aree erroneamente estratte come costruito, o il contrario. Sono state applicate due metodologie diverse per l'immagine riguardante l'anno 2021 e le immagini degli altri anni. Per la foto-interpretazione dell'immagine del 2021, ovvero la procedura che permette di riconoscere oggetti e aree omogenee in base a diverse caratteristiche come forma, colore e dimensione, è stato sfruttato il *plugin* Serval che permette una modifica attiva da parte dell'utente dei valori dei singoli pixel che compongono il *raster*. In particolare, si è deciso di classificare secondo i seguenti valori:

- 0 = non *built-up*
- 1 = *built-up*
- 2 = modifica da non *built-up* a *built-up*
- 3 = strade o superfici non *built-up*
- 4 = modifica da *built-up* a non *built-up*

Questa classificazione permette di tenere traccia dei cambiamenti manuali effettuati sul *raster* e comprende anche quelle superfici come strade o ampie aree artificiali che non rientrano propriamente nel termine di *built-up*.

Dopo aver effettuato tutte le modifiche necessarie, il *layer* del 2021 è stato vettorializzato tramite la funzione 'poligonizzare (da raster a vettore)' per poter proseguire con le analisi ed i confronti. Per le immagini degli anni precedenti si è tentata una procedura differente per valutare se potesse velocizzare il processo e quindi il risultato finale. Infatti, la trasformazione da *raster* a vettore è stata applicata direttamente alle maschere ottenute dalle operazioni tra i *raster* sogliai dei vari indici. Questo ha permesso di sviluppare delle intersezioni tra *raster* di coppie di anni. Per intersezioni si intendono nuovi *raster* ottenuti dalla sovrapposizione di altri due precedenti, in cui sono mantenuti tutti gli elementi in comune.

Prendendo come esempio la coppia relativa agli anni 2021 e 2013, verrà descritta di seguito la procedura di intersezione che è poi stata applicata anche per le analisi successive tra i seguenti anni: 2013-2000, 2000-1990, 1990-1985. Inizialmente sono stati selezionati, dalle tabelle degli attributi dei *raster* vettorializzati, gli elementi discreti con valore 1, 2 e 3 per il 2021, ovvero tutte le aree categorizzate come costruito o artificiale, e quelli con valore 1 per il 2013, ovvero il risultato di estrazione semi-automatica. Calcolando l'intersezione tra i due vettori si è ottenuto

un *layer* in cui erano presenti tutti quegli elementi artificiali esistenti sia nel 2021 che nel 2013. Il procedimento appena descritto ha permesso di velocizzare l'analisi e la modifica del vettore attraverso aggiunte o eliminazioni di aree, attribuendo i valori sopra descritti, con l'utilizzo degli strumenti di digitalizzazione forniti da QGIS per l'aggiunta, eliminazione e cambio di categoria in *layer* vettoriali.

Come base per la foto-interpretazione si è usata l'immagine Landsat dell'anno di interesse con veri e falsi colori, ovvero usando delle differenti scale di colore ottenute attribuendo bande diverse a quelle del rosso, verde e blu, permettendo così di risaltare la vegetazione rispetto al resto. Inoltre, sono state usate altre immagini satellitari a più alta risoluzione (quando disponibili per gli anni di interesse) come quelle fornite in *Google Earth pro*, per validare il risultato ottenuto e in caso di aree che lasciassero dei dubbi di interpretazione.

Una volta ottenuti i *layer* vettoriali definitivi, si è proceduto con le analisi GIS e i confronti tra questi, per determinare l'area delle differenti categorie di costruito o artificiale (valori 1, 2 e 3) per ogni anno e la loro variazione temporale e spaziale nell'area di studio. Per il calcolo dell'area totale si è utilizzato il calcolatore dei campi di QGIS, strumento che permette di compiere varie operazioni e calcoli su *layer* vettoriali. Per poter invece apprezzare al meglio, sia visualmente che come risultati quantitativi, la presenza delle diverse categorie di costruito per ogni anno analizzato e la loro variazione spaziale e temporale nell'area di studio, si è proceduto con la creazione di una griglia regolare di 500 m di lato utilizzando il geoprocesso "crea reticolo", dove calcolare all'interno di ogni cella la presenza percentuale di costruito per ogni anno e la differenza percentuale tra due anni.

Questo calcolo è stato fatto per tutte le combinazioni di coppie di anni per le categorie con valori 1, 2, 3 presi singolarmente e per combinazioni di valori quali 1,2 e 1,2,3. In aggiunta alla variazione percentuale per ogni cella, è stata calcolata anche la variazione normalizzata dell'area occupata da costruito tra i diversi anni, questo valore indica la differenza percentuale effettiva di costruito tra le due annate, ad esempio se in una cella era presente il 60% di costruito nel 2021 e lo 0% nel 1985 il normalizzato che si ottiene fornisce il dato per cui il costruito in quella cella è aumentato del 100%. Quindi, si ottengono come risultati delle celle con valori che oscillano tra 100 e -100, quelli negativi indicano le zone con maggior costruito nell'anno più recente, mentre quelli positivi il contrario.

Le formule utilizzate per calcolare la variazione percentuale e la variazione normalizzata delle aree sono state le seguenti:

- Variazione percentuale:

$$\frac{((\text{Valore percentuale anno più remoto}) - (\text{Valore percentuale anno più recente}))}{((\text{Valore percentuale anno più remoto}) + (\text{Valore percentuale anno più recente}))}$$

- Variazione normalizzata delle aree:

$$\frac{((\text{Valore area anno più remoto}) - (\text{Valore area anno più recente}))}{((\text{Valore area anno più remoto}) + (\text{Valore area anno più recente}))}$$

Infine, si è analizzato qualitativamente la relazione del costruito con un altro importante fattore che influisce notevolmente sulla geomorfologia dell'Amazzonia, i corsi d'acqua. Tutti i risultati saranno mostrati nel capitolo 3.

2.4 ANALISI STATISTICHE CON MICROSOFT EXCEL

Excel è un programma prodotto da Microsoft che consente di fare analisi matematico-statistiche attraverso l'utilizzo di fogli di calcolo elettronici. Le estensioni in km² e m² dei vari anni per le diverse categorie di valori (1, 2, 3, 1-2, 1-2-3) sono state riportate su un foglio di lavoro Excel per poter quantificare numericamente le variazioni percentuali di costruito tra coppie di anni in tutta l'area di studio (vedere tabella supplementare allegato 3). Tale analisi è stata svolta sia dall'anno più recente rispetto a quello più vecchio, sia viceversa. Nello specifico, per calcolare la variazione percentuale sono state utilizzate le seguenti formule:

- Variazione totale dell'anno più recente rispetto al più remoto:

$$\frac{((\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più recente}) - (\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più remoto}))}{(\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più remoto})}$$

- Variazione totale dell'anno più remoto rispetto al più recente:

$$\frac{((\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più remoto}) - (\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più recente}))}{(\text{km}^2 \text{ o } m^2 \text{ anno più recente})}$$

Oltre alle variazioni tra coppie di anni, sono state ricavate anche le percentuali di costruito rispetto all'area totale e al 2021, i rispettivi incrementi (Tabella 6) ed i trend di crescita annuale medi (Tabella 7), ottenuti dividendo gli incrementi per il numero di anni compresi nei vari periodi.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

3.1 SCELTA ED ACQUISIZIONE DELLE IMMAGINI PER IL CASO DI STUDIO

Come già anticipato nel capitolo 2, la scelta delle immagini satellitari è iniziata a partire da un controllo fatto attraverso la piattaforma online *open source* di GloVis dell'USGS, alla ricerca dei periodi migliori in cui trovare le immagini con minor copertura nuvolosa, così da poter rendere più veloce e mirata la successiva indagine su GEE. Filtrando le immagini attraverso il '*Common Metadata Filter: Cloud Cover*', in un intervallo compreso tra 0% e 10%, si è potuto osservare e confermare l'ipotesi già verificata nel capitolo precedente: il periodo con minore copertura nuvolosa relativa alla zona di analisi è compreso tra il mese di aprile a quello di settembre (Arquiñigo et al., 2021). È doveroso commentare brevemente l'efficacia del filtro '*Cloud Cover*' che è stato applicato ad un'area più vasta rispetto alla città di Pucallpa. Questo ha implicato che la percentuale di copertura nuvolosa massima accettabile si basasse sulla rilevazione di tutto il territorio evidenziato. Per esempio, se ci fosse stata una copertura nuvolosa del 5%, tale percentuale poteva essere distribuita in modo omogeneo su tutta l'area, come essere presente in modo concentrato al di sopra della città. In conclusione, è consigliabile verificare com'è distribuita la copertura nuvolosa sulla zona di interesse anche se la percentuale fornita dal programma è relativamente bassa.

Dopo aver ottenuto un'indicazione su quali periodi temporali concentrarsi per la ricerca, si è passati al programma GEE, dove sono state individuate e scaricate le immagini dei satelliti Landsat successivamente analizzate ed elaborate su QGIS. In questo caso di studio sono state scelte immagini relative a date precise poiché rispecchiavano i requisiti richiesti, sia per la copertura nuvolosa sia per la disponibilità di dati. Sarebbe risultato possibile anche utilizzare la funzione *median()* di GEE, che consente di ridurre una raccolta di immagini calcolando la mediana di tutti i valori in ogni pixel nella pila di bande corrispondenti, ed ottenere così un risultato unico composto dai pixel migliori di ogni elemento della raccolta. Di seguito sono indicate le immagini scelte ed i loro dati.

Data di acquisizione	Codice identificativo dell'immagine	Satellite	Sensore
14/07/1985	LT05 L1TP 006066 19850714 20200918 02 T1	Landsat 5	TM
13/08/1990	LT05 L1TP 006066 19900813 20200915 02 T1	Landsat 5	TM
01/09/2000	LE07 L1TP 006066 20000901 20200918 02 T1	Landsat 7	ETM+
27/07/2013	LC08 L1TP 006066 20130727 20200912 02 T1	Landsat 8	OLI/TIRS
01/07/2021	LC08 L1TP 006066 20210701 20210708 02 T1	Landsat 8	OLI/TIRS

Tabella 1: Dati delle immagini satellitari scelte per lo studio.

3.2 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI SATELLITARI E MODIFICHE MANUALI

I procedimenti per ottenere come risultato finale dei vettori che permettessero l'analisi quantitativa e qualitativa dell'area in esame su QGIS sono stati già presentati nel capitolo precedente. Di seguito saranno mostrati i risultati ottenuti durante i vari passaggi.

Nella prima parte di elaborazione, i *raster* degli indici NDVI, NDWI e MBI sono stati filtrati attraverso un valore soglia grazie alla funzione “*raster calculator*” per la creazione di maschere che permettessero una distinzione migliore tra gli elementi riconosciuti dai sensori (acqua, vegetazione e suolo nudo) dal resto. A seguito di una serie di tentativi, i valori soglia migliori trovati per ogni indice nei vari anni sono stati i seguenti:

	1985	1990	2000	2013	2021
NDVI	< 0,50	< 0,45	< 0,48	< 0,55	< 0,55
NDWI	< -0,20	< -0,20	< -0,20	< -0,20	< -0,20
MBI	ND	ND	ND	< 0,28	< 0,25

Tabella 2: Valori di soglia utilizzati per le maschere nei vari anni. ND = non definito, per gli anni in cui non è stato utilizzato l'MBI.

Come si può notare, i valori soglia utilizzati per gli indici NDVI e MBI hanno subito delle variazioni per i diversi periodi, la situazione ideale sarebbe stata avere valori univoci per ogni indice, come è avvenuto per l'NDWI, ma questo portava a risultati non corretti. Ciò, potrebbe essere dovuto a differenze presenti nei sensori nei diversi Landsat, oppure anche dal giudizio soggettivo nel definire i valori soglia. È interessante osservare, inoltre, come siano state necessarie delle modifiche manuali dei valori dei vari elementi, che sia il programma, attraverso i vari calcoli, che la scelta individuale dei valori soglia, hanno generato. Nelle tabelle 3 e 4 sono riportati rispettivamente le percentuali di elementi modificati dal valore 1 (*built-up* rilevato) al valore 4 (da *built-up* a non *built-up*) rispetto al totale di elementi rilevati inizialmente con valore 1, e le percentuali di elementi modificati dal valore 0 (*non*

built-up rilevato) al valore 2 (da non *built-up* a *built-up*), rispetto al totale di elementi rilevati con valore 0. Gli interventi maggiori sono stati applicati per gli anni 1985, 1990, 2000 e 2021, quest'ultimo solo nel caso della conversione da 1 a 4. L'elevata percentuale per quest'ultima conversione nel 2021 è spiegabile dal fatto che è stato reso necessario convertire tutte quelle aree di barre di fiume o terreno nudo che erano state rilevate come suolo costruito, in quanto le firme spettrali dei due elementi sono molto simili e, nonostante i vari tentativi nella scelta del valore soglia per l'indice NDBI, in molti casi non si è riusciti a differenziare queste due classi. Grazie alla scelta di utilizzare un'intersezione del 2021 con gli anni precedenti, questa problematica in gran parte non si è riproposta poiché i vettoriali che si ottenevano erano il risultato di intersezioni con quelli antecedenti in cui la maggior parte degli elementi con valore 4 erano già stati convertiti. Per i primi tre anni invece, le alte percentuali osservabili sono probabilmente dovute all'incertezza soggettiva nell'attribuire una classe o un'altra, oppure dal fatto che non erano disponibili altre immagini di confronto con una risoluzione maggiore che permettessero di distinguere al meglio in caso di difficoltà gli elementi all'interno dell'area, utilizzate invece per gli anni 2021 e 2013. Seppur conoscendo le colorazioni e le forme tipiche del costruito, è probabile che ci sia stata un'eccedenza nell'evidenziare aree di costruito che in realtà avrebbero potuto essere campi coltivati, oppure terreno nudo. Infine, è possibile anche supporre che ci possa essere una correlazione tra l'elevata percentuale in periferia di costruito rilevato e la maggior presenza di popolazione in quelle zone nei primi anni analizzati, che poi è emigrata verso la città nel corso dei successivi decenni come descritto nel capitolo 1 di questo elaborato.

Anno	Modificato sul rilevato (da valore 1 a 4)
1985	10,51%
1990	13,39%
2000	13,94%
2013	0,76%
2021	51,86%

Tabella 3: Percentuali di elementi modificati dal valore 1 (*built-up* rilevato) al valore 4 (da *built-up* a non *built-up*) rispetto al totale di elementi con valore 1 iniziali.

Anno	Modificato sul rilevato (da valore 0 a 2)
1985	0,28%
1990	0,43%
2000	0,14%
2013	0,07%
2021	0,10%

Tabella 4: Percentuali di elementi modificati dal valore 0 (non *built-up* rilevato) al valore 2 (da non *built-up* a *built-up*), rispetto al totale di elementi con valore 0 iniziali.

3.3 RISULTATI QUANTITATIVI DELL'EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO

Nella tabella 5 sono riportate le estensioni delle varie aree di ogni classe in km² e le somme dei valori di costruito rilevato e modificato.

Anno	Area in km ² delle varie classi					
	0 - non <i>built-up</i> rilevato	1 - <i>built-up</i> rilevato	2 - Modificato (non <i>built-up</i> → <i>built up</i>)	3 - Modificato (non <i>built-up</i> → strade)	4 - Modificato (<i>built-up</i> → non <i>built up</i>)	1+2 - Totale <i>built-up</i>
1985	3584,59	3,38	10,36	1,28	0,39	13,74
1990	3576,59	5,63	15,69	1,22	0,87	21,32
2000	3573,92	16,73	4,98	1,66	2,71	21,71
2013	3560,19	34,67	2,62	2,26	0,26	37,29
2021	3486,77	50,54	3,67	4,57	54,45	54,21

Tabella 5: Aree in km² delle varie classi di valori per i vari anni e le somme totali di costruito.

Si può già osservare come ci sia una sostanziale differenza tra i valori di costruito del 1985 e il 2021, ma sarà ancora più evidente successivamente con le percentuali di variazione (Tabella 6). C'è da fare una precisazione per la categoria 3, ovvero il valore dato agli elementi convertiti da non *built-up* a strade. La diminuzione di estensione del sistema stradale andando a ritroso negli anni è probabilmente dovuta da una minore presenza di strade a causa della ridotta urbanizzazione e concentrazione demografica della zona, ma anche dal fatto che per gli anni precedenti al 2013 le strade non sono state più analizzate nello specifico poiché erano altri gli obiettivi della ricerca. La risoluzione spaziale delle immagini utilizzate, inoltre, non permetteva di discriminare con efficacia le strade dal costruito, sono state quindi escluse dalle successive analisi dove si sono considerati solo la somma di 1 e 2.

Come detto precedentemente, la variazione quantitativa di costruito si può apprezzare ancora meglio osservando la tabella 6, in cui sono presenti le percentuali (valori 1 e 2 considerati assieme) rispetto all'area di studio totale ed al costruito del 2021. Si ricorda che l'area di studio ha un'estensione pari a 3600 km².

Anno	Costruito rispetto all'area di studio totale	Incremento	Costruito rispetto al 2021	Incremento
1985	0,38%	0,00%	25,34%	0,00%
1990	0,59%	+0,21%	39,33%	+13,99%
2000	0,60%	+0,01%	40,04%	+0,71%
2013	1,03%	+0,43%	68,79%	+28,75%
2021	1,50%	+0,47%	100,00%	+31,21%

Tabella 6: Evoluzione del costruito in percentuale rispetto all'area totale di studio e alla presenza di costruito tra i vari anni.

Dato che i periodi temporali considerati sono differenti, per avere risultati confrontabili tra questi, è stata calcolata anche la percentuale di tendenza di crescita annua media per ogni coppia di anni consecutivi presi in esame, sempre rispetto all'area di studio totale e dell'area del costruito nel 2021. Tutto ciò è stato ottenuto dividendo l'incremento mostrato pocanzi per il numero di anni trascorsi in ogni periodo.

Periodo	Tendenza di crescita annua media percentuale	
	Rispetto all'area di studio totale	Rispetto al costruito nel 2021
1985-1990	+0,04%	+2,79%
1990-2000	+0,001%	+0,07%
2000-2013	+0,03%	+2,21%
2013-2021	+0,05%	+3,90%

Tabella 7: Tendenza di crescita annua media percentuale tra coppie di anni consecutivi in analisi, rispetto all'area di studio totale e all'area di costruito nel 2021.

Si nota una crescita urbana maggiore nei periodi 1985-1990, 2000-2013 e 2013-2021, mentre il valore più basso viene attribuito alla decade tra il 1990 ed il 2000. Questo risultato è in buona parte in accordo con i dati dell'Istituto Nazionale di Statistica e Informazione (INEI) del governo del Perù, che tra il 1940 ed il 2017 indicano come periodo con minor tasso di crescita demografica urbana quello compreso tra il 1993 ed il 2007 (Arquiñigo et al., 2021).

3.4 ANALISI QUANTITATIVA E QUALITATIVA DELL'EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO

In questo sottocapitolo verranno presentati i risultati e le mappe create con QGIS, che hanno permesso una rappresentazione visiva delle aree di costruito e le sue variazioni percentuali, nei e tra i vari anni dello studio

La figura 3 mostra una mappa della zona di studio che evidenzia, con colori diversi per i vari anni, le aree di costruito, considerando insieme gli elementi con valore 1 (*built-up* rilevato) e valore 2 (da non *built-up* a *built up*). Per una migliore visualizzazione, alcune cartografie inserite nel seguente testo non rappresentano l'intera area di studio, focalizzandosi sulla città e il suo intorno più costruito. La cartografia dell'intera area di studio con il costruito totale è disponibile nell'allegato 4. Come si può apprezzare dalla figura 3, la parte più antica della città, ovvero quella presente fino al 1985 si concentrava principalmente a ridosso del fiume e lungo l'asse viario principale, che collega la città a Lima. Negli anni successivi il corpo centrale si è ampliato, in particolare verso nord e sud, fondamentalmente a causa della presenza del fiume Ucayali che scorre lungo il lato orientale della città.

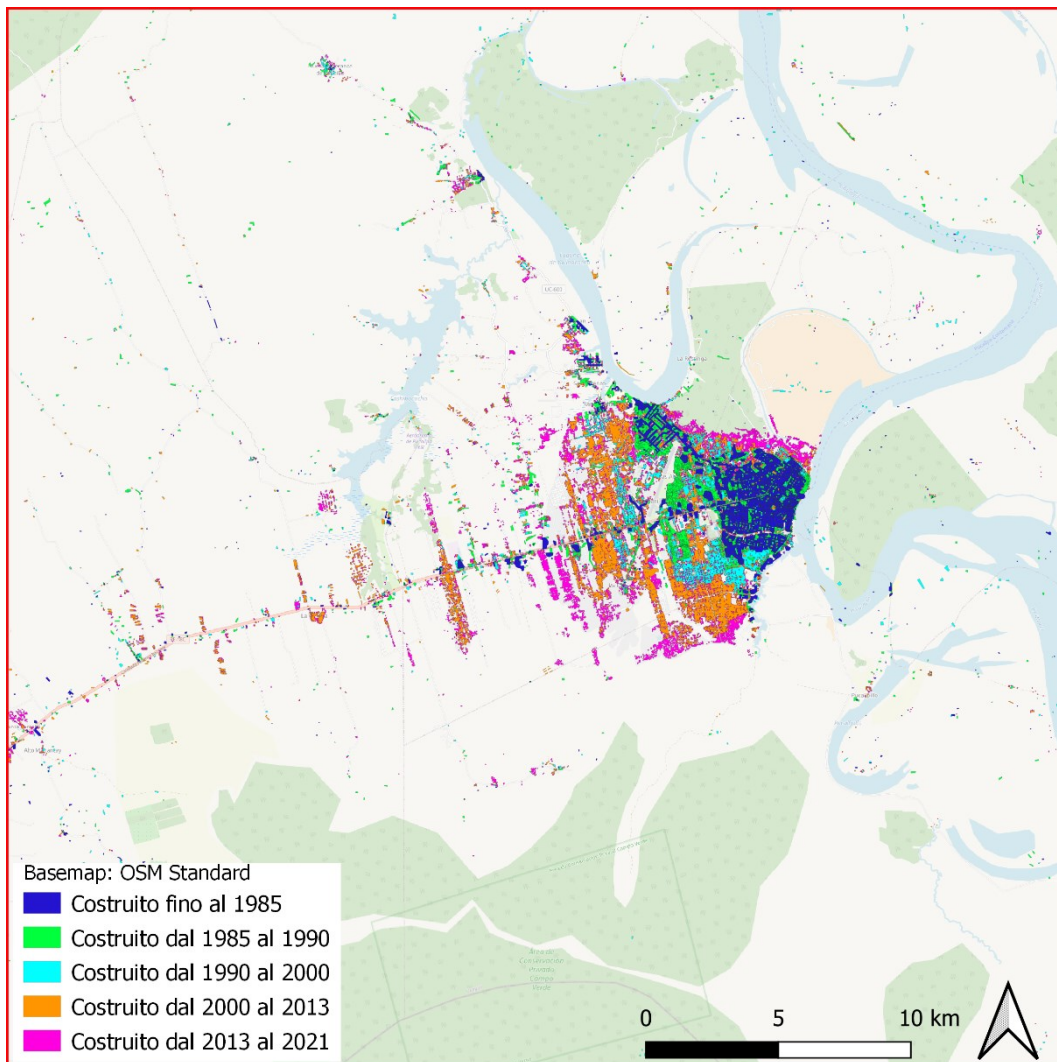


Figura 3: Dettaglio dell'area totale di studio con evidenziate le superfici di costruito (valori 1 e 2 considerati assieme) nei vari anni, colorate diversamente. Elaborazione propria.

La figura 4 (a,b,c,d,e) vuole far apprezzare l'espansione della città negli anni di analisi e per l'intera area di studio, riportando in differenti gradazioni di rosso (da tenue a più intenso per i valori più alti) la presenza percentuale di costruito all'interno di un reticolo 60 x 60 km, costituito da celle quadrate di 500 m per lato. In questo caso ogni mappa rappresenta il costruito fino all'anno indicato. Le zone con la presenza di celle con più alta percentuale di costruito rimangono quelle a est e sud-est della città, dove il centro urbano è a stretto contatto con il fiume, elemento fondamentale per il trasporto e la vita economica della città, come già anticipato nel capitolo di introduzione.

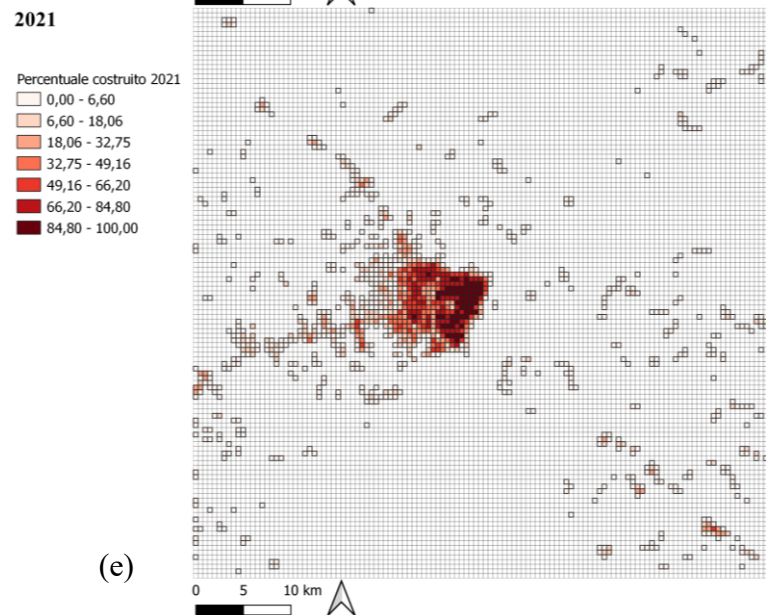
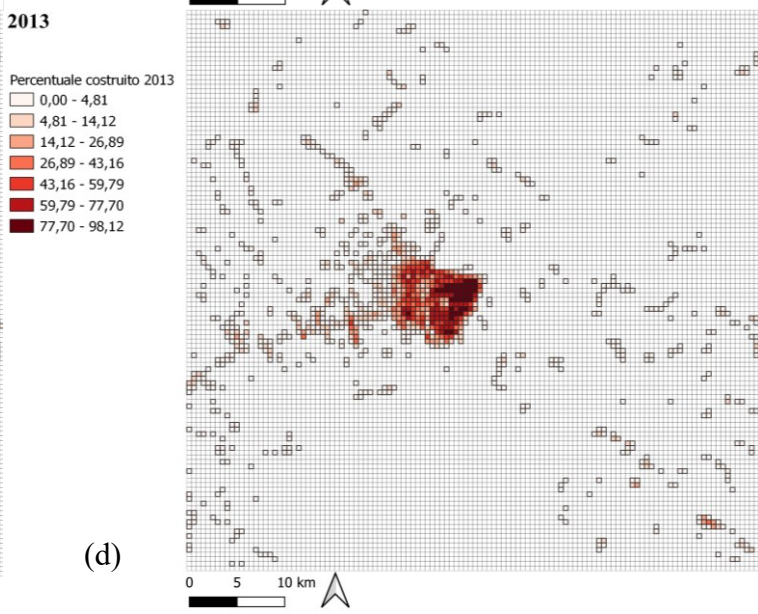
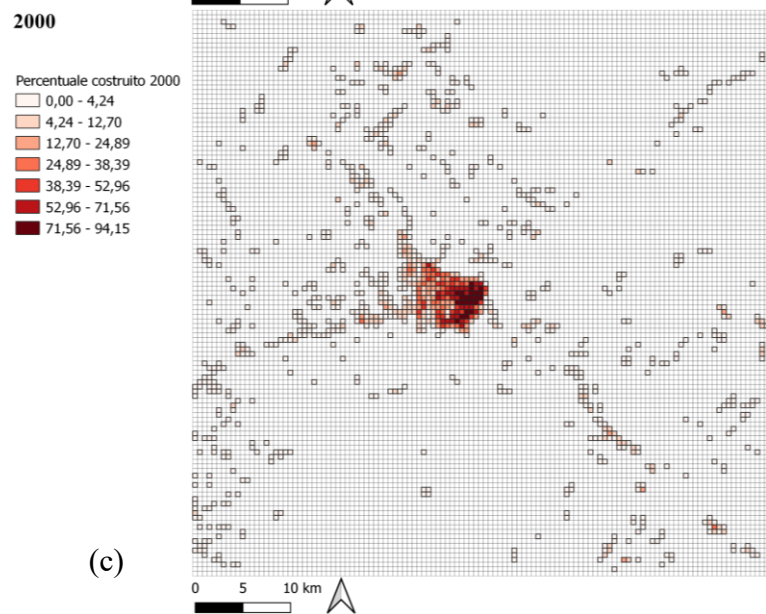
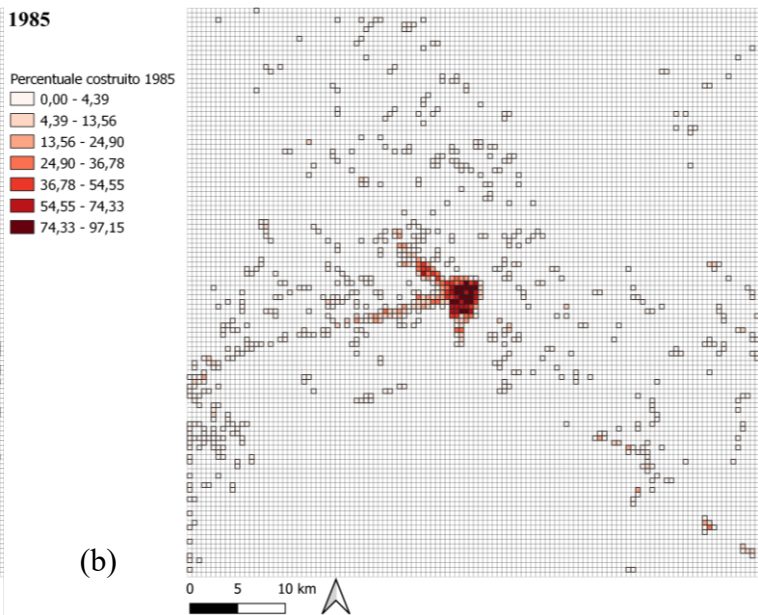
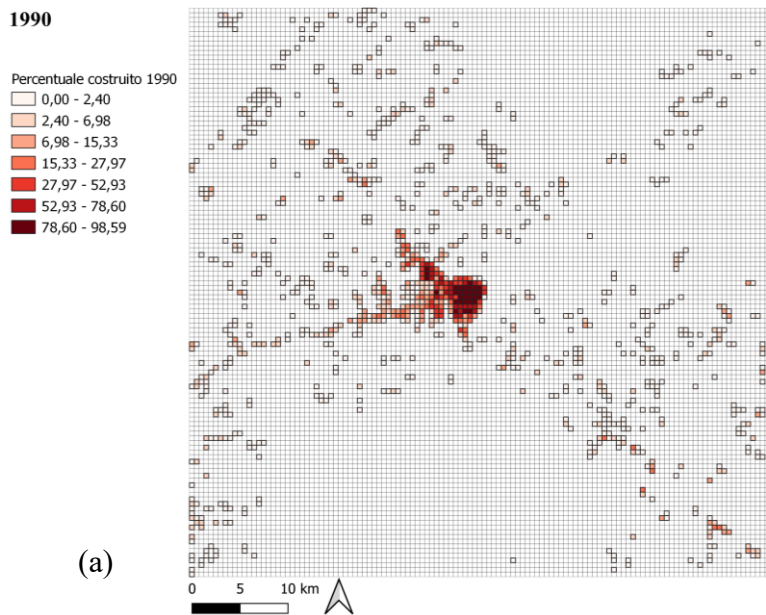


Figura 4 (a,b,c,d,e): Evoluzione percentuale di costruito (1 e 2) per ogni anno di studio. Elaborazione propria.

A sostegno dei dati ottenuti, secondo cui c'è una maggiore concentrazione nella parte orientale della città, è stata trovata una mappa all'interno dello studio “*Spatial planning of the timber industry and the social-environmental and economic impact in Pucallpa-Ucayali (Peru), 2000-2019, Arquíñigo et al., 2021*” nella quale si può osservare la distribuzione delle industrie del legno all'interno della città di Pucallpa, specialmente a ridosso del fiume. Quindi, dai dati ottenuti in questo studio, e quelli presenti in questa mappa, è possibile ipotizzare la presenza di una correlazione tra l'ubicazione delle industrie e quella delle aree maggiormente costruite.

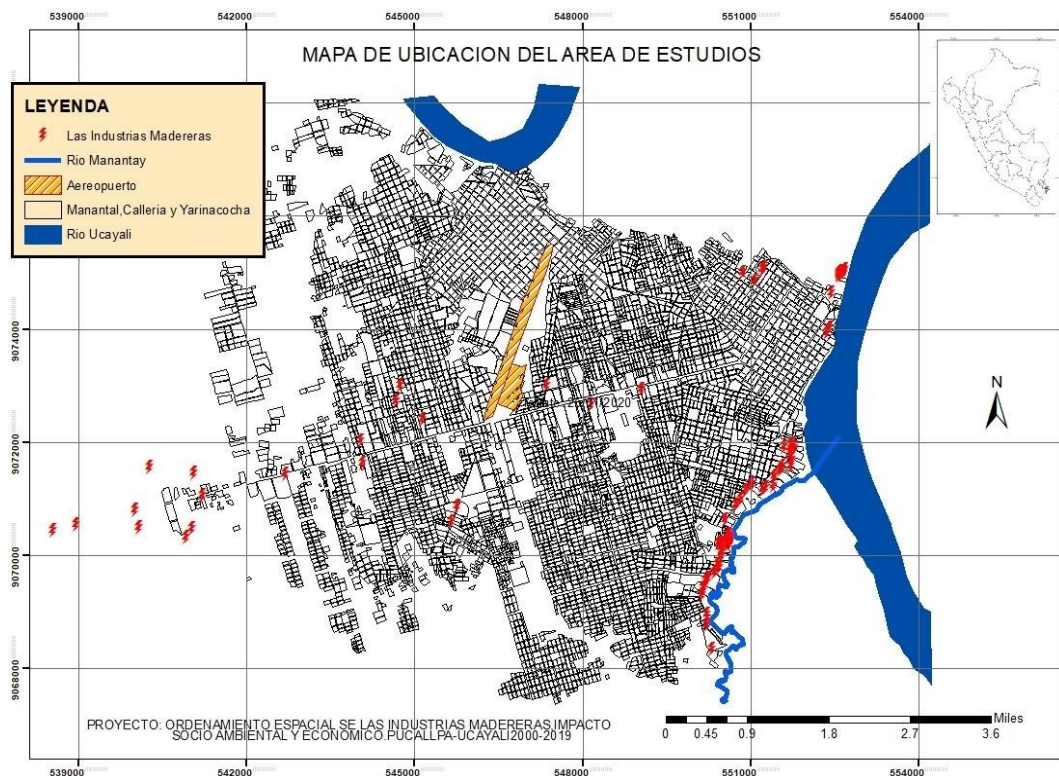


Figura 5: Mappa raffigurante la distribuzione delle industrie di legname nella città di Pucallpa. Fonte: “*Spatial planning of the timber industry and the social-environmental and economic impact in Pucallpa-Ucayali (Peru), 2000-2019, Arquíñigo et al., 2021*”.

Per quanto riguarda la variazione di costruito tra i vari anni, per limiti di spazio è stato deciso di presentare i due periodi in cui sono presenti i maggiori tassi di variazione, ovvero 1985-2013 e 1990-2021 ed il periodo intercorso tra il primo e l'ultimo anno di studio (1985-2021). Sono state create mappe sia per la variazione percentuale di costruito (Figure 6, 8, 10), sia per la variazione normalizzata delle aree occupate da costruito (Figure 7, 9, 11). Per le prime i valori negativi indicano un aumento del costruito (quindi ad esempio una maggiore area occupata nella cella nel 2021 rispetto al 1985), mentre i valori positivi indicano una diminuzione. Per

quanto riguarda la variazione normalizzata vale lo stesso principio: i valori positivi rappresentano una diminuzione del costruito, mentre i negativi un aumento, dell'anno più recente rispetto a quello più remoto.

Per dare un contesto geografico è stata utilizzata come *basemap* una rappresentazione dell'area di studio fornita da *OpenStreetMap Standard* (OSM Standard).

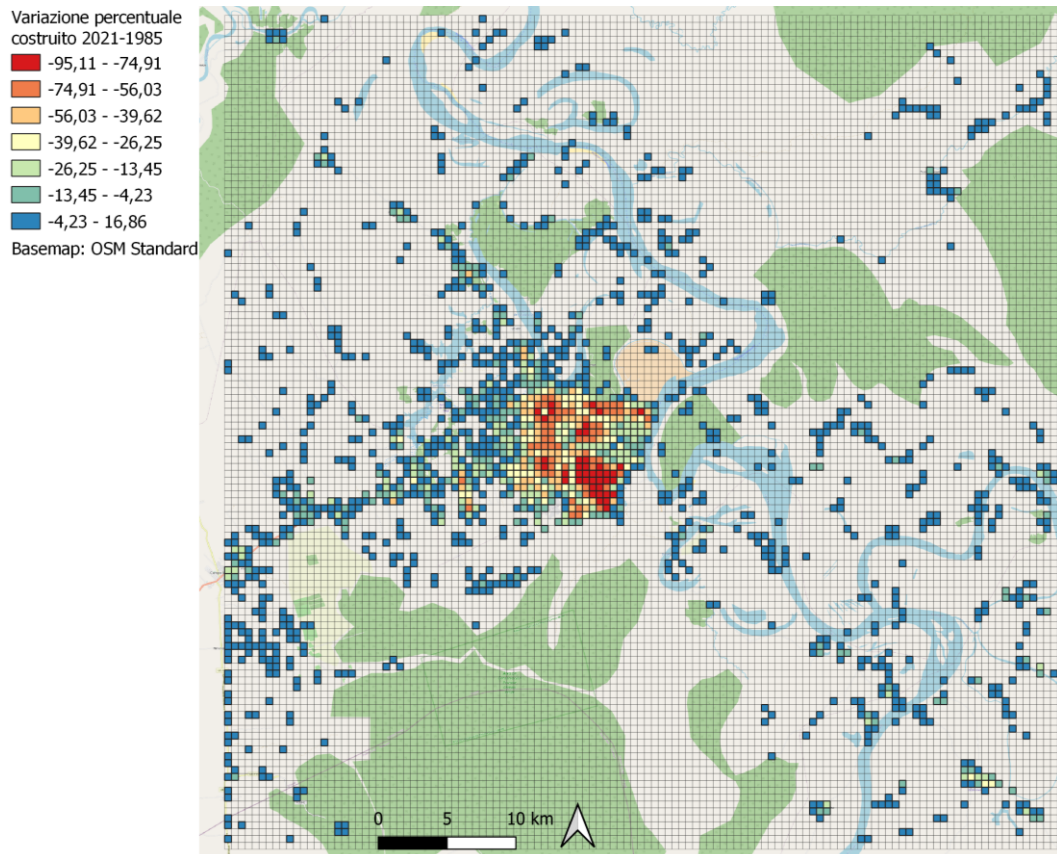


Figura 6: Variazione percentuale di costruito tra il 2021 ed il 1985. Elaborazione propria.

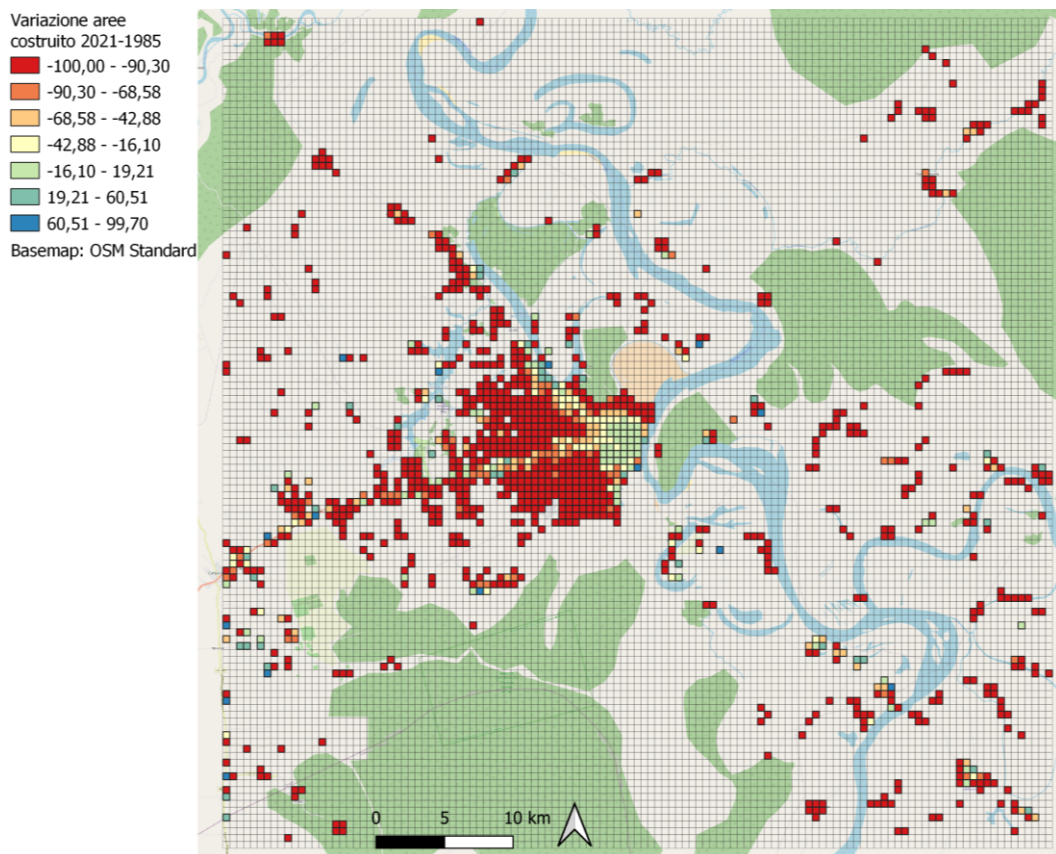


Figura 7: Variazione normalizzata di costruito tra il 2021 ed il 1985. Elaborazione propria.

In figura 6 si può notare come nell'intervallo temporale totale dello studio, dal 2021 al 1985, c'è stato un elevato aumento del costruito principalmente all'interno della città rispetto alla periferia. In particolare, il settore a sud-est della città è andato incontro all'incremento maggiore. Questo andamento si ripresenterà in modo simile anche per i successivi periodi illustrati. Tra il 2021 ed il 1985 il numero di celle con valore positivo è pari a 466 su un totale di 14400, una percentuale pari al 3,23%. Per il 2013-1985 sono presenti 478 elementi positivi, il 3,31%, mentre nel 2021-1990 i valori si discostano leggermente, con 223 elementi positivi, pari ad una percentuale dell'1,54%. Dati che confermano le tabelle e le mappe già presentate, per cui nel 1985 e nel 1990 sono state individuate più zone di costruito in periferia rispetto alle altre annate.

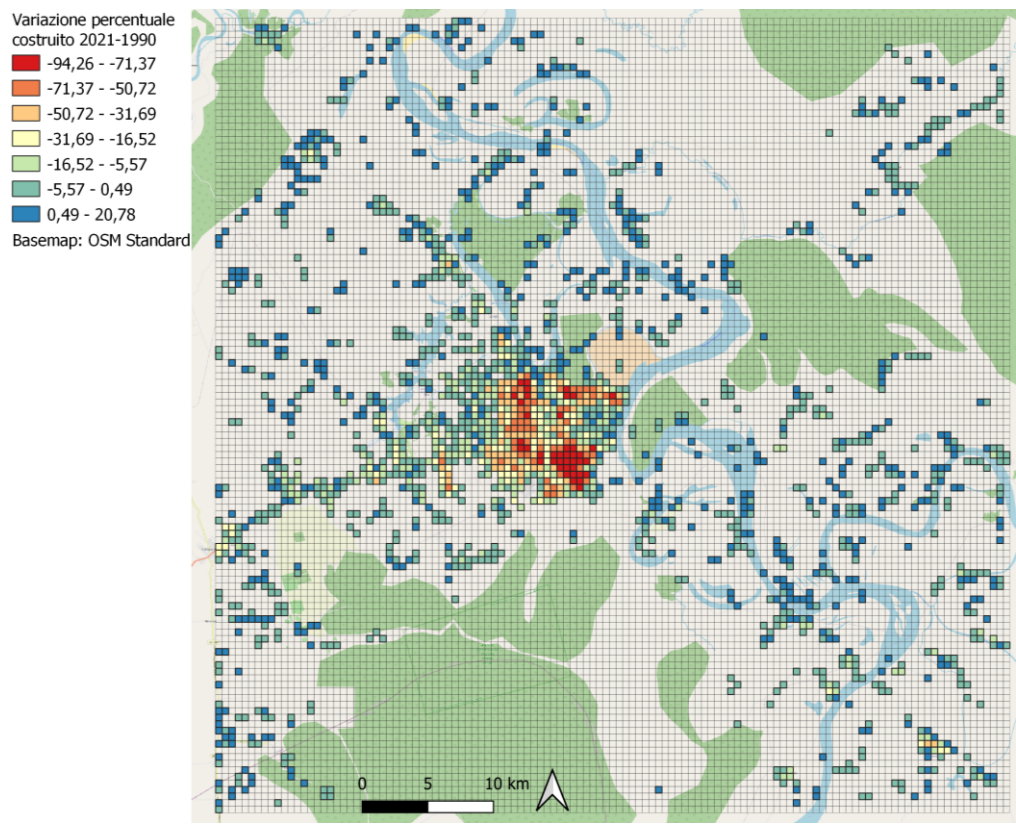


Figura 8: Variazione percentuale di costruito tra il 2021 ed il 1990. Elaborazione propria.

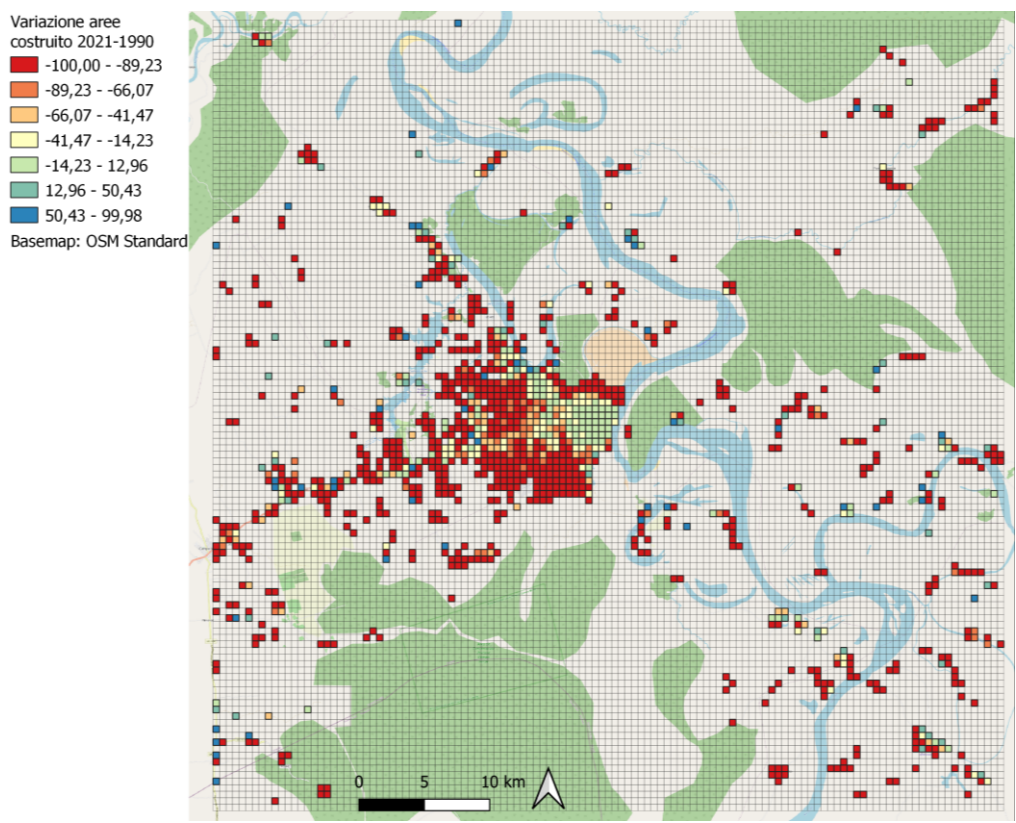


Figura 9: Variazione normalizzata di costruito tra il 2021 ed il 1990. Elaborazione propria.

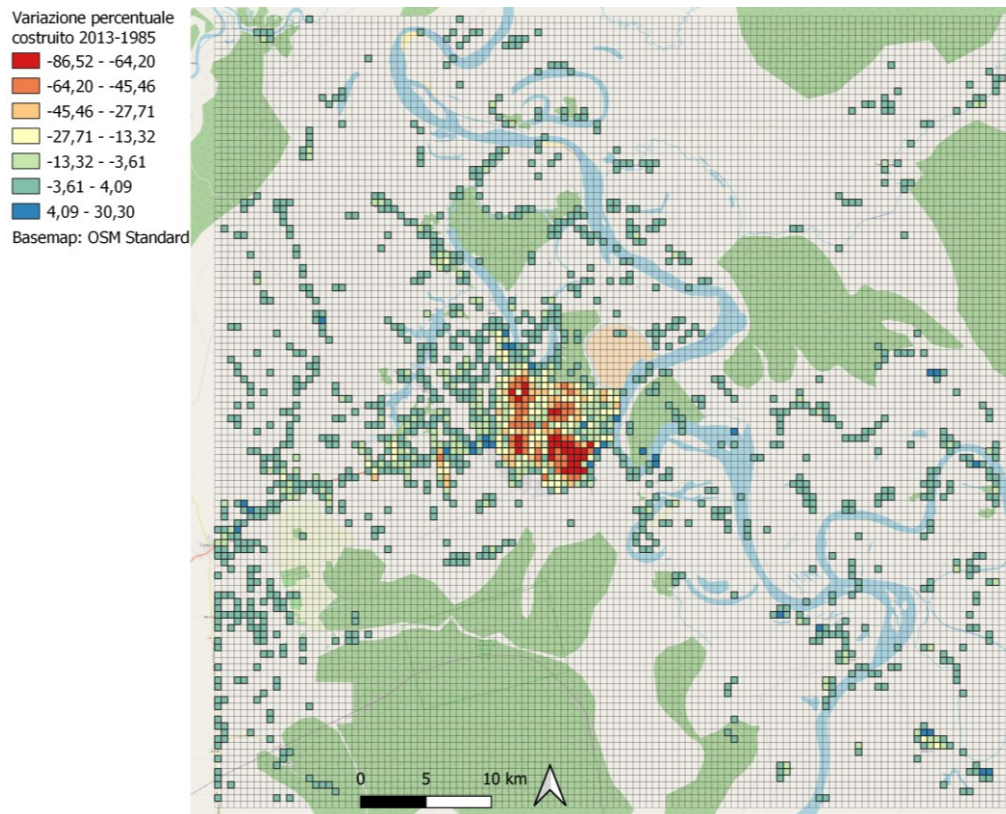


Figura 10: Variazione percentuale di costruito tra il 2013 ed il 1985. Elaborazione propria.

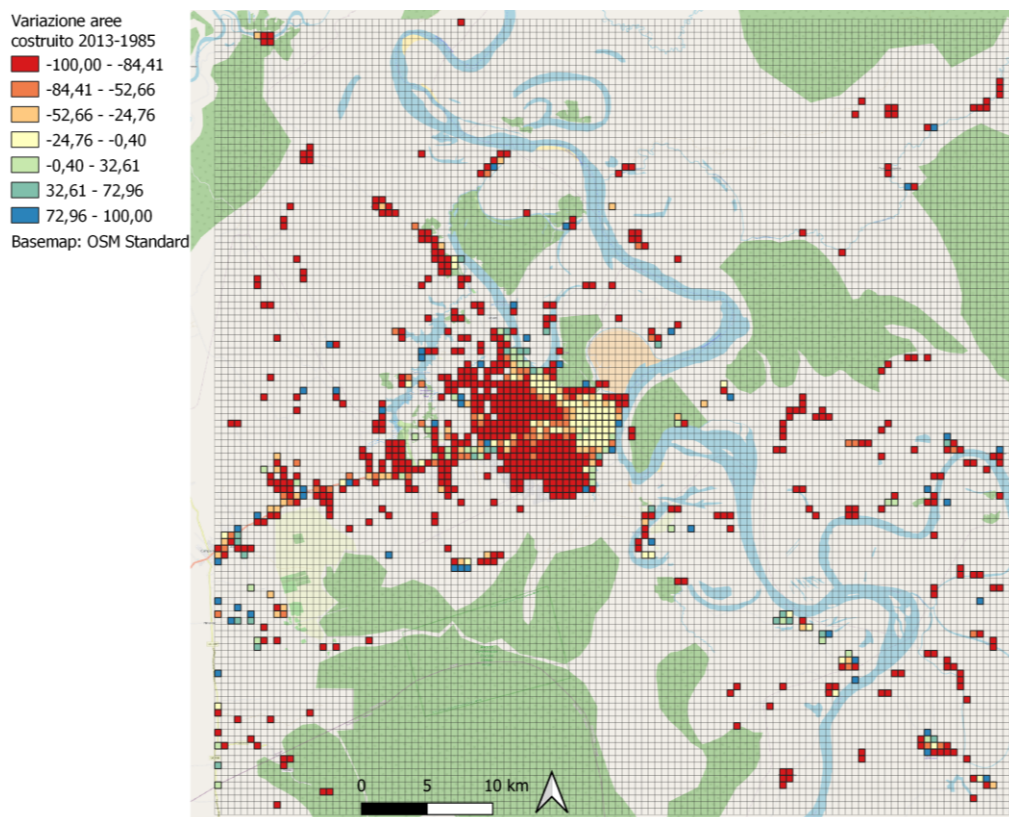


Figura 11: Variazione normalizzata di costruito tra il 2013 ed il 1985. Elaborazione propria.

Si può notare come le mappe con variazione percentuale e normalizzata siano concordi per i loro valori. In particolare, è possibile osservare in tutte una ridotta variazione dell'area urbanizzata nelle vicinanze del fiume Ucayali. Una spiegazione plausibile può essere data dall'alta variabilità del corso del fiume (si veda il paragrafo successivo) che comporta un conseguente rallentamento della costruzione nelle sue vicinanze a vantaggio di aree più sicure.

Nell'allegato 5 sono disponibili figure supplementari per le restanti mappe di variazione percentuale e normalizzata tra le coppie di anni non riportate in questo elaborato.

3.5 EVOLUZIONE DELL'URBANIZZATO RISPETTO AI CORPI D'ACQUA

Come ultima analisi si è voluto osservare la variazione del costruito in relazione al cambiamento del corso del fiume Ucayali, da cui prende il nome la regione, che affianca la città di Pucallpa ed è di fondamentale importanza per il trasporto sia di persone che di merci, come già accennato nel capitolo 1. Nella figura 12 sono stati riportati con il medesimo colore i corpi d'acqua e le aree di costruito degli stessi anni e successivamente sono stati sovrapposti i vari *layers* per evidenziare le differenze del corso del fiume nei diversi periodi.

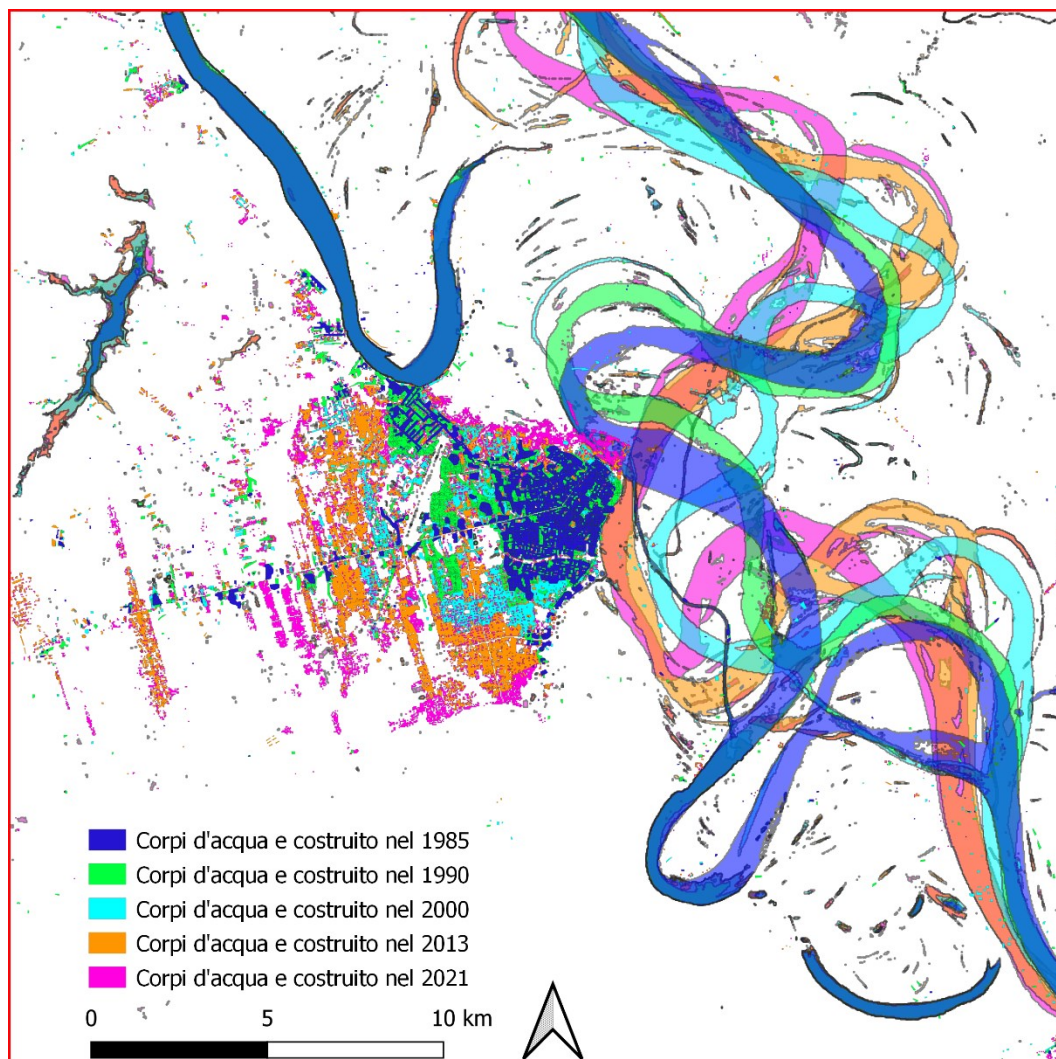


Figura 12: Rappresentazione grafica dei corsi d'acqua e del costruito nei vari anni considerati nello studio. Elaborazione propria.

È interessante notare come, nonostante il fiume abbia cambiato spesso il suo percorso nell'arco degli anni, i confini della città sono rimasti sostanzialmente gli stessi. Una differenza la si può trovare negli anni 1990 e 2000, infatti, se per gli altri periodi la città è direttamente a contatto con il fiume, in quei due anni non è presente un collegamento così stretto. Inoltre, si può osservare come sia stata ampliata la città a nord-est nel 2021, dove nel 1985 scorreva lo Ucayali. Sarebbe utile indagare in modo più dettagliato la velocità con cui è cambiato il corso del fiume in quel periodo (1990-2000), e se questa distanza tra la città ed il suddetto non sia dovuta ad uno spostamento troppo rapido del corso d'acqua affinché la città potesse espandersi di conseguenza. Questa appena descritta è stata un'analisi preliminare di tipo qualitativo, per uno studio più accurato si potrebbero prendere in

considerazione più immagini, in un arco temporale maggiore, per approfondire la relazione città-fiume.

4. CONCLUSIONI

Attraverso questo studio si è dimostrato come la città peruviana di Pucallpa si sia espansa nel corso degli ultimi 40 anni, con un andamento positivo soprattutto durante i primi due decenni del XXI secolo.

L'aumento del costruito è risultato concordante con quello demografico ed i fenomeni di emigrazione dalla periferia alla città. Il cambiamento del corso del fiume non ha contribuito in modo sostanziale sulla posizione ed i confini del centro urbano, nonostante si sia notata una differenza per gli anni 1990 e 2000 in cui Pucallpa ed il fiume Ucayali non erano a stretto contatto attraverso il porto cittadino.

Le immagini satellitari provenienti dai satelliti Landsat e gli indici utilizzati sono risultati un ottimo strumento per la rilevazione di costruito anche in zone ricche di vegetazione e soggette ad importanti cambiamenti idrografici come la Foresta Amazzonica peruviana.

È doveroso fare una notazione per una problematica riscontrata durante l'analisi e l'elaborazione dei dati in questo studio. L'errore sperimentale umano ha un peso ancora sostanziale sull'ottenimento dei risultati, in particolare per la scelta soggettiva delle aree da modificare dopo le operazioni tra *layers* filtrati. La possibilità di utilizzare immagini aggiuntive di altri satelliti per distinguere meglio le aree di costruito negli anni più recenti può comportare un eccesso, oppure una carenza, nel conteggio totale delle stesse. L'utilizzo di indici diversi che permettono una migliore distinzione da parte del programma delle aree di costruito, oppure immagini più precise ottenute attraverso altri satelliti oltre a quelli utilizzati in questo studio per gli anni più remoti, potrebbero essere delle soluzioni al problema.

In conclusione, è auspicabile che in futuro possano essere fatti ulteriori studi riguardo la città di Pucallpa, grazie anche all'utilizzo di altri dataset presenti in letteratura che mappano l'urbanizzato o l'uso del suolo. Ci si potrebbe concentrare maggiormente sulle relazioni tra l'espansione urbana e i fenomeni demografici, l'andamento economico e lo sviluppo industriale. Indagare l'eventuale presenza di uno schema comune che possa essere applicato o utilizzato come strumento di indagine per altre città amazzoniche o in altri paesi in via di sviluppo. Da un punto di vista ecologico, inoltre, potrà essere utile applicare le tecniche utilizzate in

quest'analisi per osservare le relazioni e le conseguenze dell'aumento delle zone urbanizzate verso le aree non ancora intaccate dalla modifica attiva dell'uomo. In particolare, nelle zone come l'Amazzonia, hotspot di biodiversità, fondamentali per la ricerca scientifica attraverso la scoperta di nuove specie ed elementi utili in svariati campi industriali, ma anche per la ricchezza di valore intrinseco che apporta all'umanità.

BIBLIOGRAFIA

- Arquiñigo, C. M., Encinas, A. I. D., & Arquiñigo, N. M. (2021). *Spatial planning of the timber industry and the social-environmental and economic impact in Pucallpa-Ucayali (Peru), 2000-2019*. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 17, 583–594. <https://doi.org/10.37394/232015.2021.17.56>
- Bevington, A., Gleason, H., Giroux-Bougard, X., & de Jong, J. T. (2018). *A Review of Free Optical Satellite Imagery for Watershed-Scale Landscape Analysis*. *Confluence: Journal of Watershed Science and Management*, 2(2). <https://doi.org/10.22230/jwsm.2018v2n2a18>
- Charity S., Dudley N., Oliveira D., Stolton S., (2016), *Living Amazon Report 2016: A regional approach to conservation in the Amazon*, WWF Living Amazon Initiative, Brasília and Quito.
- Culas, R. J. (2009). *The Causes and Consequences of Tropical Deforestation: A Review*, *The International JOURNAL of CLIMATE CHANGE Impacts and Responses* (Vol. 1, Issue 2). <http://www.Climate-Journal.com>,
- da Silva, J. M. C., Rylands, A. B., & da Fonseca, G. A. B. (2005). *The fate of the Amazonian areas of endemism*. In *Conservation Biology* (Vol. 19, Issue 3, pp. 689–694). <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00705.x>
- Dauer K. R. (2012), *Dynamic and static characterization of the planimetry of the Ucayali river, Peru*, Bachelor of Science, Civil Engineering, University of Pittsburgh, p. 13
- Ichikawa, M., Ricse, A., Ugarte, J., & Kobayashi, S. (2014). *Migration patterns and land use by immigrants under a changing frontier society in the Peruvian Amazon*, In *TROPICS* (Vol. 23, Issue 2).
- Khorrarn, S., Koch, F. H., van der Wiele C. F., Nelson S. A.C., (2012), *Remote Sensing*, Springer Science & Business Media, p. 2
- Pesaresi, M., Huadong, G., Blaes, X., Ehrlich, D., Ferri, S., Gueguen, L., Halkia, M., Kauffmann, M., Kemper, T., Lu, L., Marin-Herrera, M. A., Ouzounis, G. K., Scavazzon, M., Soille, P., Syrris, V., & Zanchetta, L. (2013). *A Global Human Settlement Layer From Optical HR/VHR RS data: Concept and First Results*, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(5), 2102–2131. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2271445>
- Ritchey, T. (2013). *Wicked Problems: Modelling Social Messes with Morphological*, *Acta Morphologica Generalis AMG*, 2(1). <https://www.researchgate.net/publication/236885171>
- Schwenk, J., Khandelwal, A., Fratkin, M., Kumar, V., & Foufoula-Georgiou, E. (2017). *High spatiotemporal resolution of river planform dynamics from*

landsat: The rivMAP toolbox and results from the Ucayali river. Earth and Space Science, 4(2), 46–75. <https://doi.org/10.1002/2016EA000196>

Srinivas, A., & Koh, L. P. (2016). *Oil palm expansion drives avifaunal decline in the Pucallpa region of Peruvian Amazonia, Global Ecology and Conservation, 7, 183–200. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2016.06.005>*

Valdiviezo-N, J. C., Téllez-Quiñones, A., Salazar-Garibay, A., & López-Caloca, A. A. (2018). *Built-up index methods and their applications for urban extraction from Sentinel 2A satellite data: discussion, Journal of the Optical Society of America A, 35(1), 35. <https://doi.org/10.1364/josaa.35.000035>*

Yáñez, E., & Sevilla, E. (2010). *A sustainable tourism approach to the protection of the Amazon rainforest: The case of Peru, Worldwide Hospitality and Tourism Themes, 2(2), 186–191. <https://doi.org/10.1108/17554211011037877>*

SITOGRAFIA

Google Earth Engine, Platform (consultato il: 14/09/2022):

<https://earthengine.google.com/platform/>

INEI, dati estensione Ucayali (consultato il: 28/10/2022):

<https://www.inei.gob.pe/>

Ministerio de Salud del Perú (consultato il: 28/10/2022):

https://www.minsa.gob.pe/reunis/data/poblacion_estimada.asp

Open Source Geospatial Foundation (consultato il: 14/09/2022):

<https://www.osgeo.org/>

Pucallpa.com, Ciudad della Tierra Colorada (consultato il: 29/10/2022):

<http://www.pucallpa.com/pucallpa/ubicacion-de-pucallpa-peru.php>

QGIS (consultato il: 16/09/2022):

<https://www.qgis.org/it/site/about/index.html>

UNICEF, Perú (consultato il: 27/10/2022):

<https://www.unicef.org/peru/en/where-we-are/ucayali>

USGS, GloVis (consultato il: 14/09/2022):

<https://www.usgs.gov/tools/glovis>

USGS, *What is the Landsat satellite program and why is it important?* (consultato il: 15/09/2022):

<https://www.usgs.gov/faqs/what-landsat-satellite-program-and-why-it-important>

USGS, *Who we are* (consultato il: 15/09/2022):

<https://www.usgs.gov/about/about-us/who-we-are>

WWF Svizzera, Amazzonia (consultato il: 27/10/2022):

<https://www.wwf.ch/it/dove-operiamo/amazzonia-un-gioiello-di-valore-inestimabile>

RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare dei ringraziamenti a chi, con dedizione e pazienza, ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore, il prof. Massimo De Marchi, ed il correlatore dott. Daniele Codato, per avermi seguito con estrema disponibilità, dispensato preziosi consigli per la stesura dell'elaborato ed avermi suggerito puntualmente le giuste modifiche da apportare alla tesi.

Ringrazio i miei genitori e i miei familiari, per avermi aiutato economicamente e sostenuto durante questo percorso di studi che spero possa portare ad una radiosa carriera professionale.

Ringrazio i miei colleghi di corso e di tirocinio, con cui ho percorso questi anni di studio e condiviso le gioie e le fatiche che si sono presentate, dandoci man forte l'uno con l'altro.

Ringrazio i miei amici, che sia all'interno dell'università, che al di fuori, hanno saputo sostenermi nei momenti di difficoltà e regalato momenti di gioia e spensieratezza.

Infine, vorrei dedicare un ringraziamento alla persona che meno considererei in questa parentesi, me stesso. Vorrei ringraziarmi per non aver mollato durante questi anni, per aver continuato nonostante le difficoltà e per i traguardi che sono riuscito a raggiungere. Spero che questo sia solo il primo passo per un futuro pieno di scoperte e soddisfazioni.

ALLEGATI

Allegato 1 – Tabella supplementare 1: elenco di tutte le immagini dei satelliti Landsat 5, 7, 8, ricercate su GloVis, aventi un livello di copertura nuvolosa all'interno dell'intervallo 0% – 10% con le corrispettive caratteristiche (codici identificativi, data di acquisizione e tipo di satellite).

Collezione d'immagini: Landsat 4-5 TM C1 Level-1:	
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19840524_20170220_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661984145CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1984/05/24
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19840812_20170220_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661984225CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1984/08/12
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19840828_20170220_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661984241CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1984/08/28
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19850612_20170219_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661985163CUB02
<i>Acquisition Date</i>	1985/06/12
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19850714_20170219_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661985195CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1985/07/14
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19860514_20170218_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661986134CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1986/05/14
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19870602_20170212_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661987153XXX03
<i>Acquisition Date</i>	1987/06/02
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19870805_20170211_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661987217XXX07
<i>Acquisition Date</i>	1987/08/05
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT04_L1TP_006066_19880104_20170210_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT40060661988004XXX08
<i>Acquisition Date</i>	1988/01/04
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19880722_20170208_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661988204CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1988/07/22
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19880807_20170207_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661988220CUB02
<i>Acquisition Date</i>	1988/08/07
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19880823_20170206_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661988236CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1988/08/23
<i>Landsat</i>	5

<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19890623_20170202_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661989174CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1989/06/23
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19890709_20170202_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661989190CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1989/07/09
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19890826_20170201_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661989238CUB02
<i>Acquisition Date</i>	1989/08/26
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19900813_20170128_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661990225CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1990/08/13
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19910205_20170127_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661991036CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1991/02/05
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19910613_20170126_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661991164CUB02
<i>Acquisition Date</i>	1991/06/13
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19910816_20170125_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661991228CPE01
<i>Acquisition Date</i>	1991/08/16
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19921005_20170121_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661992279CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1992/10/05
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19930805_20170117_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661993217CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1993/08/05
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19931008_20170116_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661993281CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1993/10/08
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19940808_20170112_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661994220CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1994/08/08
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19940925_20170112_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661994268CUB01
<i>Acquisition Date</i>	1994/09/25
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19950726_20170108_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661995207CUB00
<i>Acquisition Date</i>	1995/07/26
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19960610_20170104_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661996162XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1996/06/10
<i>Landsat</i>	5

<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19960712_20170104_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661996194XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1996/07/12
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19961016_20170103_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661996290XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1996/10/16
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19970715_20161231_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661997196XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1997/07/15
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19980718_20161223_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661998199XXX01
<i>Acquisition Date</i>	1998/07/18
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19980904_20161223_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661998247AAA01
<i>Acquisition Date</i>	1998/09/04
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19990806_20161216_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661999218CPE01
<i>Acquisition Date</i>	1999/08/06
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19990822_20161216_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661999234CPE04
<i>Acquisition Date</i>	1999/08/22
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19990907_20161218_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661999250XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1999/09/07
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_19990923_20161216_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060661999266XXX02
<i>Acquisition Date</i>	1999/09/23
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20000707_20161214_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662000189XXX02
<i>Acquisition Date</i>	2000/07/07
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20010811_20161210_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662001223CUB01
<i>Acquisition Date</i>	2001/08/11
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20030716_20161205_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662003197CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2003/07/16
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20030902_20161204_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662003245CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2003/09/02
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20031020_20161203_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662003293CUB01
<i>Acquisition Date</i>	2003/10/20
<i>Landsat</i>	5

<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20040225_20161202_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662004056CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2004/02/25
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20040531_20161201_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662004152CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2004/05/31
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20040803_20161130_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662004216CUB01
<i>Acquisition Date</i>	2004/08/03
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20050705_20161125_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662005186CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2005/07/05
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20050923_20161125_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662005266CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2005/09/23
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20060809_20161119_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662006221CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2006/08/09
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20060825_20161119_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662006237CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2006/08/25
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20070929_20161110_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662007272CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2007/09/29
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20090630_20161024_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662009181CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2009/06/30
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20100516_20161015_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662010136CUB01
<i>Acquisition Date</i>	2010/05/16
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20110722_20161007_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662011203CPE00
<i>Acquisition Date</i>	2011/07/22
<i>Landsat</i>	5
<i>Landsat Product Identifier</i>	LT05_L1TP_006066_20110807_20161007_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LT50060662011219CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2011/08/07
<i>Landsat</i>	5
Collezione d'immagini: Landsat 7 ETM+ C1 Level-1	
<i>Landsat Product Identifier</i>	LE07_L1TP_006066_20000901_20170210_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LE70060662000245EDC00
<i>Acquisition Date</i>	2000/09/01
<i>Landsat</i>	7
<i>Landsat Product Identifier</i>	LE07_L1TP_006066_20010616_20170204_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LE70060662001167AGS00
<i>Acquisition Date</i>	2001/06/16
<i>Landsat</i>	7

<i>Landsat Product Identifier</i>	LE07_L1TP_006066_20010803_20170204_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LE70060662001215EDC01
<i>Acquisition Date</i>	2001/08/03
<i>Landsat</i>	7
<i>Landsat Product Identifier</i>	LE07_L1TP_006066_20010920_20170203_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LE70060662001263CUB00
<i>Acquisition Date</i>	2001/09/20
<i>Landsat</i>	7
<i>Landsat Product Identifier</i>	LE07_L1TP_006066_20020907_20170128_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LE70060662002250EDC00
<i>Acquisition Date</i>	2002/09/07
<i>Landsat</i>	7
Collezione d'immagini: Landsat 8 OLI/TIRS C1 Level-1	
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20130727_20170503_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662013208LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2013/07/27
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20140714_20170421_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662014195LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2014/07/14
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20140815_20170420_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662014227LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2014/08/15
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20150802_20170406_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662015214LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2015/08/02
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20150818_20170406_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662015230LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2015/08/18
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20150903_20170404_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662015246LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2015/09/03
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20160125_20170330_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662016025LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2016/01/25
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20160617_20170323_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662016169LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2016/06/17
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20160617_20170323_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662016169LGN01
<i>Acquisition Date</i>	2016/06/17
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20171010_20171024_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662017283LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2017/10/10
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20180623_20180704_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662018174LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2018/06/23
<i>Landsat</i>	8

<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20180911_20180927_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662018254LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2018/09/11
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20200612_20200625_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662020164LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2020/06/12
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20210701_20210708_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662021182LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2021/07/01
<i>Landsat</i>	8
<i>Landsat Product Identifier</i>	LC08_L1TP_006066_20210903_20210910_01_T1
<i>Landsat Scene Identifier</i>	LC80060662021246LGN00
<i>Acquisition Date</i>	2021/09/03
<i>Landsat</i>	8

Allegato 2 – Tabella supplementare 2: elenco delle date di tutte le immagini dei Landsat 5,7,8 con una copertura nuvolosa uguale o inferiore al 10%, ottenute tramite GEE. Sono state evidenziate le immagini utilizzate in questo studio.

Data	Copertura nuvolosa	Data	Copertura nuvolosa	Data	Copertura nuvolosa
Landsat 5		Landsat 7		Landsat 8	
1984					
84-05-24	7				
1985					
85-06-12	3				
85-07-14	0				
85-08-06	10				
85-09-07	6				
1986					
86-05-14	10				
86-06-22	2				
86-11-13	1				
1987					
87-07-04	6				
87-07-27	3				
87-08-05	9				
87-08-12	4				
87-08-12	10				
87-08-28	4				
87-09-06	9				
1988					
88-07-06	8				
88-07-22	0				
88-07-29	1				
88-07-29	8				
88-08-07	5				
88-08-23	4				
1989					
89-06-23	1				
89-07-09	3				
89-08-26	1				
1990					
90-05-25	1				
90-08-13	4				
1991					
91-02-05	10				
91-05-12	5				
91-06-13	0				
91-06-20	3				
91-08-07	7				
91-08-16	0				
1992					
92-10-05	8				
1993					
93-07-11	2				
93-07-27	4				
93-08-05	0				
93-09-22	9				
1994					
94-01-03	8				
94-07-14	8				

94-07-14	9				
94-08-08	9				
94-09-25	8				
1995					
95-04-28	4				
95-07-26	1				
1996					
96-06-10	2				
96-09-05	7				
96-10-16	3				
1997					
97-06-04	7				
97-07-15	9				
97-09-08	10				
97-09-17	8				
97-10-10	7				
1998					
98-05-22	7				
98-07-18	1				
98-09-04	8				
98-09-27	6				
98-10-13	4				
98-12-16	10				
1999					
99-07-12	10				
99-07-21	5				
		99-08-05	2		
		99-08-05	9		
99-08-06	1				
		99-08-21	1		
		99-08-21	6		
99-08-22	1				
		99-09-06	2		
99-09-07	6				
99-09-14	6				
99-09-23	1				
		99-10-08	8		
99-11-01	5				
99-11-01	10				
2000					
00-06-28	9				
00-07-07	1				
00-07-30	1				
00-08-24	4				
00-08-31	2				
00-08-31	8				
		00-09-01	2		
00-10-02	3				
2001					
		16/06/2001	10		
10/07/2001	8				
26/07/2001	6				
02/08/2001	5				
02/08/2001	6				
03/08/2001	2				
11/08/2001	0				
		26/08/2001	2		
		26/08/2001	7		

19/09/2001	5				
		20/09/2001	5		
21/10/2001	2				
2002					
		26/06/2002	4		
		21/07/2002	7		
		07/09/2002	3		
2003					
		04/01/2003	8		
14/06/2003	10				
07/07/2003	9				
		15/07/2003	6		
		15/07/2003	9		
16/07/2003	0				
02/09/2003	3				
25/09/2003	7				
		19/10/2003	6		
20/10/2003	5				
2004					
31/01/2004	3				
25/02/2004	3				
31/05/2004	2				
03/08/2004	0				
		11/08/2004	3		
19/08/2004	6				
2005					
		02/01/2005	9		
25/05/2005	7				
19/06/2005	5				
26/06/2005	10				
05/07/2005	7				
		13/07/2005	1		
28/07/2005	5				
28/07/2005	8				
		29/07/2005	0		
13/08/2005	2				
13/08/2005	10				
		14/08/2005	2		
		21/08/2005	3		
29/08/2005	2				
29/08/2005	8				
		30/08/2005	1		
		06/09/2005	3		
		22/09/2005	4		
23/09/2005	4				
30/09/2005	8				
2006					
		13/05/2006	6		
28/05/2006	8				
28/05/2006	10				
		21/06/2006	7		
		30/06/2006	3		
		08/08/2006	2		
09/08/2006	9				
		24/08/2006	7		
25/08/2006	0				
2007					
		30/04/2007	7		

		16/05/2007	7		
09/06/2007	7				
02/07/2007	9				
		03/07/2007	1		
		28/09/2007	7		
29/09/2007	10				
2008					
		05/07/2008	8		
13/07/2008	5				
		21/07/2008	7		
05/08/2008	8				
14/08/2008	1				
		29/08/2008	5		
2009					
30/06/2009	1				
		16/08/2009	1		
18/09/2009	10				
11/10/2009	4				
2010					
		08/02/2010	9		
		15/05/2010	8		
16/05/2010	1				
03/07/2010	2				
		12/08/2010	0		
		19/08/2010	7		
20/08/2010	10				
		20/09/2010	4		
28/09/2010	8				
28/09/2010	9				
14/10/2010	5				
2011					
		14/07/2011	7		
		21/07/2011	5		
22/07/2011	2				
29/07/2011	7				
29/07/2011	10				
07/08/2011	1				
2012					
		14/06/2012	5		
		21/06/2012	6		
		23/07/2012	2		
		08/08/2012	9		
		02/09/2012	9		
		18/09/2012	2		
2013					
				27/07/2013	0.22
		04/08/2013	6	19/08/2013	3.48
		20/08/2013	5	04/09/2013	9.78
				13/09/2013	6.02
		21/09/2013	7		
		28/09/2013	7	07/11/2013	5.93
		08/11/2013	9		
2014					
		20/06/2014	4		
				14/07/2014	6.25
		22/07/2014	2		
				30/07/2014	8.04
		07/08/2014	1		

				15/08/2014	1.59
				22/08/2014	5.23
				22/08/2014	6.24
		23/08/2014	0		
				07/09/2014	1.26
				07/09/2014	7.38
		08/09/2014	0		
		24/09/2014	7		
				02/10/2014	6.65
				18/10/2014	9.09
2015					
				22/06/2015	5.69
		23/06/2015	1		
		30/06/2015	5		
		01/08/2015	6		
		01/08/2015	9	02/08/2015	5.38
				09/08/2015	4.9
		17/08/2015	6	18/08/2015	1.42
				25/08/2015	3.02
				25/08/2015	10.05
		26/08/2015	2	03/09/2015	4.98
				10/09/2015	1
				10/09/2015	10.4
		09/11/2015	3		
		20/10/2015	8	21/10/2015	5.99
		29/10/2015	9		
2016					
		24/01/2016	3		
		24/01/2016	9	25/01/2016	1.8
		06/04/2016	9		
		16/06/2016	4		
		16/06/2016	5	17/06/2016	3.37
				24/06/2016	8.66
		25/06/2016	9		
		02/07/2016	9		
		11/07/2016	3	04/08/2016	1.66
		12/08/2016	0		
		19/08/2016	10		
		13/09/2016	3		
		29/09/2016	6		
		06/10/2016	9	30/10/2016	4.39
				30/10/2016	9.76
		31/10/2016	7		
2017					
		14/07/2017	1		
		21/07/2017	5	22/07/2017	1.14
				29/07/2017	10.23
		15/08/2017	0	30/08/2017	8.93
				30/08/2017	9.53
				01/10/2017	1.38
				10/10/2017	4.59
		18/10/2017	10	13/12/2017	7.88
2018					
				23/06/2018	5.02
				30/06/2018	9.93
		01/07/2018	4		
		09/08/2018	10	16/07/2018	6.82
		18/08/2018	1		

		25/08/2018	2	11/09/2018	5.42
				27/09/2018	7.02
2019					
		08/05/2019	8		
		25/06/2019	5		
		11/07/2019	3		
		11/07/2019	8		
		05/08/2019	0		
		29/09/2019	7		
2020					
		11/06/2020	6		
				12/06/2020	10.44
				06/08/2020	5.4
		07/08/2020	7		
		30/08/2020	6		
				07/09/2020	8.1
				02/10/2020	10.23
		10/10/2020	0		
		20/12/2020	4		
2021					
		29/05/2021	9		
		29/05/2021	9		
		14/06/2021	7	15/06/2021	8.55
		23/06/2021	6	01/07/2021	0.03
		16/07/2021	9	09/08/2021	9.08
		10/08/2021	3		
		17/08/2021	5	03/09/2021	2.16
		27/09/2021	0	12/10/2021	9.15
2022					
		08/01/2022	2		
		17/01/2022	2		

Allegato 3 – Tabella supplementare 3: estensioni in km² e m² dei vari anni per le diverse categorie di valori (1, 2, 3, 1-2, 1-2-3) e variazioni percentuali tra coppie di anni, sia dall'anno più recente al più remoto, che viceversa.

Anno	km ²	m ²	Variazione percentuale km ²	Remoto->Recente Percentuale	Recente->Remoto Percentuale	Variazione percentuale m ²	Remoto->Recente Percentuale	Recente->Remoto Percentuale
2021	58,796	5879663,600	123	0,48609873	-0,327097081	2021-2013	0,486106419	-0,327100679
123	54,220	5420315,580	12	0,453668275	-0,312080413	123	0,453689941	-0,312059988
1	50,548	50548047,945	1	0,457891094	-0,314072708	12	0,457903507	-0,314083548
2	4,672	362267,656	2	0,397792158	-0,284585057	2	0,398073304	-0,2847289
3	3,576	4575748,022	3	1,02309051	-0,50502624	3	1,019817313	-0,50495719
4	54,459	54459004,137						
2013	39,564	39563831,259	2021-2000	1,515444511	-0,602455949	2021-2000	1,515461966	-0,602458708
123	37,299	37298404,593	123	1,49700654	-0,599520472	123	1,497012181	-0,599521377
12	34,672	3467137,680	12	2,020856589	-0,66895811	12	2,02080349	-0,668952447
1	2,627	262666,913	2	-0,62798653	0,3564817482	2	-0,62710135	0,35637858
2	2,265	2265426,676	3	1,756636506	-0,637237762	3	1,756830153	-0,637264607
4	0,268	267844,805						
2000			2021-1990	1,607708343	-0,616521532	2021-1990	1,607703482	-0,616520817
123	23,374	23373863,086	123	1,542311725	-0,60665806	123	1,542320116	-0,606658503
12	21,714	21714077,328	12	7,86672179	-0,88850208	12	7,968447179	-0,888497977
1	16,733	1673312,215	1	-0,65980498	3,27318148	1	-0,65961809	3,2728181
2	4,981	4980765,113	2	-0,65980498	3,27318148	2	-0,65961809	3,2728181
3	1,660	1669785,758	3	2,750819672	-0,733384287	3	2,750716668	-0,733384287
4	2,711	2711055,898						
1990			2021-1985	2,91243013	-0,74440381	2021-1985	2,912519738	-0,744410235
123	22,547	22547066,412	123	2,94568331	-0,746551088	123	2,945679377	-0,746558221
12	21,327	21327000,089	12	13,91971655	-0,929274598	12	13,92076647	-0,929279514
1	5,636	5636209,584	1	-0,645354452	1,819716776	1	-0,645326151	1,81949176
2	15,691	15690890,505	2	2,558320373	-0,71896531	2	2,558182975	-0,71895768
3	1,220	1220966,323	3	2,558320373	-0,71896531	3	2,558182975	-0,71895768
4	0,872	871579,751						
1985			2013-2000	0,692632649	-0,409210393	2013-2000	0,692652649	-0,40921334
123	15,028	15027672,073	123	0,71779107	-0,41785962	123	0,71770617	-0,41785254
12	13,742	13741693,231	12	1,072073149	-0,51739899	12	1,072018811	-0,517388199
1	3,388	3387926,833	1	-0,472595684	0,869679178	1	-0,47264	0,869620195
2	10,354	10353928,398	2	0,364457831	-0,267108168	2	0,472637867	-0,26730195
3	1,286	1285978,842	3	36,446%	-26,711%	3	-0,131108462	-13,111%
4	0,398	397594,702						
2013-1990			2013-1990	0,75472454	-0,43011324	2013-1990	0,754721902	-0,430109125
123	75,473%	-43,011%	123	0,748873707	-0,428203423	123	0,748873707	-0,428203423
12	74,887%	-42,820%	12	5,151880767	-0,83744081	12	5,151616	-0,83744081
1	51,887%	51,887%	1	-0,832579186	4,972972973	1	-0,832599245	4,972972973
2	-0,832579186	85,656%	2	0,856958371	-0,65148966	2	0,856958371	-0,65148966
3	0,856958371	85,656%	3	-0,4322929581	4,3223%	3	0,761636041	-76,164%
4	0,761275272	76,128%						
2013-1985			2013-1985	1,632731875	-0,62016641	2013-1985	1,632731875	-0,62016641
123	163,269%	-62,016%	123	1,714251	-0,631574235	123	1,714251	-0,631574235
12	171,423%	-63,157%	12	9,234399195	-0,923290307	12	9,234399195	-0,923290307
1	923,377%	294,138%	1	-0,746312046	-0,432345855	1	-0,746312046	-0,432345855
2	-0,74628163	43,223%	2	0,761636041	-76,164%	2	0,761636041	-76,164%
3	0,761275272	76,128%	3			3		
4								
2000-1990			2000-1990	0,036668811	-0,035372701	2000-1990	0,036668811	-0,035372701
123	3,666%	-3,537%	123	0,01814486	-0,017821491	123	0,01814486	-0,017821491
12	1,815%	-1,782%	12	1,968894603	-0,663174301	12	1,968894603	-0,663174301
1	1,96895%	1,96889%	1	-0,682569634	2,1503030	1	-0,682569634	2,1503030
2	-0,6825688	68,256%	2	0,360517685	-0,26499566	2	0,360517685	-0,26499566
3	0,360655738	36,066%	3			3		
4								
2000-1985			2000-1985	0,555388151	-0,357073667	2000-1985	0,555388151	-0,357073667
123	55,536%	-35,707%	123	0,580160244	-0,367152791	123	0,580160244	-0,367152791
12	58,012%	-36,715%	12	3,939337008	-0,2975436	12	3,939337008	-0,2975436
1	393,890%	79,753%	1	-0,518949241	-51,895%	1	-0,518949241	-51,895%
2	-0,518929882	107,870%	2	0,290678901	-29,068%	2	0,290678901	-29,068%
3	0,290824261	29,082%	3			3		
4								
1990-1985			1990-1985	0,500368871	-0,33349768	1990-1985	0,500368871	-0,33349768
123	50,033%	-33,348%	123	0,5151999432	-0,35569867	123	0,5151999432	-0,35569867
12	51,966%	-35,565%	12	0,663695641	-0,39828521	12	0,663695641	-0,39828521
1	66,352%	39,886%	1	0,51545287	-51,545%	1	0,51545287	-51,545%
2	-0,515452965	51,545%	2			2		
3	-0,051321928	-5,132%	3			3		

Allegato 4 – Figura supplementare 1: Mappa suolo urbanizzato della zona totale di studio, sono evidenziate con colori diversi le aree di costruito (1 e 2 insieme) per i vari anni.

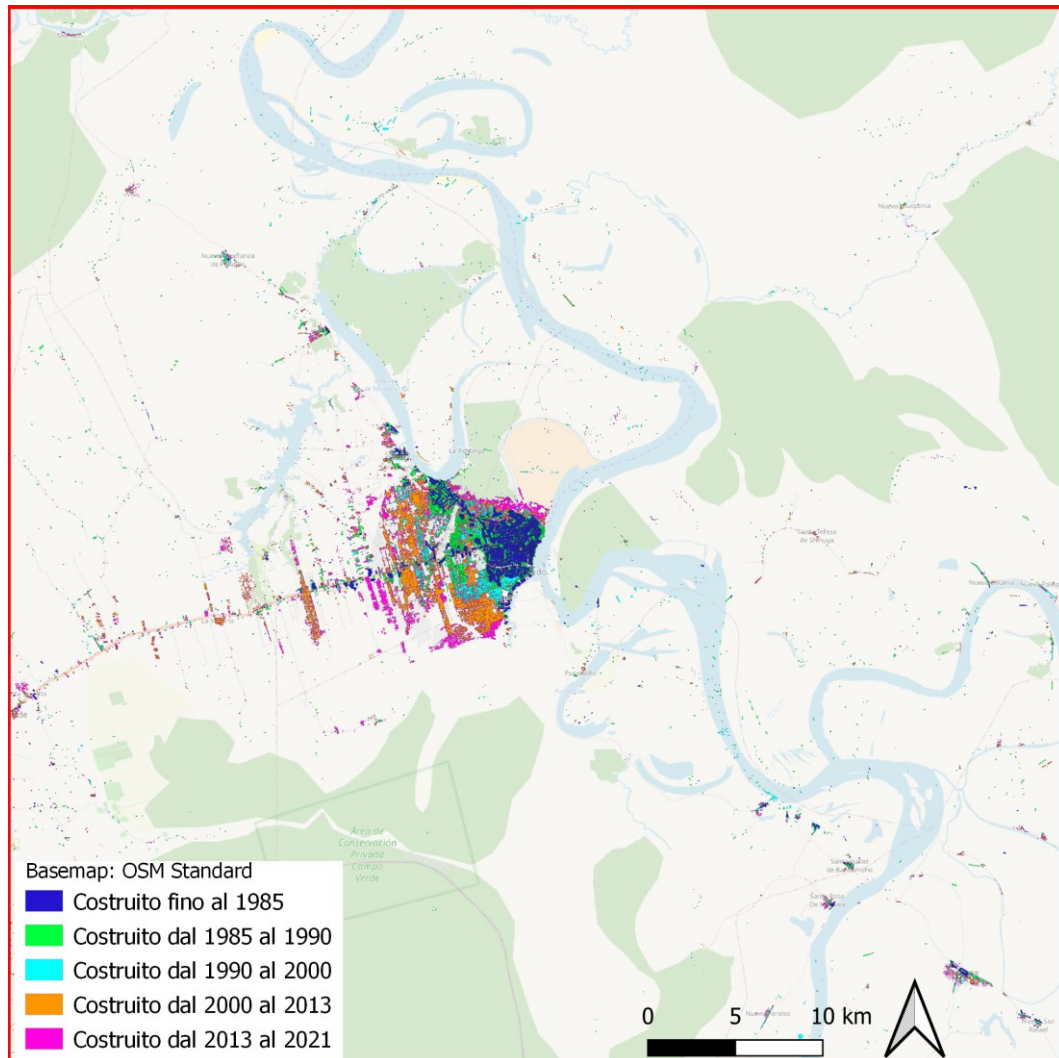


Figura supplementare 1: Area di studio totale con evidenziate le superfici di costruito (valori 1 e 2 considerati assieme) nei vari anni, colorate diversamente. Elaborazione propria.

Allegato 5 – Figure supplementari (2-15): Mappe delle variazioni percentuali e normalizzate del costruito tra coppie di anni non presentate nell’elaborato.

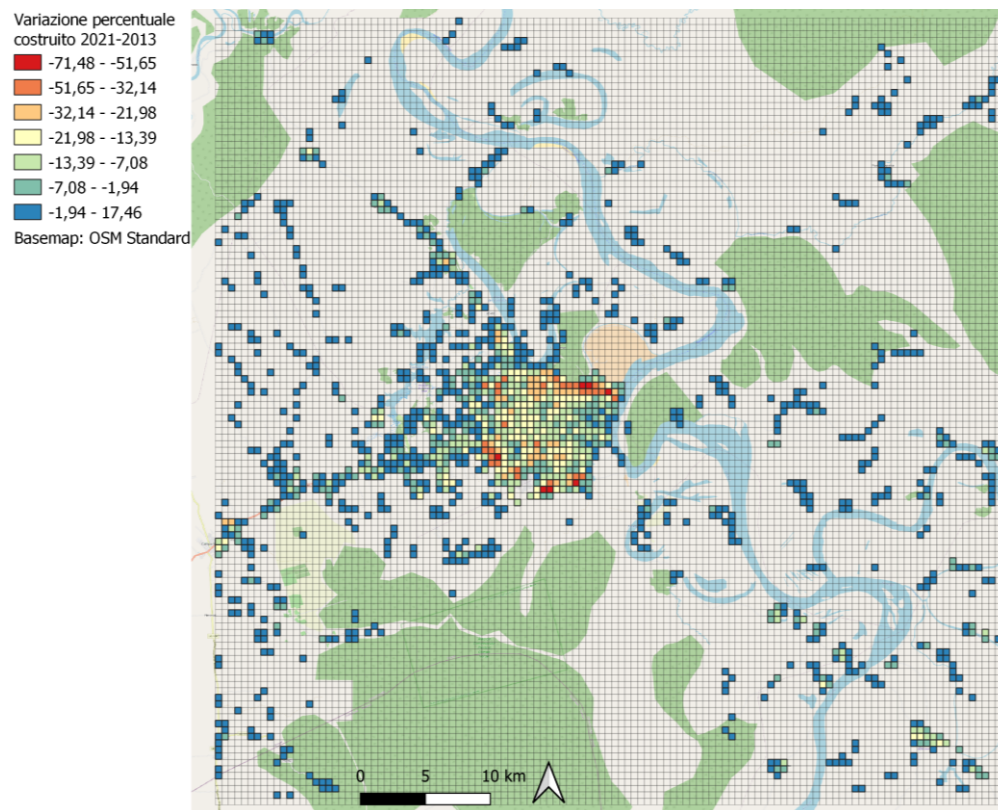


Figura supplementare 2: Variazione percentuale di costruito tra il 2021 ed il 2013. Elaborazione propria.

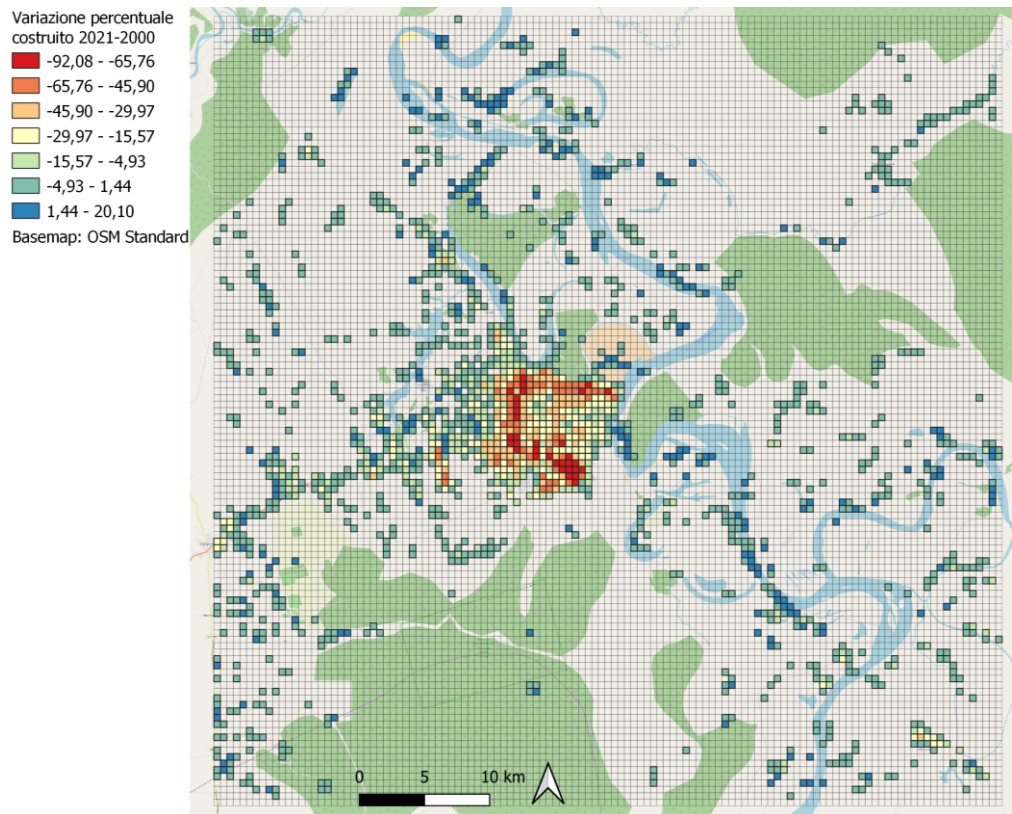


Figura supplementare 3: Variazione percentuale di costruito tra il 2021 ed il 2000. Elaborazione propria.

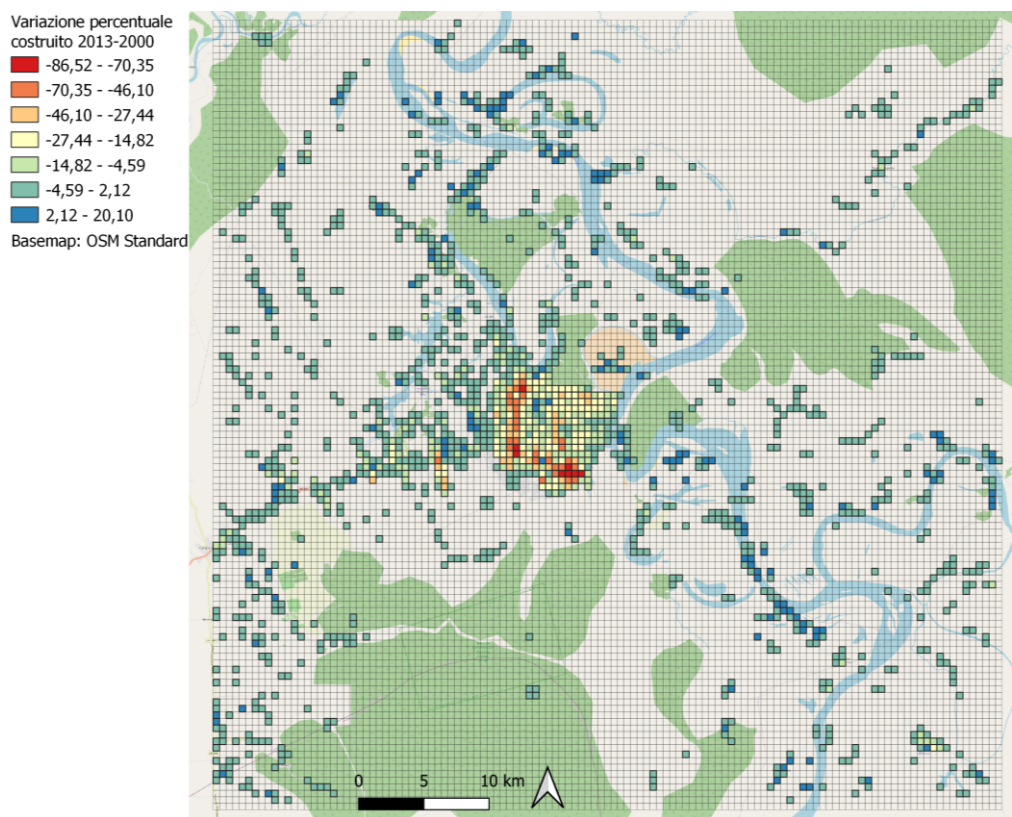


Figura supplementare 4: Variazione percentuale di costruito tra il 2013 ed il 2000. Elaborazione propria.

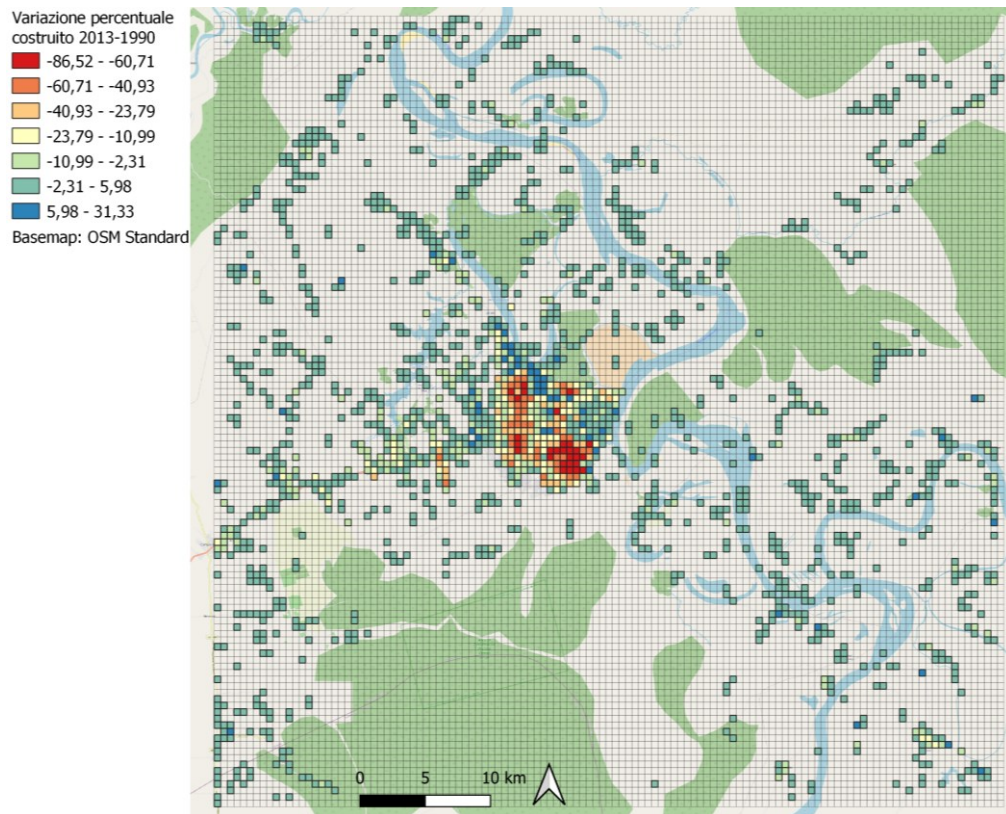


Figura supplementare 5: *Variatione percentuale di costruito tra il 2013 ed il 1990. Elaborazione propria.*

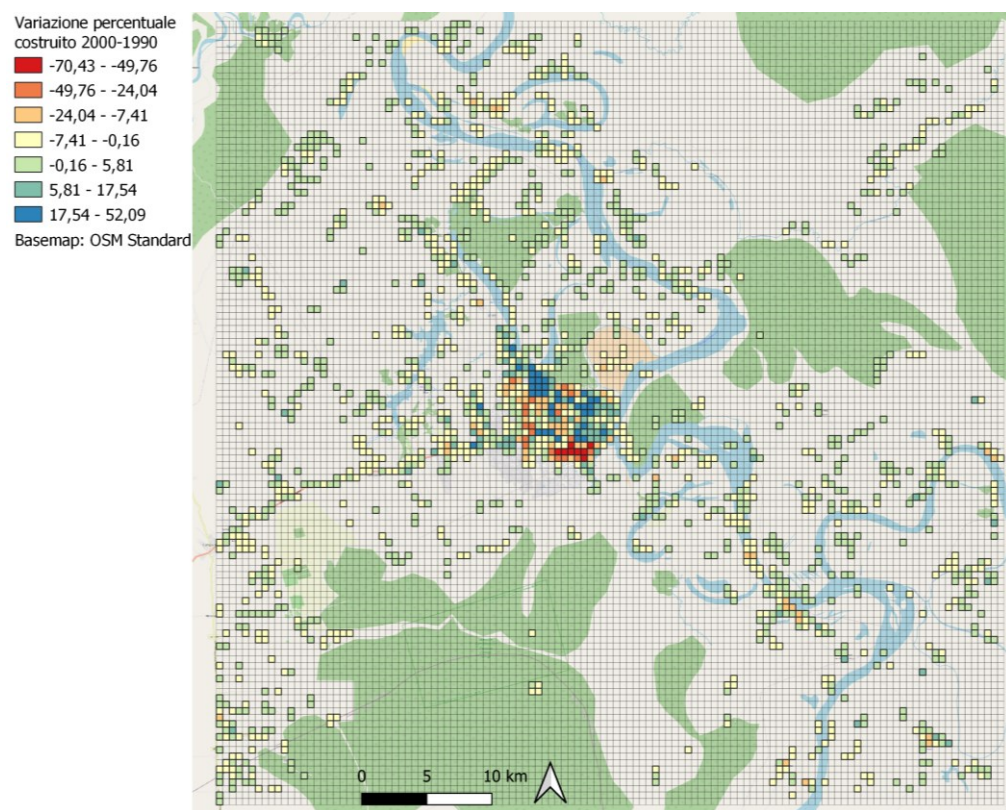


Figura supplementare 6: *Variatione percentuale di costruito tra il 2000 ed il 1990. Elaborazione propria.*

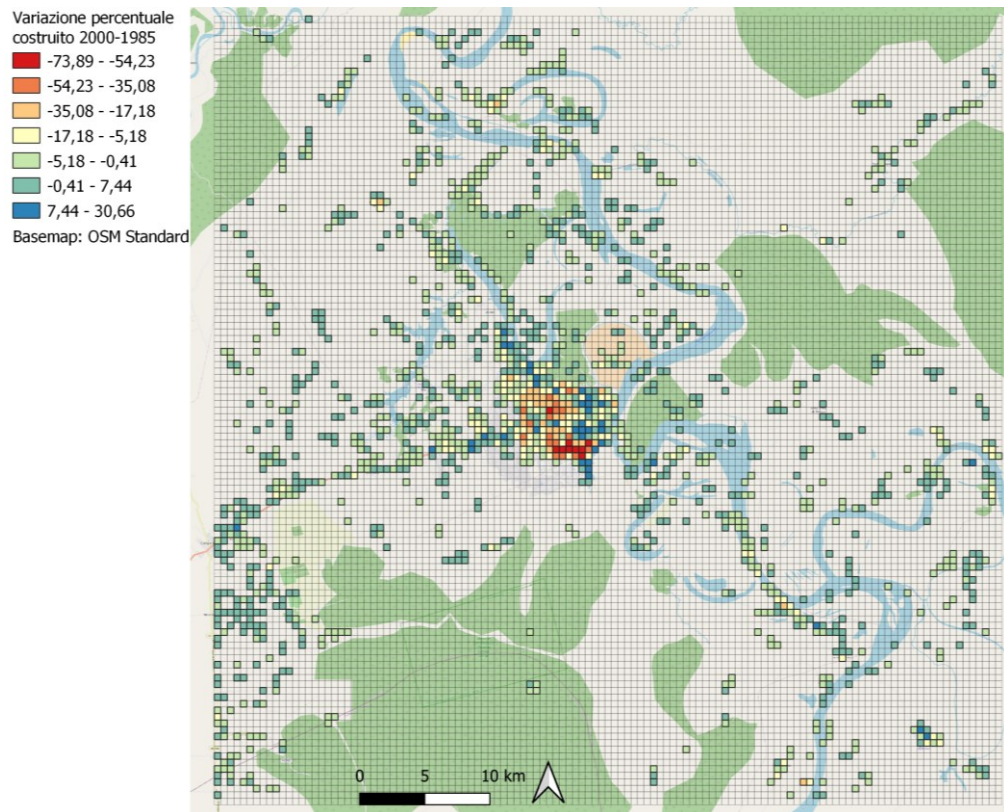


Figura supplementare 7: Variazione percentuale di costruito tra il 2000 ed il 1985. Elaborazione propria.

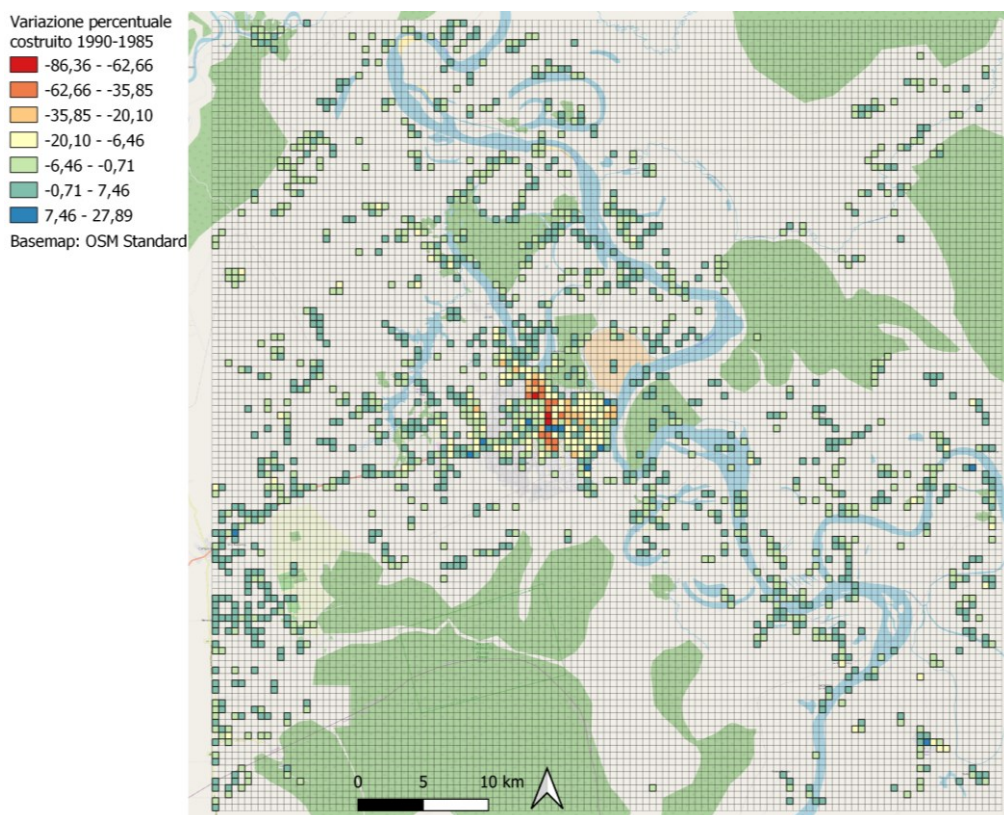


Figura supplementare 8: Variazione percentuale di costruito tra il 1990 ed il 1985. Elaborazione propria.

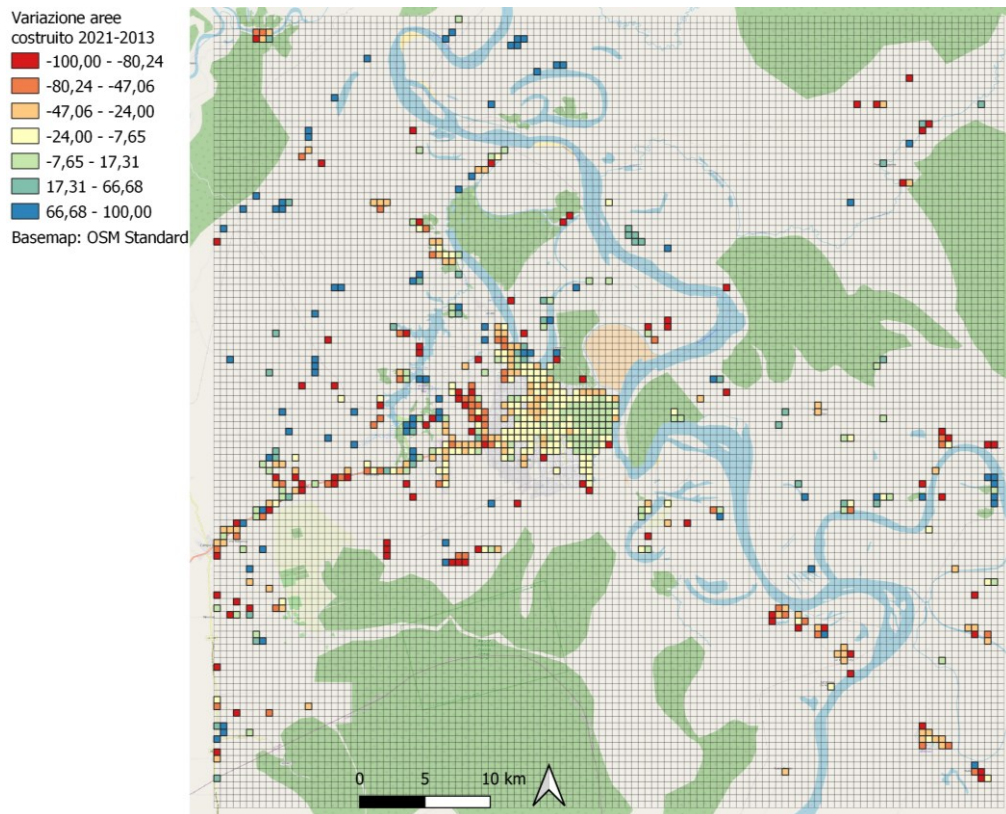


Figura supplementare 9: Variazione normalizzata di costruito tra il 2021 ed il 2013. Elaborazione propria.

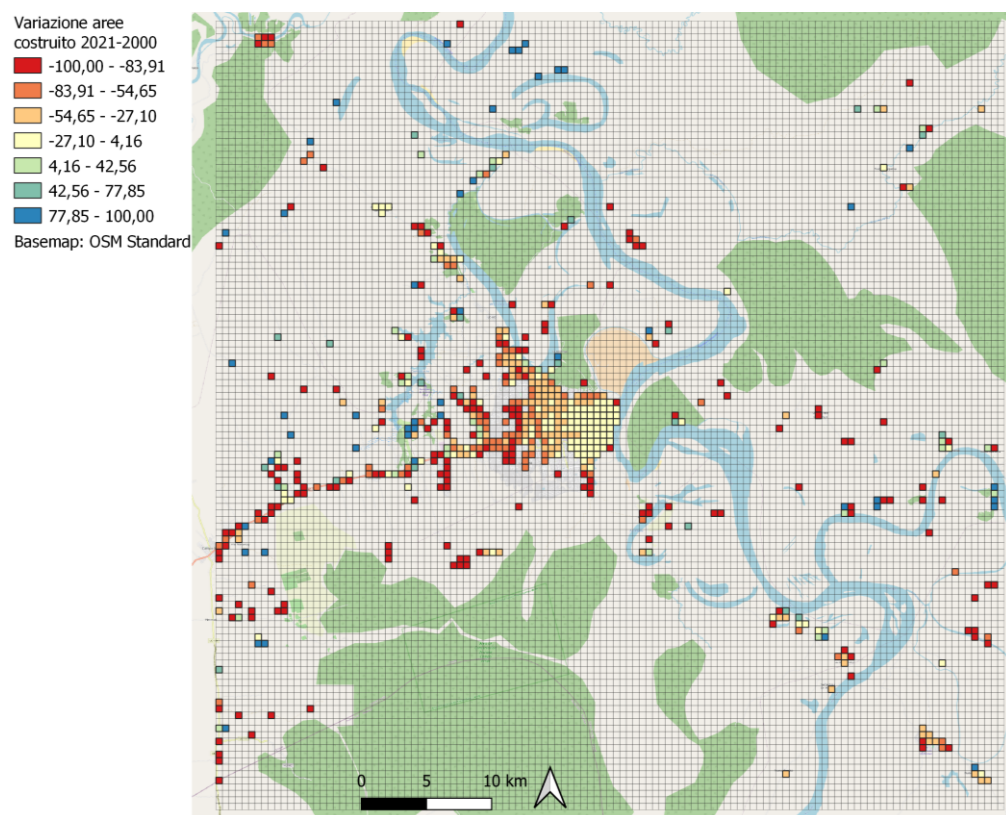


Figura supplementare 10: Variazione normalizzata di costruito tra il 2021 ed il 2000. Elaborazione propria.

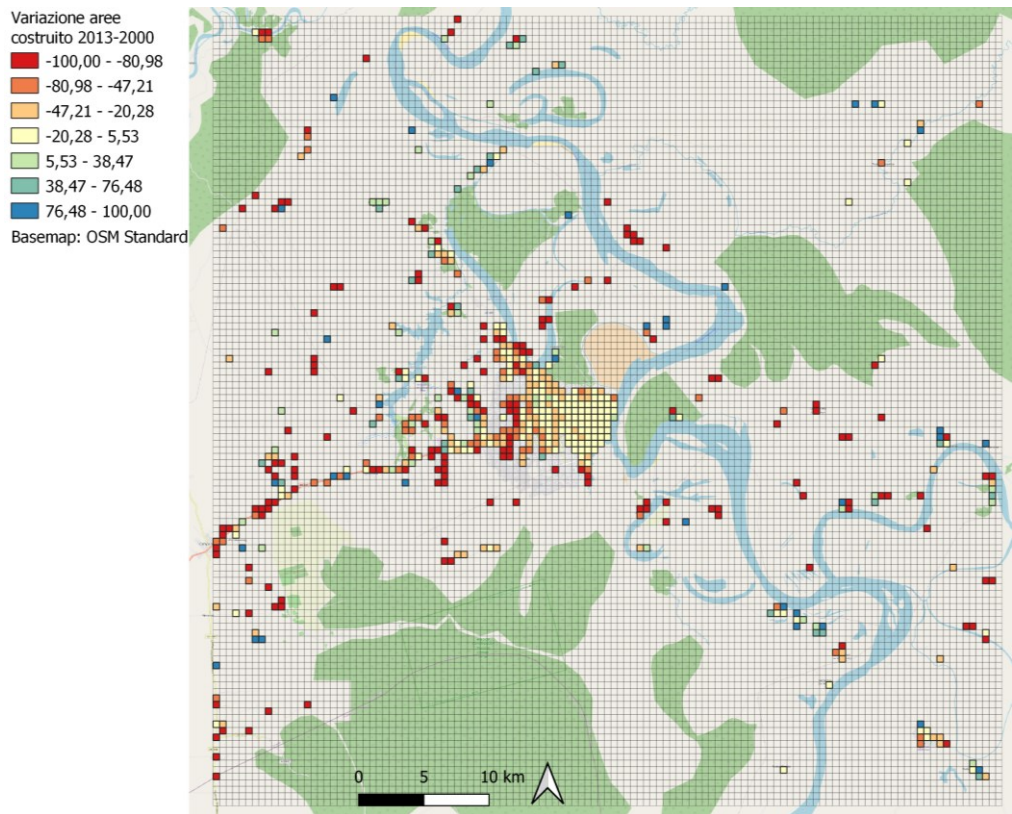


Figura supplementare 11: Variazione normalizzata di costruito tra il 2013 ed il 2000. Elaborazione propria.

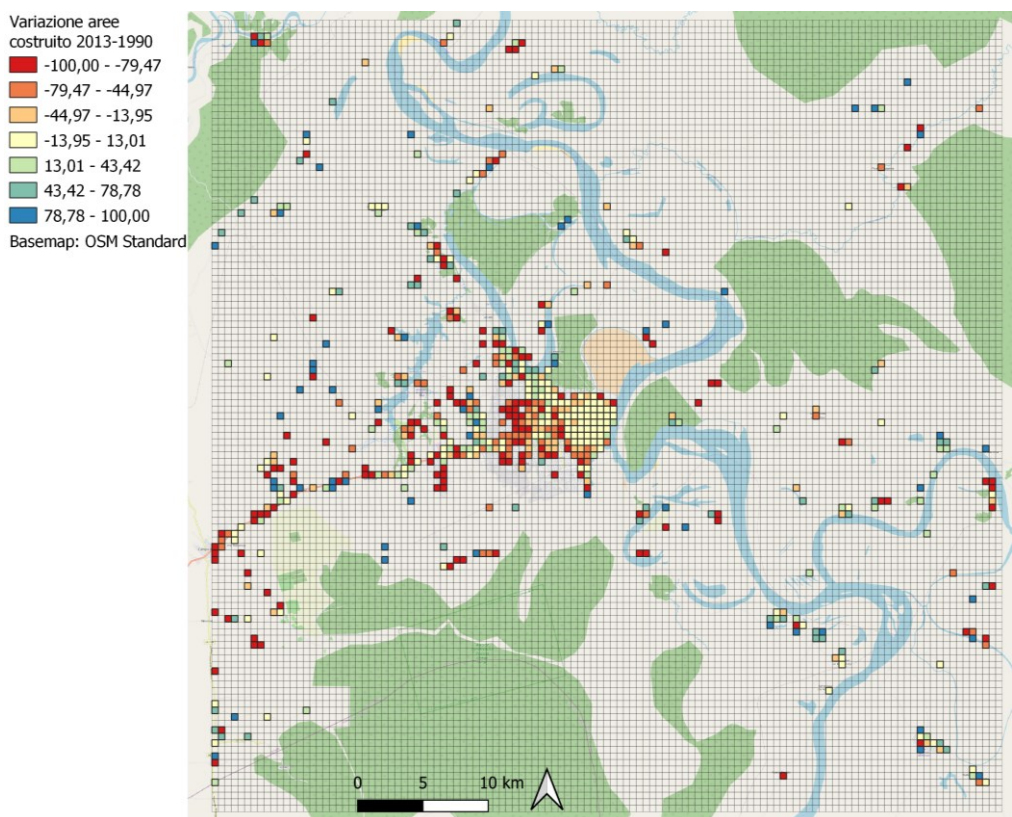


Figura supplementare 12: Variazione normalizzata di costruito tra il 2013 ed il 1990. Elaborazione propria.

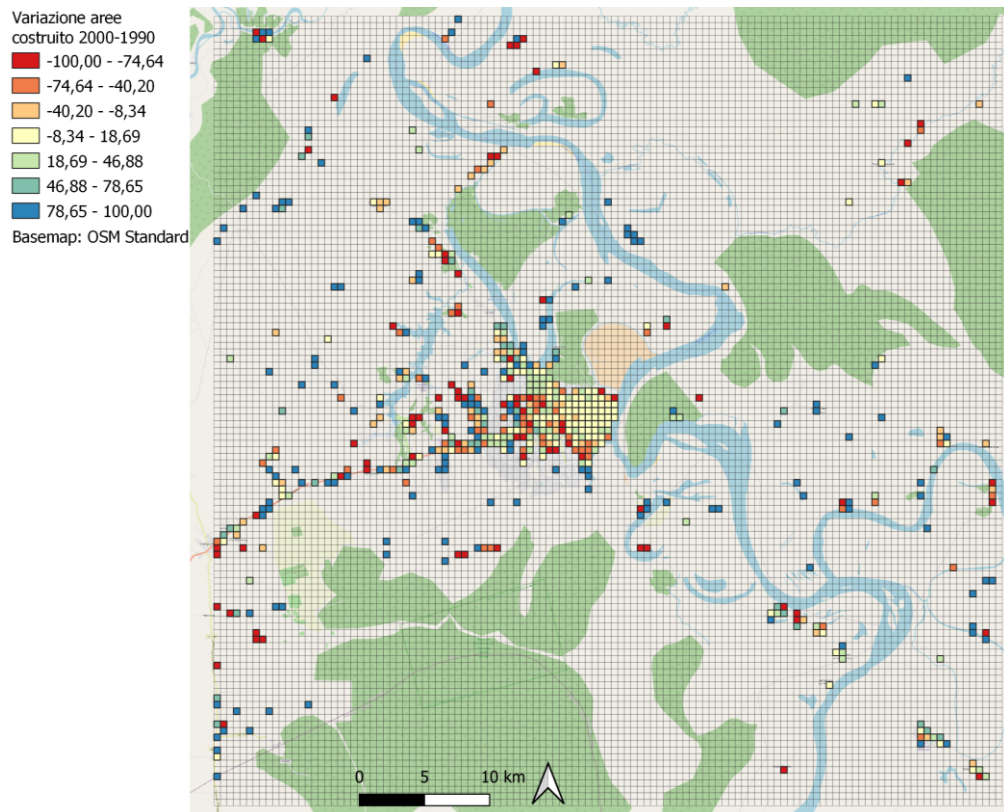


Figura supplementare 13: Variazione normalizzata di costruito tra il 2000 ed il 1990. Elaborazione propria.

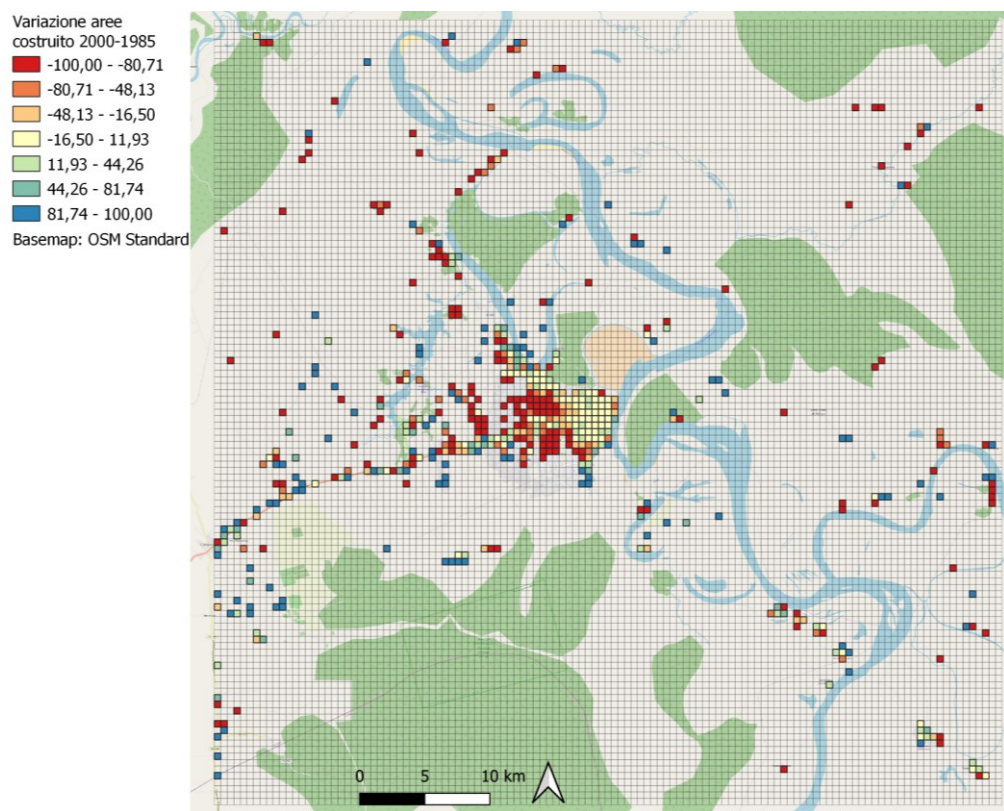


Figura supplementare 14: Variazione normalizzata di costruito tra il 2000 ed il 1985. Elaborazione propria.

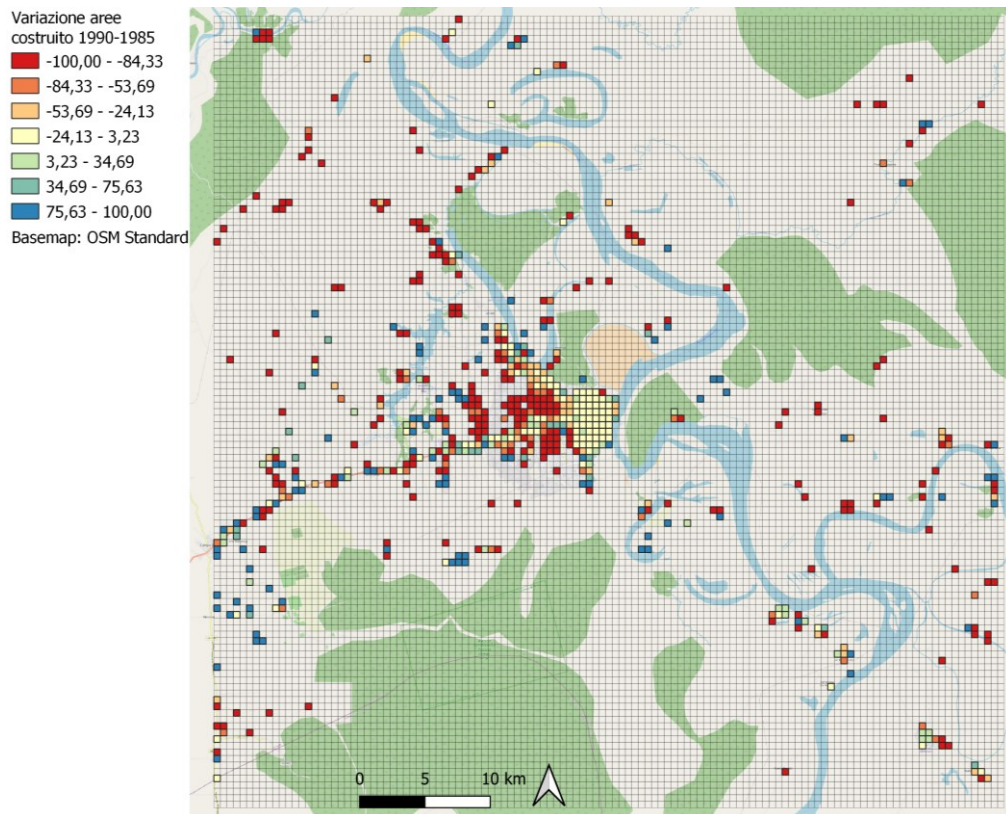


Figura supplementare 15: Variazione normalizzata di costruito tra il 1990 ed il 1985. Elaborazione propria.