



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, CHIMICA,  
AMBIENTALE E DEI MATERIALI**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN  
INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

*in*

*Gestione delle Risorse Idriche M*

***ANALISI DELL'EVOLUZIONE URBANA IN  
RELAZIONE AD EVENTI ALLUVIONALI  
NELL'ISOLA DI GIAVA IN INDONESIA***

***Relatrice:***

***Prof.ssa Serena Ceola***

***Correlatori:***

***Prof. Giuliano Di Baldassarre***

***Prof.ssa Johanna Mård***

***Dott.ssa Sara Lindersson***

***Candidata:***

***Alessia Rossini***

***Anno Accademico 2022/2023***



## Abstract

Questo studio si colloca all'interno di un contesto di crescente preoccupazione riguardante l'impatto del cambiamento climatico a livello globale, con particolare attenzione agli eventi alluvionali che rappresentano una minaccia significativa per molte regioni, tra cui l'isola di Giava, in Indonesia. L'obiettivo principale è quello di indagare le dinamiche di espansione degli insediamenti e di sviluppo della popolazione nelle aree maggiormente soggette agli eventi alluvionali attraverso l'utilizzo di dati spaziali ad alta risoluzione.

I risultati dell'analisi mostrano che l'urbanizzazione, in termini di tasso di crescita delle aree edificate, e lo sviluppo della popolazione, in termini di densità abitativa, sono particolarmente rilevanti nelle aree esposte ad eventi alluvionali. Infatti, nell'arco temporale considerato, si evidenzia una distribuzione delle aree insediate e della popolazione a favore delle zone ripetutamente allagate dagli eventi analizzati nello studio. Inoltre, si osserva che gli sviluppi in queste aree sono particolarmente rilevanti negli anni più recenti, nonostante la crescente consapevolezza delle conseguenze della crisi climatica sui rischi e sugli impatti di questi eventi estremi.

Le conclusioni dello studio suggeriscono la necessità di ulteriori ricerche, che dovrebbero essere supportate da una maggiore disponibilità di dati spaziali e non solo, al fine di comprendere appieno le complesse interazioni tra cambiamento climatico, eventi alluvionali e sviluppo urbano. In particolare, l'espansione dell'analisi ad altre regioni colpite da inondazioni e la considerazione di fattori socioeconomici potrebbero fornire una visione più completa delle sfide e delle opportunità legate alla gestione del rischio da inondazioni, nonché alla formulazione di strategie di adattamento e mitigazione del rischio più efficaci, in contesti vulnerabili come quello dell'isola di Giava, ma anche altrove.

**Parole chiave:** Cambiamento Climatico, Eventi Alluvionali, Indonesia, Urbanizzazione, Densità di popolazione, Pianificazione Urbana, Mitigazione del Rischio, Adattamento Climatico.



# Indice

<b>Abstract</b> .....	3
<b>Introduzione</b> .....	7
<b>1. Area di studio</b> .....	11
<b>1.1 Territorio e Clima</b> .....	12
<b>1.2 Popolazione, Condizioni Economiche e Sviluppo</b> .....	13
<b>1.3 Pericoli Ambientali e Inondazioni</b> .....	14
<b>2. Dati</b> .....	17
<b>2.1 Database GADM</b> .....	18
<b>2.2 Database WSF-Evolution</b> .....	20
<b>2.3 Database GHS-POP</b> .....	22
<b>2.4 Database GFD</b> .....	23
<b>2.5 Database HydroLAKES</b> .....	26
<b>3. Metodi</b> .....	27
<b>3.1 Preparazione dataset</b> .....	27
<b>3.1.1 Database GADM</b> .....	27
<b>3.1.2 Database WSF-Evolution</b> .....	28
<b>3.1.3 Database GHS-POP</b> .....	29
<b>3.1.4 Database GFD</b> .....	31
<b>3.1.5 Database HydroLAKES</b> .....	35
<b>3.2 Elaborazione dati</b> .....	36
<b>3.3 Analisi</b> .....	41
<b>3.3.1 Distribuzione degli insediamenti e della popolazione</b> .....	42
<b>3.3.2 Occupazione dell'area insediabile e sviluppo della densità di popolazione</b> .....	43
<b>4. Risultati</b> .....	45
<b>4.1 Distribuzione degli insediamenti e della popolazione</b> .....	51
<b>4.2 Occupazione area insediabile e sviluppo densità di popolazione</b> .....	61

<b>5. Discussione e sviluppi futuri.....</b>	<b>69</b>
<b>6. Conclusioni.....</b>	<b>75</b>
<b>Riferimenti.....</b>	<b>79</b>

## Introduzione

Le perdite dovute a catastrofi sono in aumento e sono sempre più evidenti le prove che il cambiamento climatico sta aumentando la probabilità di eventi naturali estremi (Schiermeier, 2018) (Philip, 2020). In generale, tali catastrofi sono eventi o serie di eventi causati da fattori naturali e/o antropici che minacciano la vita e i mezzi di sussistenza delle persone, implicando la perdita di vite umane, danni socio-economici e ambientali, nonché significativi impatti psicologici (Pramono, Roekminiati, Vitianingsih, Ferriswara, & Rian, 2023). Per questi motivi, studiare lo sviluppo nello spazio e nel tempo degli insediamenti e della popolazione è un fattore chiave al fine di definirne l'esposizione e la vulnerabilità nei confronti di eventi climatici estremi.

In particolare, gli eventi alluvionali rappresentano uno dei disastri naturali più devastanti e ricorrenti in tutto il mondo, con conseguenze socioeconomiche e ambientali significative (Deng & Xu, 20118). Infatti, molti luoghi sulla Terra sono stati colpiti da eventi alluvionali, i quali possono interrompere le comunicazioni e i trasporti, danneggiare vite umane, distruggere materiali e compromettere gravemente le infrastrutture, portando così a perdite sociali e fisiche, e implicando un impatto significativo sulla condizione economica di una nazione (Hapsari & Zenurianto, 2016).

Seppure gli eventi alluvionali siano comuni in tutto il mondo, i Paesi tropicali, per via del loro clima più caldo, sono particolarmente soggetti al loro verificarsi (Savitri, Begum, Anwar, & Wardoyo, 2022). Infatti, il Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) afferma che i climi più caldi, a causa del cambiamento climatico e dell'aumento del vapore acqueo in atmosfera, sperimentano eventi di precipitazione più intensi, che contribuiscono ad aumentare la frequenza e il rischio di eventi alluvionali (IPCC, Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis: How is Precipitation Changing?, 2007).

L'Indonesia, macroarea analizzata in questo elaborato di tesi, essendo un Paese equatoriale tropicale, nonché nazione a reddito medio con estese aree pianeggianti e formate da tante piccole isole, è estremamente vulnerabile ai rischi del cambiamento climatico e si classifica tra i primi tre Paesi a livello globale in termini di rischio di catastrofi naturali (WorldBank, 2023). L'agenzia nazionale indonesiana per i disastri ha osservato che negli ultimi 10 anni, il 98% dei disastri naturali in Indonesia sono stati idrometeorologici probabilmente esacerbati dai cambiamenti climatici (Saputra, 2023). Infatti, negli ultimi anni l'impatto degli eventi alluvionali è aumentato in relazione ai cambiamenti climatici a causa dell'innalzamento del livello del mare, di maggiori intensità e frequenza di tempeste e cicloni, dell'erosione costiera e dalla subsidenza del terreno (Safitri, Adam, & Pandin, 2020) (Theilen-Willige & Budiyanto, 2021). L'agenzia ha inoltre riferito che gli eventi alluvionali sono stati

il disastro più frequente nel Paese nel 2022, causando 188 vittime e un milione di case distrutte e sommerse (Saputra, 2023).

Ad intensificare gli effetti del cambiamento climatico, e quindi alle catastrofi legate agli eventi alluvionali, gli scienziati ritengono che l'aumento di popolazione contribuisca in maniera significativa (Hapsari & Zenurianto, 2016). Infatti, una rapida urbanizzazione comporta, oltre ad un elevato livello di esposizione, diminuzione delle aree verdi di una località, cambi di utilizzo del suolo e quindi minore capacità di assorbimento delle precipitazioni da parte del terreno. In Indonesia, ed in particolare sull'isola di Giava, località su cui si sono concentrate le analisi della tesi, la rapida urbanizzazione comporta inoltre una maggiore richiesta di acqua potabile, soddisfatta principalmente tramite pompaggio, e incremento del carico di edifici e abitazioni che i terreni devono sopportare. Entrambi questi fattori concorrono ad intensificare notevolmente i rischi associati ad eventi alluvionali sull'isola. Inoltre, la rapida crescita della popolazione e l'urbanizzazione hanno concentrato milioni di persone in aree altamente esposte ai rischi naturali, e la combinazione di tutti questi fattori rende l'Indonesia uno dei Paesi al mondo con più alti livelli di sfollamento associati ai disastri naturali (IDCM, 2023). Infatti, dopo decenni di rapida urbanizzazione, nel 2019 quasi il 56% della popolazione indonesiana viveva in aree urbane, molte delle quali presentano tutt'ora un'elevata esposizione ai rischi alluvionali e agli impatti dei cambiamenti climatici (IDCM, 2023). A tal proposito, ma a livello globale, gli studiosi Rentschler et al. hanno dimostrato che, dal 1985, gli insediamenti umani in tutto il mondo – dai villaggi alle megalopoli – si sono espansi continuamente e rapidamente fino alle zone alluvionali (Rentschler, et al., Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985, 2023). I loro risultati forniscono inoltre una prova sistematica di una divergenza nell'esposizione ai rischi dei singoli Paesi.

Partendo da questo studio e da tutte le considerazioni fatte, la presente tesi si propone di esplorare le relazioni tra eventi alluvionali, cambiamento climatico e sviluppo della popolazione e degli insediamenti in Indonesia, ed in particolare sull'isola di Giava e su una delle sue città principali, Surabaya. In particolare, sono state indagate le logiche di sviluppo della popolazione e di espansione delle aree insediate in relazione ad eventi alluvionali avvenuti sull'isola, offrendo così un contesto ricco di sfide e opportunità per comprendere le dinamiche socioeconomiche legate ai rischi naturali.

Prima di introdurre la struttura dell'elaborato di tesi presentata, è lecito specificare che l'analisi e la gestione del rischio da eventi alluvionali richiedono dati accurati e aggiornati sulle condizioni del territorio e della popolazione coinvolta. In questo contesto, l'utilizzo di dati satellitari ad alta risoluzione, quali mappe delle dinamiche urbane globali dal 1985 al 2015 con risoluzione di 30 metri



provenienti da dati satellitari Landsat, è risultato cruciale, ed è un aspetto da considerare per eventuali approfondimenti dello studio.

Nel presente elaborato di tesi, dapprima si introduce l'area di studio, le sue caratteristiche e le problematiche ambientali che riscontra, per poi descrivere ed analizzare la natura e lo scopo dei database utilizzati nello studio. A seguire, nel capitolo dei metodi, si sono raccolte tutte le informazioni relative all'elaborazione dei dati e alla metodologia applicata che ha portato ai risultati presentati e discussi nel capitolo dedicato. Infine, prima delle conclusioni finali, si è voluto presentare un capitolo di discussione, il quale racchiude la descrizione dei limiti dell'analisi e considerazioni varie a supporto di un suo possibile sviluppo futuro.

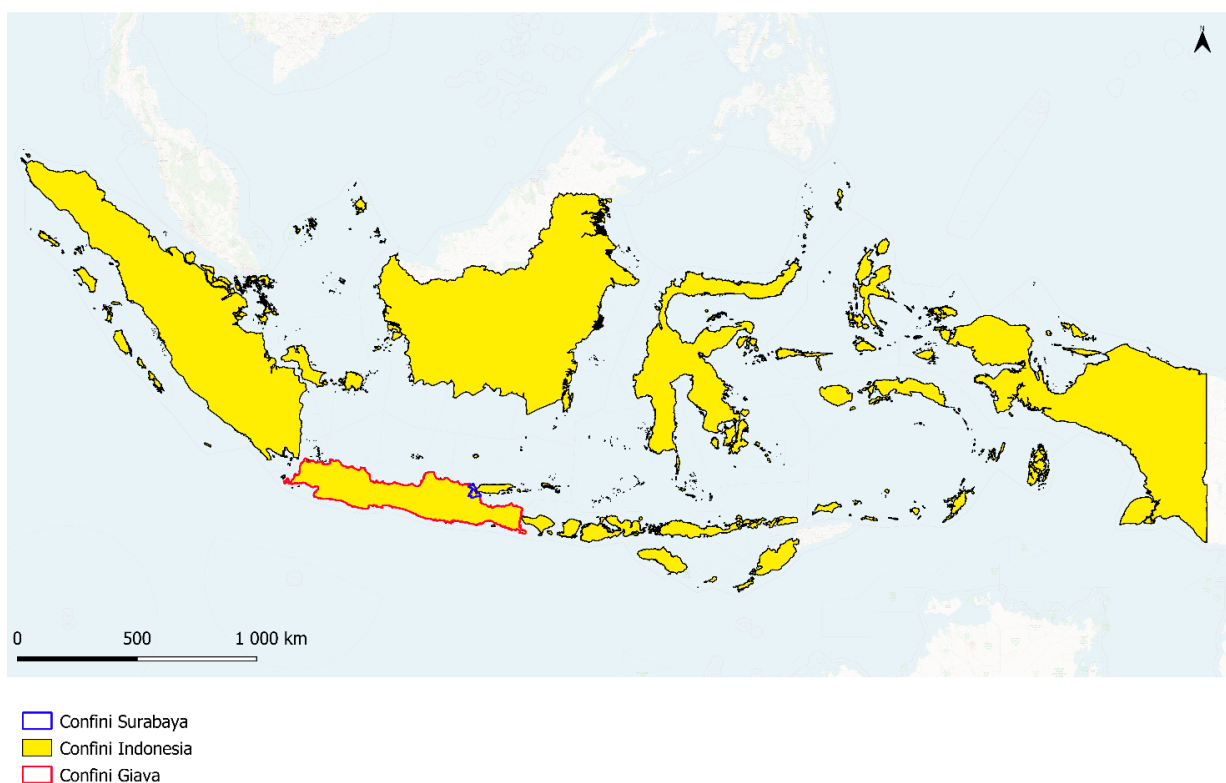
In conclusione, nel corso della presente tesi, verranno esaminate le seguenti tematiche:

- Obiettivi e metodologia dello studio: Saranno delineati gli obiettivi principali della ricerca e la metodologia utilizzata per raggiungerli. Ciò includerà l'analisi dei dati satellitari, l'elaborazione delle informazioni geospaziali e l'indagine sulle dinamiche di sviluppo della popolazione.
- Eventi alluvionali: Si analizzeranno gli eventi alluvionali avvenuti sull'isola di Giava (GFD, 2022), esaminando la loro frequenza, intensità in termini di superficie colpita e impatto sulla popolazione e sull'ambiente circostante. Questo permetterà di comprendere meglio la natura dei rischi alluvionali nella regione.
- Espansione degli insediamenti e sviluppo della popolazione: Si analizzeranno le dinamiche di crescita del numero di abitanti sull'isola di Giava e delle aree urbanizzate dal 1985 al 2015, al fine di comprendere se alcune aree indonesiane sono favorite dai suoi abitanti rispetto ad altre.
- Cambiamento climatico: Sarà esplorato il legame tra il cambiamento climatico e gli eventi alluvionali, considerando le implicazioni per la gestione del rischio. Il contesto globale di crisi climatica fornirà il quadro necessario per comprendere le sfide aggiuntive che l'Indonesia e altre regioni simili affrontano in termini di inondazioni.
- Rilevanza e impatto della ricerca: Si evidenzierà l'importanza della ricerca nel contesto della gestione del rischio da eventi alluvionali e nell'ambito degli studi sul cambiamento climatico. I risultati ottenuti mirano a sensibilizzare l'attenzione nei confronti del rischio da allagamento, al fine di identificare le zone più vulnerabili e poter intraprendere strategie di mitigazione mirate ed efficaci in esse.

Attraverso un'analisi approfondita di questi aspetti, la tesi mira a fornire una comprensione più completa delle dinamiche di sviluppo della popolazione in contesti di rischio da eventi alluvionali, contribuendo così agli sforzi per affrontare le sfide legate ai cambiamenti climatici e ai disastri naturali.

# 1. Area di studio

Avendo introdotto l'obiettivo della presente tesi, in questo capitolo si presentano l'area e le sotto-aree di studio, riportate nella mappa in Figura 1, al fine di identificare e comprendere i motivi che hanno portato a sceglierle come tali. In particolare, dopo aver inquadrato l'area geografica di studio, saranno riportate considerazioni riguardanti la popolazione indonesiana, le sue condizioni economiche e di sviluppo, e le criticità ambientali legate ai fenomeni di inondazione dell'area. Tali fattori, assieme all'identificazione della disponibilità dei dati, hanno suscitato il desiderio di indagare l'espansione degli insediamenti e lo sviluppo della popolazione in un'area frequentemente colpita da eventi alluvionali di diversa entità, ovvero l'isola di Giava in Indonesia ed una delle sue principali città, Surabaya.



*Figura 1: Mappa raffigurante l'area e le sottoaree di studio.*

L'Indonesia, conosciuta ufficialmente come Repubblica di Indonesia, è un vasto arcipelago situato nel sudest asiatico, all'equatore tra 11°S e 6°N e 95°E e 141°E (BPS, Statistical Year Book of Indonesia, 2020). È il quarto paese più popolato al mondo, con oltre 250 milioni di abitanti (GHSL, 2023) ed è il più grande stato insulare al mondo, composto da oltre 17'000 isole, circa 2'400 delle quali abitate (International Monetary Fund, 2022), con una superficie di circa 1.9 milioni di chilometri quadrati.

La nazione confina con Papua Nuova Guinea, Timor Est e la Malaysia ed è bagnata dai mari dell'Oceano Indiano e del Pacifico. Le numerose isole sono disseminate su entrambi i lati dell'equatore, e le cinque maggiori sono Giava, Sumatra, Kalimantan, Nuova Guinea e Sulawesi.

L'isola di Giava è la più popolata e densamente urbanizzata dell'Indonesia, ha superficie di circa 130'000 chilometri quadrati (WSFEvolution, 2015), ospita più di 140 milioni di persone (dato aggiornato al 2015, (GHSL, 2023)) ed è situata tra il Mar di Giava a ovest e l'Oceano Indiano a sud. Questa isola è il cuore politico ed economico del paese, ed è caratterizzata da una topografia variegata, che va dalle valli fluviali alle catene montuose vulcaniche. L'isola ha forma rettangolare allungata sviluppandosi per circa 1'000 chilometri in direzione est-ovest e avendo larghezza variabile tra 55 e 200 chilometri.

A nord-ovest di Giava si trova Giacarta, capitale indonesiana ed una delle città più popolate del Pianeta, mentre ad est si trova Surabaya, la seconda città più grande dell'Indonesia, ed entrambe queste aree sono frequentemente colpite da inondazioni (Savitri, Begum, Anwar, & Wardoyo, 2022).

## **1.1 Territorio e Clima**

L'Indonesia è posizionata sul bordo di importanti faglie tettoniche, quali la placca pacifica, eurasiatica e australiana, che rendono la regione altamente soggetta a fenomeni quali vulcanesimo e terremoti. Le isole che la compongono sono di origine vulcanica, si trovano nella Cintura di Fuoco del Pacifico, e presentano oltre un centinaio di vulcani attivi. Per questi motivi, il territorio indonesiano è prevalentemente montuoso, ed ognuna delle isole maggiori presenta una o più catene montuose, ma anche zone collinari e pianeggianti.

Negli anni '50 il paesaggio dell'Indonesia era in gran parte ricoperto da foresta pluviale tropicale, la quale ricopriva circa il 70% della superficie. Tuttavia, l'area della copertura forestale naturale è diminuita anno dopo anno ed attualmente le foreste ricoprono solo circa il 50% della superficie totale. Tale diminuzione è stata determinata in parte da distribuzione incendiaria ed in parte ad una attiva deforestazione su larga scala portata avanti dall'espansione delle aree urbane e agricole (Hapsari & Zenurianto, 2016). Tuttavia, nonostante la deforestazione e il fatto che l'Indonesia sia al quarto posto mondiale per popolazione, essa è la regione più boscosa del pianeta dopo l'Amazzonia (WFB, 2024).

L'Indonesia si trova a cavallo dell'Equatore, fatto che ha permesso la nascita di una rete idrografica molto sviluppata, con i corsi d'acqua che hanno anche funzione di vie di comunicazione fondamentali nelle zone più remote e selvagge, benché per la complessa morfologia e frammentazione insulare lo sviluppo dei singoli corsi d'acqua sia relativamente limitato. I fiumi più importanti si trovano sulle

isole maggiori, e a Giava un importante corso d'acqua è il Solo, che scorre con prevalente direzione ovest-est tra i rilievi centrali e la costa settentrionale dell'isola. Tuttavia, i fiumi hanno portate piuttosto irregolari e nella stagione delle piogge straripano frequentemente, allagando con violenza le pianure nelle quali terminano il loro corso, rendendo così difficile il drenaggio di vaste aree (GlobalGeografia, 2024).

Situata lungo l'equatore, l'Indonesia ha un clima tropicale con due distinte stagioni monsoniche, una umida, che porta le piogge in Indonesia generalmente da novembre ad aprile, e una secca nei restanti mesi dell'anno (Savitri, Begum, Anwar, & Wardoyo, 2022). L'umidità media in Indonesia è elevata, circa dell'80%, e le temperature variano poco durante l'anno, solitamente dai 26 °C ai 30°C (Hapsari & Zenurianto, 2016). Le principali caratteristiche climatiche dell'Indonesia contribuiscono alla sua vulnerabilità al disastro idrologico/climatologico.

Le precipitazioni medie annuali sono piuttosto elevate, in quanto raggiungono 2'000-3'500 millimetri in pianura e fino 6'000 millimetri nella zona montuosa e sono particolarmente accentuate nel mese di febbraio. Le zone più piovose sono le aree montane di Sumatra, e Giava Occidentale. La maggior parte delle precipitazioni medie si trasforma in deflusso superficiale, mentre una quota minore si infiltra e percola nel terreno.

Sull'isola di Giava le precipitazioni annuali variano da circa 1'500 millimetri nelle zone costiere a oltre 3'000 millimetri nelle aree montuose, ma la distribuzione delle piogge può variare significativamente da una regione all'altra a causa della complessa geografia dell'isola.

## **1.2 Popolazione, Condizioni Economiche e Sviluppo**

La popolazione in Indonesia, come si vedrà successivamente, è perlopiù concentrata nelle aree urbane dell'isola di Giava, dove si concentra la maggior parte delle attività economiche e sociali del paese, nonostante l'isola rappresenti una piccola percentuale del territorio statale. Infatti, nel 2020, la densità di popolazione di Giava era maggiore di 1'000 abitanti per chilometro quadrato (BPS, Results of Long Form Population Census , 2020), mentre la densità di popolazione dell'intera Indonesia si aggirava attorno ai 130 abitanti per chilometro quadrato. Il valore di densità abitativa a Giava la rende uno dei posti più densamente popolati del pianeta, e infatti la capitale Giacarta e la città Surabaya sono due tra le città con maggiore densità abitativa sulla Terra.

L'economia indonesiana è diversificata, con settori chiave che includono l'agricoltura, l'industria manifatturiera, il turismo e l'estrazione mineraria. Infatti, l'Indonesia è considerata uno degli Stati potenzialmente più ricchi del mondo grazie alla vastità delle risorse minerarie, specie di quelle

energetiche, alla fertilità dei suoli, al relevantissimo patrimonio forestale, all'ampia disponibilità di una popolazione attiva e intraprendente (TheWorldBank, 2022).

Negli ultimi decenni, a seguito del superamento della crisi finanziaria asiatica della fine degli anni '90, il paese ha registrato una crescita economica significativa, trainata dalla rapida urbanizzazione e dall'espansione dell'industria, che ha portato il paese ad essere considerato come la più grande economia del Sud-Est asiatico (TheWorldBank, 2022).

Tuttavia, persistono disuguaglianze socioeconomiche significative tra le diverse regioni e comunità del paese. Infatti, gran parte della popolazione vive in condizioni di povertà, e nonostante l'Indonesia abbia compiuto progressi significativi nel miglioramento delle condizioni di vita della sua popolazione, attraverso miglioramenti nell'istruzione, nella sanità e nell'accesso ai servizi di base, sfide come la povertà, mal gestione dei rifiuti urbani e dei liquami, e la vulnerabilità agli eventi naturali rimangono ancora presenti, specialmente nelle aree rurali e remote (UNDRR, 2019)

### **1.3 Pericoli Ambientali e Inondazioni**

L'Indonesia soffre di diverse problematiche ambientali, e per via della sua posizione geografica e delle sue caratteristiche territoriali è spesso colpita da eventi quali inondazioni, gravi siccità, tsunami, terremoti, incendi boschivi e fenomeni di vulcanismo (l'Indonesia contiene il maggior numero di vulcani di qualsiasi paese al mondo, circa 70 sono attivi ed una significativa attività vulcanica si verifica sull'isola di Giava) (WFB, 2024). Altri problemi che si riscontrano in Indonesia sono la deforestazione su larga scala (in gran parte illegale) e diffuso smog associato ai relativi incendi, uno sfruttamento eccessivo delle risorse marine, alcuni problemi ambientali associati alla rapida urbanizzazione e allo sviluppo economico, tra cui l'inquinamento atmosferico e la congestione del traffico, ed anche una scarsa gestione dei rifiuti e inefficienti servizi idrici e sistemi di depurazione e raccolta delle acque reflue, che portano all'inquinamento dell'acqua potabile da rifiuti industriali (WFB, 2024). Tuttavia, uno dei principali problemi è quello analizzato nel presente studio, ovvero le frequenti inondazioni che si verificano sul territorio ed in particolare sull'isola di Giava ed anche nella città di Surabaya (Pramono, Roekminiati, Vitianingsih, Ferriswara, & Rian, 2023).

Le inondazioni sono state riconosciute come uno dei peggiori disastri naturali (Few & Matthies, 2006), uno dei più frequenti e costosi al mondo che stanno mostrando maggiori intensità e frequenza negli ultimi anni a causa del cambiamento climatico e dai sempre più numerosi interventi antropici sul territorio naturale (Nurwatik, Cahyono, & Rachmandafitri, 2021). Centinaia di milioni di persone in tutto il mondo sono state colpite dalle inondazioni, le quali portano a perdite sociali e fisiche e possono avere un impatto significativo sulla condizione economica di una nazione (Hapsari &

Zenurianto, 2016), motivi per cui è di estrema importanza implementare strategie di protezione e mitigazione da esse e possibilmente riorganizzare la distribuzione degli insediamenti di un'area frequentemente colpita.

L'Indonesia è soggetta a frequenti eventi di inondazione (Sanyal & Lu, 2006), specialmente durante la stagione delle piogge intensificate dal monzone. Le precipitazioni abbondanti e la topografia caratterizzata da pianure alluvionali e pendii ripidi possono provocare inondazioni improvvise e catastrofiche, causando danni estesi alle comunità e all'infrastruttura (UNDRR, 2019).

Il pericolo di alluvioni è definito come il livello di gravità delle inondazioni indicato da tre indicatori: area di inondazione, profondità di inondazione e durata dell'inondazione (Savitri, Begum, Anwar, & Wardoyo, 2022), ma in questo studio è stato necessario focalizzarsi solamente sulle aree frequentemente allagate e quindi caratterizzate da rilevante probabilità di allagamento; quindi, l'unica variabile considerata è stata la superficie di inondazione. Relativamente all'isola di Giava e all'area di Surabaya, il problema delle inondazioni è innescato da diversi fattori, come forti piogge, cambiamenti nell'uso del territorio, limitata capacità dei canali, sedimentazione, drenaggio e strutture (Savitri, Begum, Anwar, & Wardoyo, 2022) e le altezze di inondazione sono variabili da 10-70 cm, con di circa 6 ore (Briguglio, 2013).





## 2. Dati

La ricerca condotta nel contesto della presente tesi magistrale ha coinvolto l'utilizzo di diversi dataset a copertura globale e gratuitamente accessibili. In particolare, sono stati utilizzati dati spaziali, una tipologia di informazioni che include sia dati vettoriali che dati raster. I dati spaziali rappresentano informazioni geografiche che possono essere analizzate e visualizzate in relazione alla loro posizione sulla Terra e le cui caratteristiche principali sono espresse in termini di proprietà geometriche, attributi e topologia. L'elaborazione e l'utilizzo di questa tipologia di dati sono resi possibili attraverso i Sistemi Informativi Geografici (GIS), come il software open-source QGIS (<https://www.qgis.org/it/site/>), ampiamente utilizzato nello svolgimento del presente studio. La rappresentazione e la gestione dei dati spaziali su questo software possono avvenire attraverso due principali formati: dati raster e dati vettoriali.

I dati raster, caratterizzati dall'estensione “.tiff” (*Tagged Image File Format*), sono costituiti da una griglia di celle, o pixel, ciascuna contenente un valore che rappresenta una caratteristica specifica nella mappa, e consentono un'analisi dettagliata e continua del territorio. I dati vettoriali sono caratterizzati dal formato shapefile, il quale è costituito da un insieme di file a diversa estensione che permette il collegamento tra le informazioni delle coordinate, degli attributi, dell'indice spaziale e dell'informazione di georeferenziazione per ogni dato. Questa tipologia di dati utilizza punti, linee e poligoni per rappresentare oggetti geografici, e consentono una rappresentazione più precisa delle forme e delle relazioni spaziali. L'integrazione di entrambe le tipologie di dati, eseguita mediante l'utilizzo di software specializzati come QGIS, fornisce un quadro completo e approfondito dei dati spaziali esaminati nel corso della ricerca. Inoltre, l'elaborazione dei dati attraverso il software QGIS ha permesso di proseguire lo studio dell'area di interesse utilizzando il software Excel (<https://www.microsoft.com/it-it/microsoft-365/excel>). Attraverso questo ultimo si è condotta un'analisi numerica dei dati in formato tabellare, la quale ha portato all'ottenimento dei risultati del lavoro di tesi in formato grafico. L'integrazione di QGIS ed Excel ha fornito un approccio completo per l'analisi dei dati spaziali, contribuendo in modo significativo alla comprensione e all'interpretazione dei risultati ottenuti.

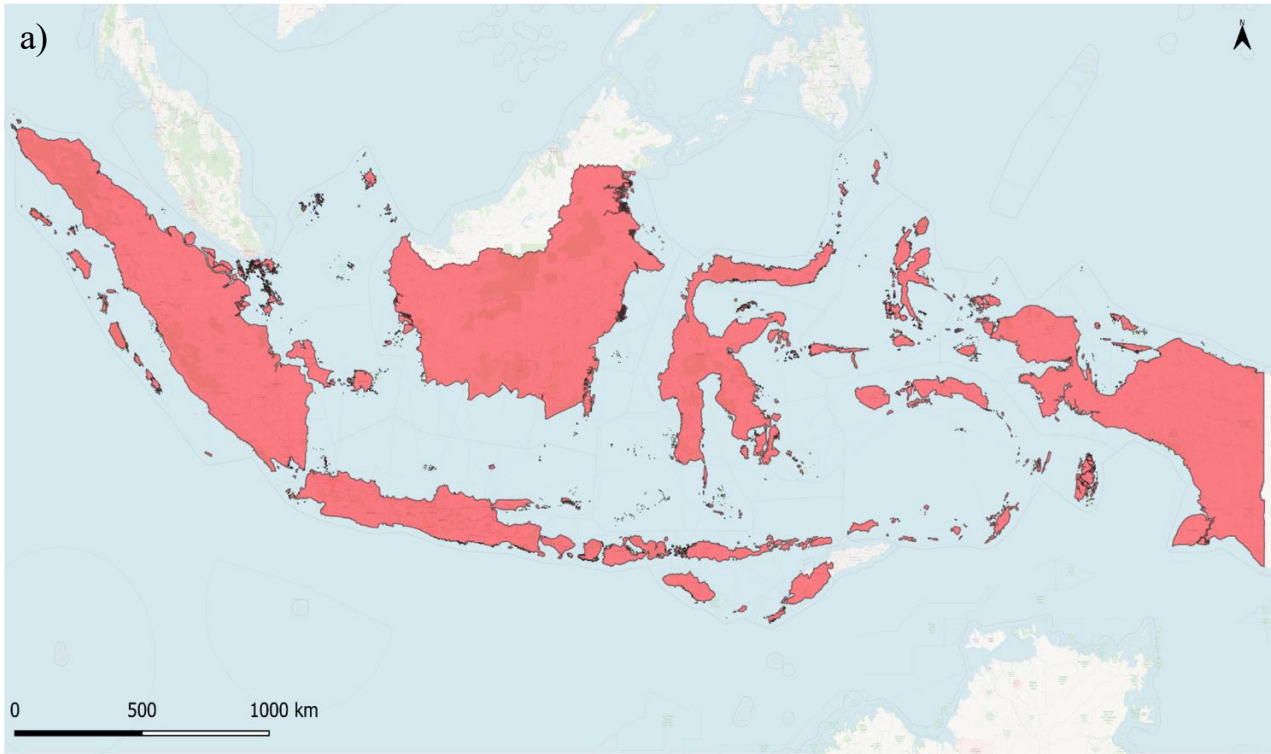
Al fine di studiare ed analizzare la tendenza di sviluppo delle aree urbanizzate e della popolazione nell'area indonesiana di interesse, in relazione alle zone più e meno frequentemente soggette ad eventi di inondazione, si sono utilizzati diversi dati input. In particolare, i dataset nel seguito descritti sono stati necessari ai fini di delimitare l'area di studio, analizzare i passati eventi di inondazione in essa avvenuti e studiare l'evoluzione spaziale degli insediamenti e della popolazione.

## 2.1 Database GADM

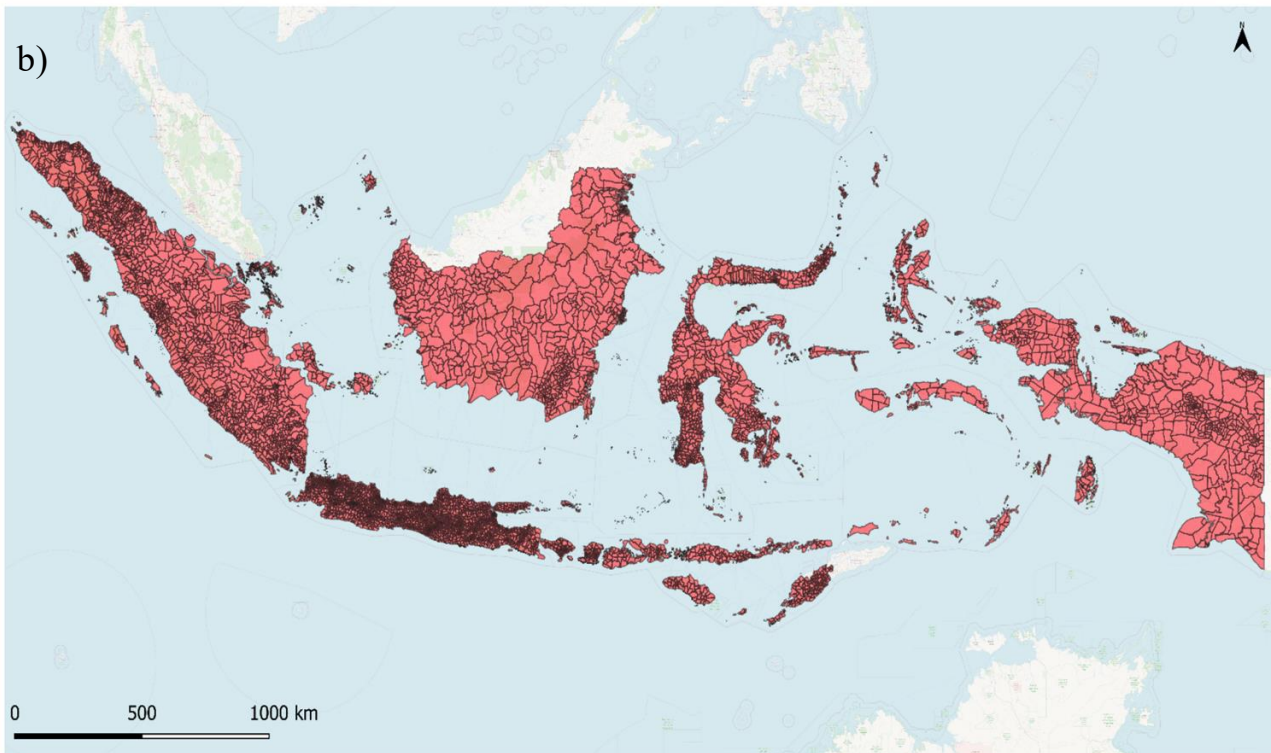
Il database GADM (GADM, 2022), acronimo di “*Database of Global Administrative Areas*”, costituisce una preziosa risorsa per le analisi spaziali delle divisioni amministrative globali. Esso fornisce informazioni dettagliate sulle aree amministrative di tutto il mondo, consentendo un’approfondita comprensione della struttura organizzativa dei paesi. I dati, liberamente disponibili per uso accademico ed altri usi non commerciali, sono organizzati gerarchicamente in diversi livelli e riflettono la suddivisione amministrativa dei territori. Ad esempio, i livelli inferiori possono rappresentare suddivisioni come comuni o contee, mentre i livelli superiori possono indicare divisioni regionali o nazionali.

Il tipo di dati fornito dal dataset GADM è principalmente vettoriale, il che significa che le informazioni geografiche sono rappresentate attraverso punti, linee e poligoni. Questo formato consente una precisa mappatura delle aree amministrative e facilita l’analisi delle relazioni spaziali. La tabella degli attributi dei dati contiene una vasta gamma di informazioni, tra cui nomi delle aree amministrative, codici di identificazione univoci, informazioni sulla popolazione, e altre caratteristiche specifiche. Queste informazioni sono essenziali per eseguire analisi quantitative e qualitative sulle aree amministrative, e consentono una comprensione approfondita delle dinamiche territoriali. L’utilizzo di dati GADM è particolarmente significativo per progetti che richiedono la considerazione delle divisioni amministrative nei contesti nazionali e globali.

Durante lo svolgimento del presente lavoro di tesi è stata utilizzata la versione 4.1 del database descritto, la quale delimita 400’276 aree amministrative, al fine di isolare l’area e le sotto-aree di interesse per lo studio. In particolare, nei capitoli seguenti verrà descritto come sono stati elaborati i livelli 0 e 3 del database per il Paese di interesse, visualizzabili nella Figura 2a e 2b rispettivamente, grazie ai quali è stata possibile la successiva selezione delle informazioni utili di urbanizzazione delle aree e di estensione degli eventi di inondazione dai dataset descritti nei paragrafi a seguire.



Indonesia



Indonesia

Figura 2: Visualizzazione dei livelli GADM 0 (a) e 3 (b) relativi all'Indonesia (GADM, 2022).

## 2.2 Database WSF-Evolution

Il database WSF-Evo, acronimo di “*World Settlement Footprint-Evolution*” (WSFEvolution, 2015), si è rilevato fondamentale per la realizzazione della presente tesi, finalizzata allo studio dell’evoluzione dell’espansione spaziale delle aree costruite ed urbanizzate. Questo dataset consente, in particolare, lo studio e il monitoraggio dell’esposizione ai rischi naturali ed alle inondazioni dei nuovi sviluppi urbani, sia nelle città che nei piccoli insediamenti rurali.

Tali dati sono reperibili liberamente sul portale EOC-Geoservice del Centro di Osservazione della Terra (*Earth Observation Center* (EOCGeoservice, 2021)) dell’Agenzia Spaziale Tedesca (Deutsches Zentrum für Luft, (DLR, 2021)), centro specializzato nella raccolta e nell’analisi di dati satellitari.

Il servizio EOC si presenta come una piattaforma di riferimento per l’accesso a dati geospaziali avanzati e facilita la fruizione di informazioni cruciali per una vasta gamma di ricerche ed analisi. Esso offre servizi di indagine, visualizzazione e download diretto diversi dataset geospaziali dell’Archivio Dati Satellitari Tedesco (D-SDA), tra cui il World Settlement Footprint Evolution.

Il dataset WSF-Evo è un set di dati con risoluzione di 30 metri che delinea l’estensione degli insediamenti globali su base annuale dal 1985 al 2015 ed è stato generato ipotizzando una crescita progressiva degli insediamenti umani a livello globale nel tempo ed utilizzando immagini archiviate Landsat L5 e L7 per estratte statistiche temporali chiave per differenti indici spettrali, tra cui l’indice di differenza normalizzata di costruito (NDBI), l’indice di differenza normalizzata della vegetazione (NDVI) e l’indice di differenza normalizzata modificata dell’acqua (MNDWI). Partendo quindi a ritroso dall’anno 2015, per il quale è stato utilizzato come riferimento il WSF2015 (Marconcini, Esch, & Gorelick, 2021), sono stati estratti iterativamente i campioni di formazione di insediamento e non insediamento per un dato anno target  $t$  applicando il filtraggio morfologico alla maschera di insediamento derivata per l’anno  $t+1$  (WSFEvolution, 2015).

Dunque, questo dataset fornisce una visione dettagliata e temporale dell’evoluzione degli insediamenti, in quanto delinea l’estensione delle aree edificate globali dal 1985 al 2015 con una risoluzione di circa 30 x 30 metri. In particolare, il dataset WSF-Evo classifica ogni pixel su base annuale come “insediato”, assegnando un valore da 1985 a 2015 corrispondente all’anno stimato di rilevamento degli insediamenti nell’area coperta. Viceversa, lo classifica come “non insediato”, assegnando valore 0.

I dati WSF-Evo sono organizzati e scaricabili in 5138 file GeoTIFF (proiezione EPSG4326), ciascuno riferito ad una porzione del terreno di dimensioni 2 x 2 gradi (equivalenti a circa 222 x 222 km) (WSFEvolution, 2015). Nella Figura 3 è riportato un esempio di visualizzazione di questi dati e della griglia di download, relativi all'area indonesiana di interesse per il presente studio di tesi.

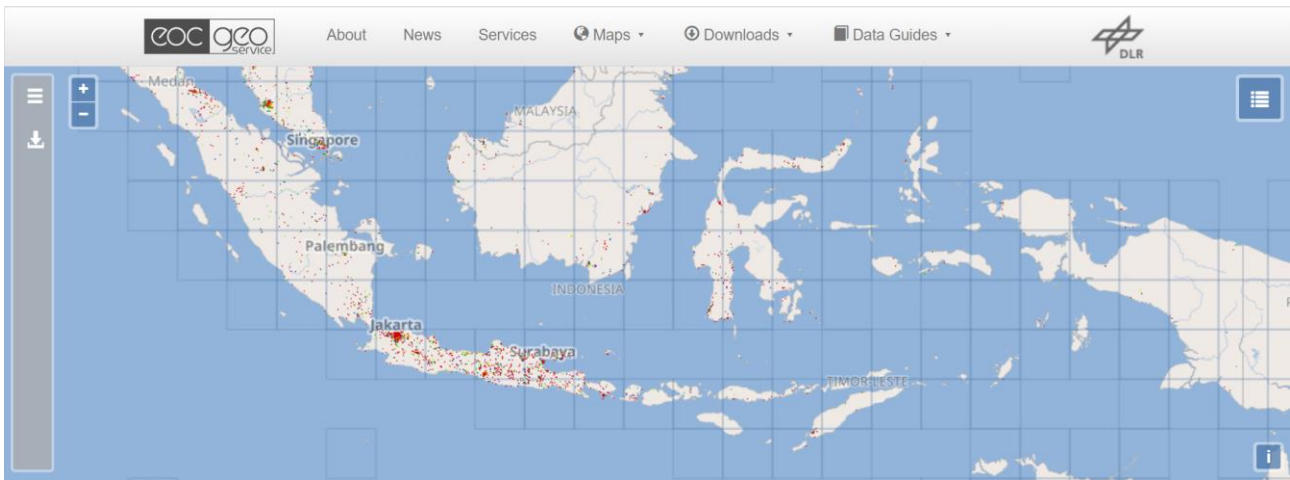


Figura 3: Esempio schermata di download dei dati WSF-Evolution (EOCGeoservice, 2021).

Sebbene il dataset non fornisca informazioni sulla densità della popolazione, uno studio recente (Rentschler, et al., Global Evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985, 2023) ha confermato che il WSF-Evolution mostra livelli di accuratezza più elevati rispetto ad altri dataset di insediamenti globali come, ad esempio, il GHSL di Copernicus (*Global Human Settlement Layer* (EuropeanCommission, Copernicus, 2023)), il quale, come descritto nel seguito, è stato utilizzato al fine di considerare anche lo sviluppo della popolazione nell'area di studio. Ciò suggerisce che il WSF-Evolution è ben adatto per monitorare le tendenze degli insediamenti sia nelle aree urbane che rurali, e per comprendere le dinamiche dell'urbanizzazione su scala mondiale, motivo per cui esso è stato scelto come riferimento per lo svolgimento del presente lavoro di tesi. Una pubblicazione completa con tutti i dettagli tecnici e i dati relativi alla precisione è attualmente in fase di finalizzazione; per il momento si rimanda a Marconcini et al. 2021 (Marconcini, Esch, & Gorelick, 2021).

## 2.3 Database GHS-POP

Il database GHS-POP è una sottosezione del più ampio GHSL, acronimo di “*Global Human Settlement Layer*” (Copernicus, 2023), il quale produce nuove informazioni spaziali globali, analisi basate e conoscenze che descrivono la presenza umana sulla Terra ed è fornito da Copernicus, il programma di osservazione della Terra dell’Unione Europea (EuropeanCommission, Copernicus, 2023), il quale opera secondo una politica di accesso ai dati e ai metodi completamente libera e aperta.

L’obiettivo del Servizio di Gestione delle Emergenze di Copernicus è la produzione periodica di informazioni geospaziali globali sugli insediamenti umani sotto forma di griglie di aree edificate. In particolare, l’ultimo pacchetto di dati GHSL (GHS P2023) fornisce migliori prodotti riguardanti le aree edificate (inclusi superficie, volume e altezza) e la popolazione, nonché un nuovo modello di insediamento e classificazione delle unità amministrative e territoriali (GHSL, 2023).

All’interno del pacchetto dati GHSL per lo studio della presente tesi è stato selezionato ed utilizzato il prodotto raster spaziale GHS-POP\_GLOBE\_R2023 (Schiavina, Freire, Carioli, & MacManus, 2023) che descrive la distribuzione della popolazione umana a livello globale, espressa come numero di persone per cella. Questi dati sono stati fondamentali al fine di integrare e confrontare i risultati ottenuti analizzando lo sviluppo delle aree urbanizzate attraverso l’utilizzo del dataset precedentemente descritto WSF-Evolution. Utilizzando questi dataset, è infatti stato possibile indagare sia lo sviluppo degli insediamenti che della popolazione nell’area di studio, in relazione a passati eventi alluvionali registrati su essa.

Le stime della popolazione residenziale, disponibili per il download al collegamento <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php> ad intervalli di 5 anni tra il 1975 e il 2030, derivano dai dati grezzi del censimento globale armonizzati da CIESIN per la Gridded Population of the World, versione 4.11 (GPWv4.11) (EuropeanCommission, JRC Scientific Information Systems and Databases Report: GHSL Data Package, 2023). Il dataset GHS-POP è stato prodotto sul sistema di coordinate World Mollweide (ESRI: 54009) a 100 metri di risoluzione e poi aggregato ad 1 kilometro. Questi set di dati sono poi stati deformati sul sistema di coordinate WGS84, a risoluzioni spaziali di 3 arcsec e 30 arcsec, applicando un’accurata procedura di conservazione del volume (Schiavina, Freire, Carioli, & MacManus, 2023) (EuropeanCommission, JRC Scientific Information Systems and Databases Report: GHSL Data Package, 2023). I dati scaricati e successivamente analizzati nello studio in seguito descritto sono riferiti al sistema di coordinate WGS84 (EPSG 4326) ad una risoluzione di 3 arcsec (circa 90x90 m<sup>2</sup>).

## 2.4 Database GFD

Il cambiamento climatico sta esponendo milioni di persone ad eventi alluvionali ad alto rischio, ed essendo l'obiettivo della presente tesi quello di studiare l'evoluzione degli insediamenti in zone frequentemente soggette a fenomeni di inondazione, si è reso necessario l'utilizzo del dataset GFD (GFD, 2022), acronimo di “*Global Flood Database*”. Il Global Flood Database è il primo nel suo genere ad offrire uno sguardo completo sui luoghi in cui si sono verificate le inondazioni e su chi ne è stato maggiormente colpito in tutto il mondo. Questo dataset consiste in una raccolta completa di dati relativi agli eventi di inondazioni globali, e ha l'obiettivo di fornire informazioni sulla frequenza, sull'impatto e sui modelli delle inondazioni in tutto il mondo. Il Global Flood Database è progettato per essere una risorsa preziosa per ricercatori, politici e organizzazioni coinvolte nella gestione delle catastrofi e negli studi sul clima.

Questo dataset è nato dalla collaborazione tra Cloud to Street (CloudToStreet, 2023) ed il DFO Flood Observatory (DFO, 2023), ha ricevuto finanziamenti da Google Earth Outreach (Google Earth per il Sociale (GoogleEarthOutreach, 2023)), ed i ricercatori coinvolti nella sua creazione sono anche affiliati al Columbia Earth Institute, all'Università dell'Arizona, all'Università del Michigan, all'Università del Texas ad Austin, all'Università del Colorado, all'Università di Washington, a Google, e allo Science Systems & Applications Inc./Biospheric Sciences Lab, NASA Goddard Space Flight Center (GFD, 2022). Con i finanziamenti di Google Earth per il Sociale, gli esperti di mappatura delle inondazioni di Cloud to Street e il DFO Flood Observatory hanno combinato oltre 15 anni di dati sulle inondazioni con dati sugli insediamenti umani per creare un database completo per ricercatori, operatori umanitari, organizzazioni comunitarie e fornitori di assicurazioni e finanziamenti.

Le mappe delle inondazioni nel Global Flood Database sono state create utilizzando i satelliti MODIS della NASA (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, (NASA, 2023)). Le mappe MODIS utilizzano due immagini al giorno con una risoluzione di 250 metri e iniziano nell'anno 2000. Gli eventi di piena mappati in questo database rappresentano i principali eventi registrati dall'osservatorio delle piene del DFO dall'inizio delle registrazioni satellitari. In particolare, il Global Flood Database è stato sviluppato per mappare sistematicamente l'estensione massima osservata delle acque superficiali durante 913 grandi eventi di inondazione documentati dal Dartmouth Flood Observatory (DFO, 2023) dal 2000 al 2018 (Tellman, et al., 2021) ed integra i prodotti esistenti sulle acque superficiali che consistono in osservazioni mensili o giornaliere, fornendo così un catalogo di eventi geospaziali.

Attraverso il sito web (GFD, 2022) è possibile selezionare un paese, sfogliare le mappe di inondazione per esso raccolte, selezionare un evento elencato e scaricare il file GeoTIFF per lo specifico evento. Un esempio di schermata del sito web di download delle mappe di inondazione è riportato nella Figura 4 sottostante.



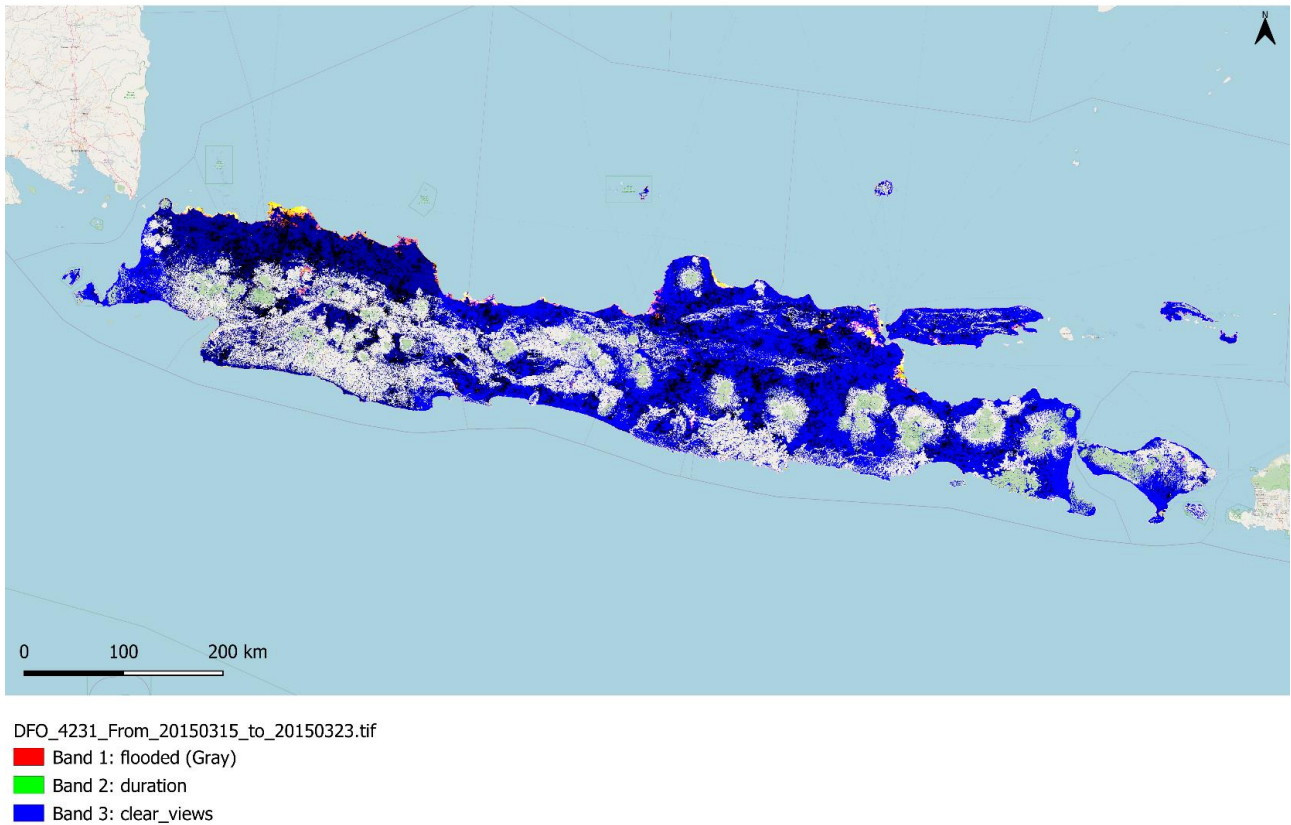
Figura 4: Schermata di download delle mappe di inondazione dal sito del GFD (GFD, 2022).

Ogni mappa degli eventi viene quindi fornita come file GeoTIFF nel sistema di coordinate geografiche WGS84 con una risoluzione di 0,0022458 gradi (250 metri). Esso sarà contenuto in un file .zip insieme ad un documento di metadati e conterrà 5 bande:

- *Flooded*: i pixel possono assumere valore 0 o 1; i pixel con valore 1 indicano un'area considerata allagata durante l'evento, quelli con valore pari a 0 un'area non allagata.
- *Duration*: i valori dei pixel indicano il numero di giorni per cui l'area di un pixel è stata allagata durante l'evento.
- *Clear\_View*: i valori dei pixel indicano il numero stimato di osservazioni prive di copertura di nuvole effettuate per l'area coperta dal pixel.
- *Clear\_perc*: questa banda rappresenta la percentuale di osservazioni chiare rispetto alle totali effettuate su ciascun pixel.
- *Jrc\_perm\_water*: i valori dei pixel pari a "1" indicano l'acqua "permanente", che identifica i pixel che sono costantemente identificati con la presenza di acqua superficiale per la maggior parte delle osservazioni in due periodi di tempo (1984-1999 e 2000-2018) con una risoluzione di 30 metri che è stata ricampionata a 250 m risoluzione in Google Earth Engine utilizzando il ricampionamento del vicino più prossimo (GFD, 2022).



Dallo stesso sito, è possibile anche ottenere dati sulle precipitazioni e stime della popolazione riferite alla zona interessata dall'evento, ma al fine di completare lo studio di tesi, si è ricorso solamente all'utilizzo delle mappe di inondazioni passate interessanti l'isola di Giava in Indonesia. Queste sono infatti state scaricate ed importate sul software QGIS e successivamente elaborate ed utilizzate come riportato nei capitoli successivi. Un esempio di mappa di inondazione per l'evento avvenuto in Indonesia il 23 marzo 2015 è riportato nella Figura 5.



*Figura 5: Esempio di download di una mappa di evento alluvionale (GFD, 2022) importato sul software QGIS.*

## 2.5 Database HydroLAKES

Il database HydroLAKES è pubblicamente disponibile per il download all'indirizzo <http://www.hydrosheds.org> ed è gratuito per usi scientifici, didattici e di altro tipo. Esso, rilevatosi necessario per lo studio su cui è focalizzata la presente tesi al fine di considerare l'acqua permanente dell'Intera Indonesia, è stato sviluppato come lavoro di squadra nel Global HydroLAB (McGill-University, 2023), supervisionato e coordinato da B. Lehner (Lehner & Messenger, 2016).

HydroLAKES mira a fornire i poligoni del litorale di tutti i laghi del mondo con una superficie di almeno 10 ettari. HydroLAKES è stato sviluppato utilizzando una suite di fonti di dati ausiliari di poligoni lacustri e aree di superficie lacustre grigliate. La copertura globale di HydroLAKES comprende 1,4 milioni di singoli laghi o bacini artificiali che rappresentano una superficie totale di 2,67 milioni di km<sup>2</sup>, una lunghezza totale della costa di 7,2 milioni di km e un volume totale di stoccaggio di 181.900 km<sup>3</sup>. HydroLAKES include solo una quantità limitata di informazioni sugli attributi, per lo più geometrici, come la superficie, la lunghezza della costa e le stime della profondità media, del volume dell'acqua e del tempo di residenza (HydroSHEDS, 2023).

I dataset di informazioni spaziali di HydroLAKES sono costituito da due livelli GIS separati:

- "HydroLAKES\_polys\_v10" contiene tutti i poligoni delle coste dei laghi;
- "HydroLAKES\_points\_v10" contiene tutti i punti di scorrimento dei laghi.

Ogni shapefile HydroLAKES è costituito da cinque file principali (.dbf, .sbn, .sbx, .shp, .shx) e le informazioni sulla proiezione sono fornite in un file di testo ASCII (.prj). Questo file contiene tutte le informazioni sugli attributi di HydroLAKES e le posizioni dei punti di scorrimento possono essere tracciate utilizzando le coordinate XY fornite (HydroSHEDS, 2023).

In particolare, nel presente studio, è stato necessario utilizzare le informazioni di questo dataset relativamente all'area indonesiana ricavabili dalla tabella degli attributi visualizzabile sul software QGIS una volta scaricati ed importati i dati di interesse.

## 3. Metodi

### 3.1 Preparazione dataset

Per procedere con il lavoro di tesi è stato necessario preparare e pre-elaborare i dataset in input, al fine di renderli idonei allo scopo prestabilito. In particolare, per ognuno dei database precedentemente illustrati è stato necessario scaricare i dati desiderati, importarli sui software specifici e compiere su essi operazioni preliminari al fine di renderli compatibili tra loro e adatti allo studio da svolgere.

#### 3.1.1 Database GADM

Come anticipato precedentemente, l'utilizzo di questo database si è reso necessario al fine di visualizzare ed isolare l'area di interesse, così da essere in grado successivamente di selezionare i dati provenienti dagli altri database in funzione dei confini dell'area di studio.

In particolare, per questo studio è stato necessario risalire ai confini dell'Intera Indonesia, dell'isola di Giava e della zona comprendente la città di Surabaya e le zone ad essa limitrofe. Il primo è stato ottenuto direttamente dal livello 0 scaricato dal database GADM, mentre gli altri due sono stati ottenuti partendo dal livello 3 attraverso la selezione dei multipli poligoni costituenti la specifica area, loro successiva esportazione come nuovo layer ed infine loro unione. Queste operazioni sono state effettuate sul software QGIS mediante i comandi *Select Features by Polygon*, *Save Selected Features as* e *Merge Selected Features*.

I layer vettoriali definenti le aree di Indonesia, Giava e Surabaya così ottenuti sono mostrati unitamente nella Figura 6.

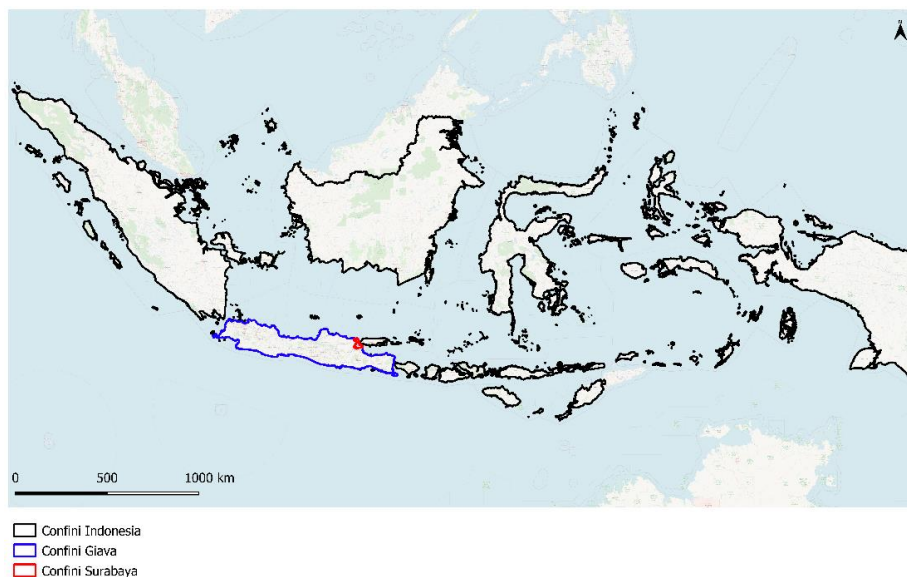


Figura 6: Pre-elaborazione dati GADM e ottenimento dei layers vettoriali delimitanti Indonesia, Giava e Surabaya.

### 3.1.2 Database WSF-Evolution

Per quanto riguarda il database WSF-Evolution (WSFEvolution, 2015), al fine di studiare e visualizzare l'espansione degli insediamenti nell'area di studio dal 1985 al 2015, è stato necessario inizialmente scaricare i 139 file GeoTIFF (proiezione EPSG4326, ognuno riferito ad una porzione di terreno di dimensioni circa equivalenti a 222 x 222 km) ricoprenti l'intera superficie indonesiana, compresa la superficie marina intra isole, per la quale si osserva che i pixel assumono valore pari a 0, significativo di area non insediata. Successivamente, uniti tutti i dati ed ottenuto un unico layer rappresentativo dello sviluppo delle aree insediate attraverso il comando *Merge* su QGIS, si è ritagliato questo risultato seguendo il confine precedentemente ottenuto dell'Indonesia attraverso il comando *Clip by Mask Layer*. Svolgendo questa operazione si è inoltre assegnato valore "no data" ai pixel esterni al confine stesso, ricadenti sulla superficie marina, in modo tale da poter successivamente distinguere i pixel di territorio insediabili ma non insediati (assunti così valore 0) da quelli non insediabili (assunti così valore "no data"). Lo sviluppo spaziale degli insediamenti negli anni dal 1985 al 2015 per l'intera Indonesia è riportato nella Figura 7.

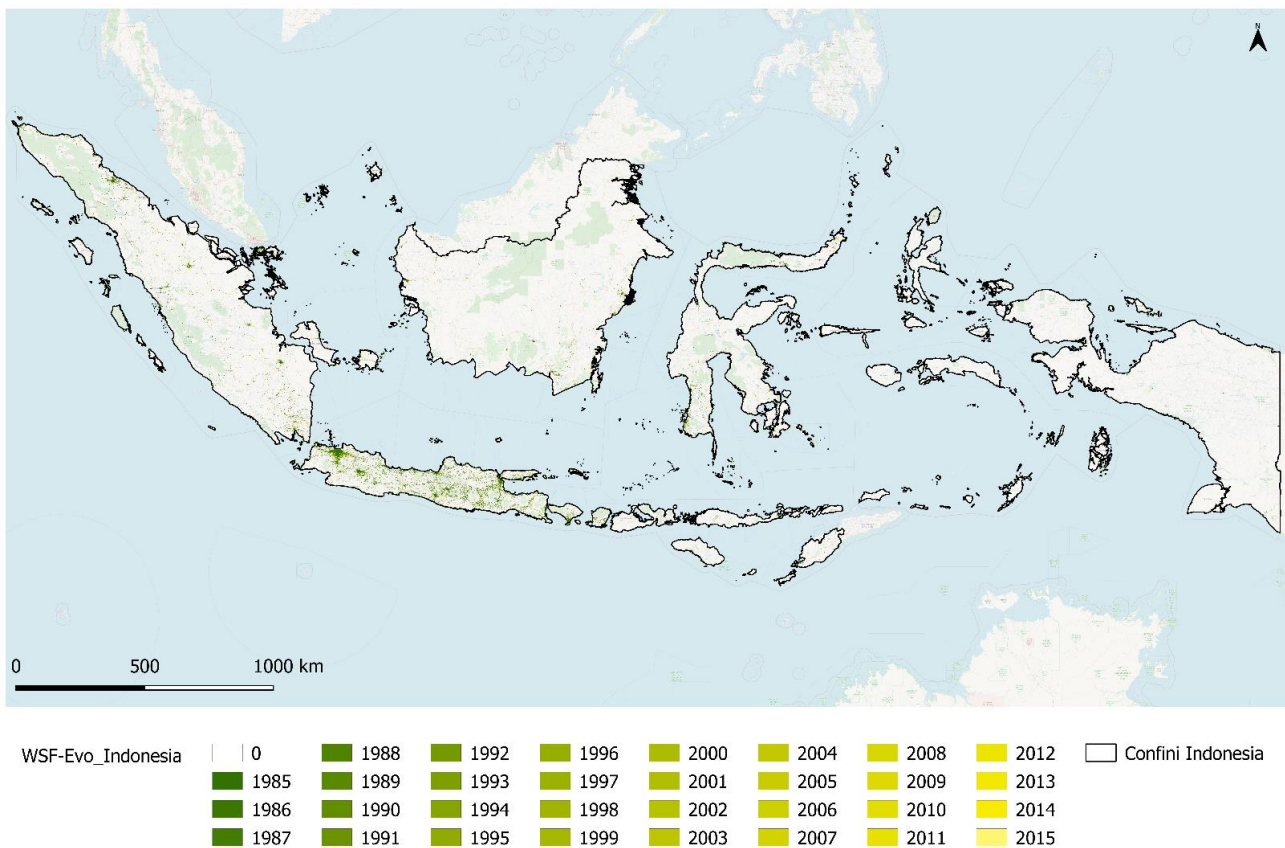


Figura 7: Sviluppo dell'impronta degli insediamenti in Indonesia con gradazione di colore dal verde scuro (anni meno recenti) al giallo più chiaro (anni più recenti).

Osservando i dati pre-elaborati, si percepisce quanto l'isola di Giava, seppur di dimensioni ridotte, ospiti la maggior parte delle aree costruite passate e recenti presenti in Indonesia, essendo essa centro dell'economia e dello sviluppo indonesiani. Per questo motivo il presente studio di tesi si è focalizzato proprio sull'isola di Giava e su Surabaya, una delle principali città in termini di opportunità economiche e di vulnerabilità agli eventi di inondazione. Un focus dei dati di sviluppo dell'impronta degli insediamenti sull'isola di Giava è riportato nella Figura 8.

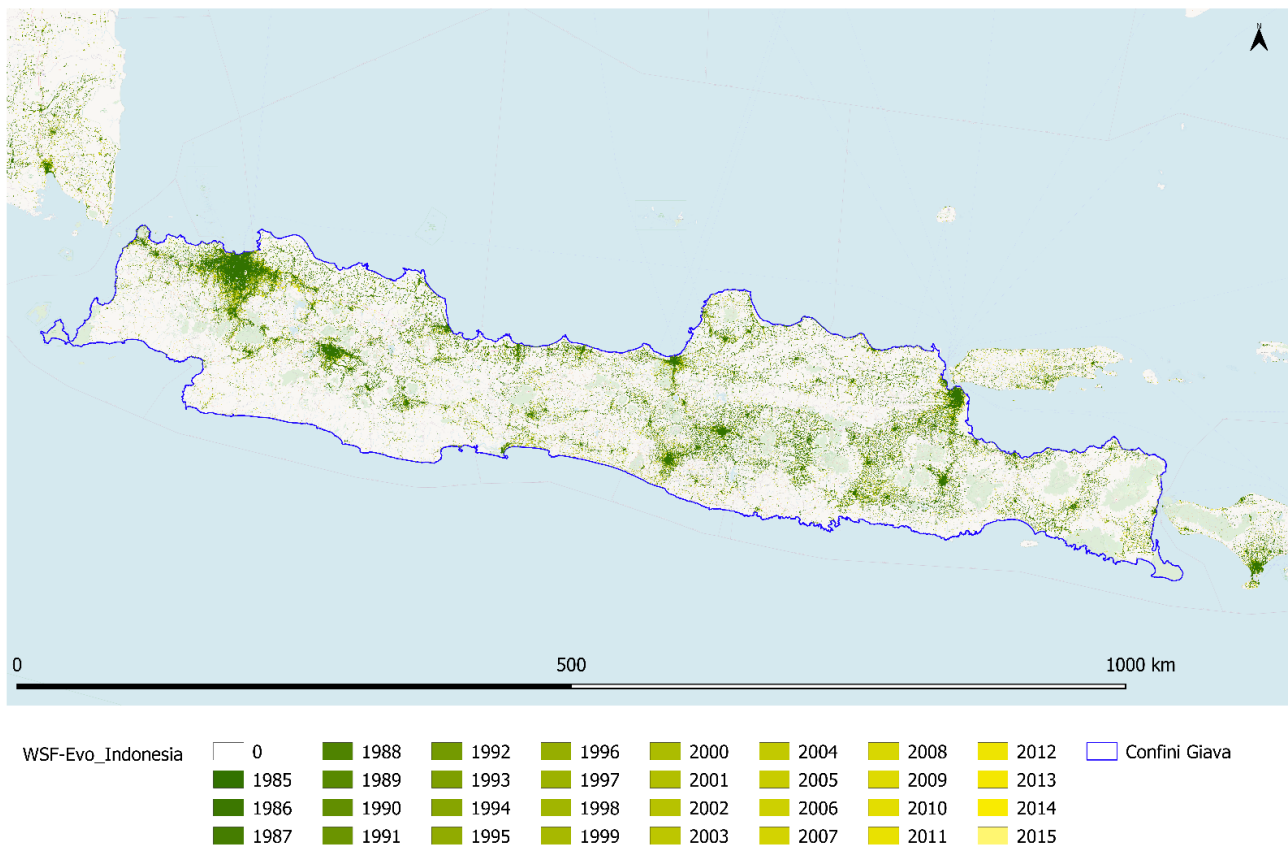


Figura 8: Sviluppo dell'impronta degli insediamenti nell'isola Giava con gradazione di colore dal verde scuro (anni meno recenti) al giallo più chiaro (anni più recenti).

### 3.1.3 Database GHS-POP

Dal database GHS-POP sono stati scaricati, per completare l'analisi dello sviluppo della popolazione in correlazione a quello degli insediamenti, i dati spaziali di popolazione ricoprenti l'area dell'Indonesia a cadenza quinquennale per il periodo 1985-2015, range di anni disponibili ricoperto dal database WSF-Evolution. Analogamente a quanto fatto con i dati rappresentativi delle aree urbanizzate, questi sono stati poi importati ed elaborati sul software QGIS al fine di ottenere un raster layer per ogni anno disponibile contenente, per ogni pixel di dimensioni circa 90 x 90 metri, l'informazione degli abitanti assoluti risiedenti nell'area da esso coperto.

Ogni raster ottenuto è stato poi ritagliato secondo i confini precedentemente creati utilizzando i dati da GADM per poter successivamente selezionare le informazioni desiderate per l'intera Indonesia, per l'isola Giava e per l'area della città di Surabaya. Anche in questo caso ai pixel ricadenti al di fuori di ogni specifico confine è stato assegnato valore "no data".

Un esempio di mappa così ottenuta, contenente le informazioni della popolazione in Indonesia per l'anno 2005 è riportato nella Figura 9a. La Figura 9b riporta invece un focus della stessa mappa sull'isola di Giava, dal quale si percepisce, analogamente a quanto visto con i DATI WSF-Evolution, che l'isola ospita gran parte della popolazione indonesiana.



Figura 9: Dati di popolazione espressi come numero di abitanti assoluti per cella per l'anno 2005 in Indonesia (a) e sull'isola di Giava (b) (Schiavina, Freire, Carioli, & MacManus, 2023).

### 3.1.4 Database GFD

Il database GFD precedentemente introdotto è di fondamentale importanza per lo sviluppo del lavoro, in quanto raccoglie le mappe dei passati eventi di inondazione a livello globale. Da questo, selezionata l'area dell'isola di Giava in Indonesia, sono stati scaricati e successivamente analizzati 15 eventi alluvionali occorsi dal 2003 al 2015 di diversa intensità, durata e rilevanza in termini di persone sfollate e superficie colpita: la Tabella 1 sotto riportata raccoglie le informazioni relative agli eventi alluvionali considerati nello studio.

# Evento	Data di inizio (GG/MM/AAAA)	Durata (giorni)	Area Colpita (km <sup>2</sup> )	Persone Sfollate	Vittime
1	30/01/2003	10	657	0	0
2	16/02/2003	1	478	4300	0
3	17/02/2004	8	587	4000	0
4	19/02/2005	6	1720	50000	0
5	08/01/05	4	895	6000	0
6	26/01/2006	19	1350	10000	19
7	25/12/2007	9	52.6	50000	153
8	02/01/08	4	1500	1000	0
9	14/02/2008	29	1060	10000	0
10	16/07/25	33	1370	12000	3
11	18/12/2011	17	2610	54	10
12	27/01/2012	2	401	3000	6
13	12/02/12	2	2270	6800	0
14	13/01/2013	9	212	46000	32
15	15/03/2015	8	978	4000	0

Tabella 1: Informazioni dei 15 eventi di inondazione considerati in questo studio avvenuti nell'isola di Giava e dintorni, Indonesia (GFD, 2022).

Come precedentemente illustrato, le mappe degli eventi di inondazione scaricabili dal sito GFD (GFD, 2022) consistono in un file GeoTIFF, hanno risoluzione di 250 metri e vengono rappresentate attraverso 5 bande di colore. Al fine di visualizzare l'estensione delle aree allagate per ogni singolo evento è stato necessario impostare la rappresentazione delle mappe considerando solamente la banda "flooded", ottenendo i layer dei 15 eventi come mostrato nelle Figure 10 e 11.

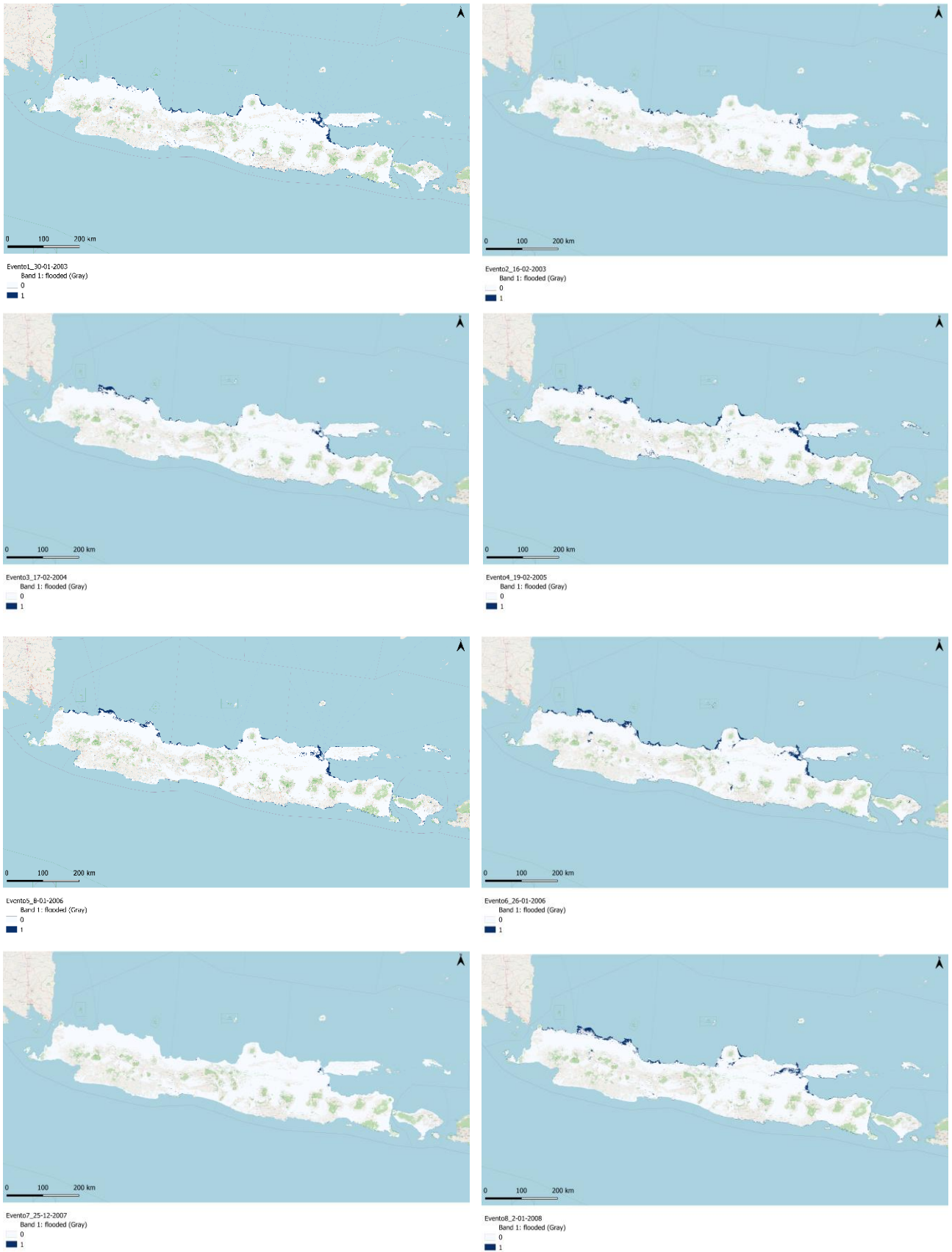


Figura 10: Mappe della superficie inondata degli eventi del 30/01/03 (a), 16/02/03 (b), 17/02/04 (c), 19/02/05 (d), 8/01/06 (e), 26/01/06 (f), 25/12/07 (g), 2/01/08 (h) (GFD, 2022).



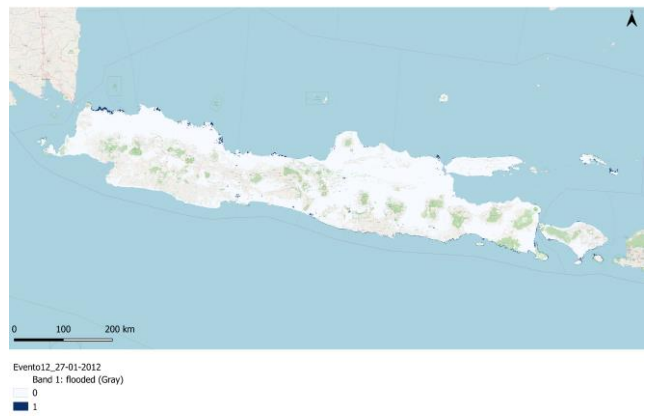


Figura 11: Mappe della superficie inondata degli eventi del 14/02/08 (a), 1/03/08 (b), 18/12/1 (c), 27/01/12 (d), 12/02/12 (e), 13/01/13 (f), 15/03/15 (g) (GFD, 2022).

Procedendo alla stessa maniera è stato necessario anche creare il layer rappresentativo dell'acqua permanente presente nell'area di studio, così da poterla successivamente distinguere dall'acqua di inondazione, siccome nelle mappe è stata osservata una loro sovrapposizione in diversi punti dell'isola. La distribuzione dell'acqua permanente ottenuta dal GFD è riportata nella Figura 12, dove il colore bianco in trasparenza assegnato al valore 0 indica assenza di acqua permanente, e il colore rosso assegnato al valore 1 indica presenza di acqua permanente.



*Figura 12: Distribuzione dell'acqua permanente sull'isola di Giava, Indonesia (GFD, 2022).*

### 3.1.5 Database HydroLAKES

Per considerare l'acqua permanente dell'intera Indonesia, al fine di individuarne la superficie effettivamente insediabile, sono stati scaricati i dati dall'indirizzo <http://www.hydrosheds.org> per l'intera Indonesia e le aree adiacenti, ottenendo così su QGIS il layer mostrato nella Figura 13.

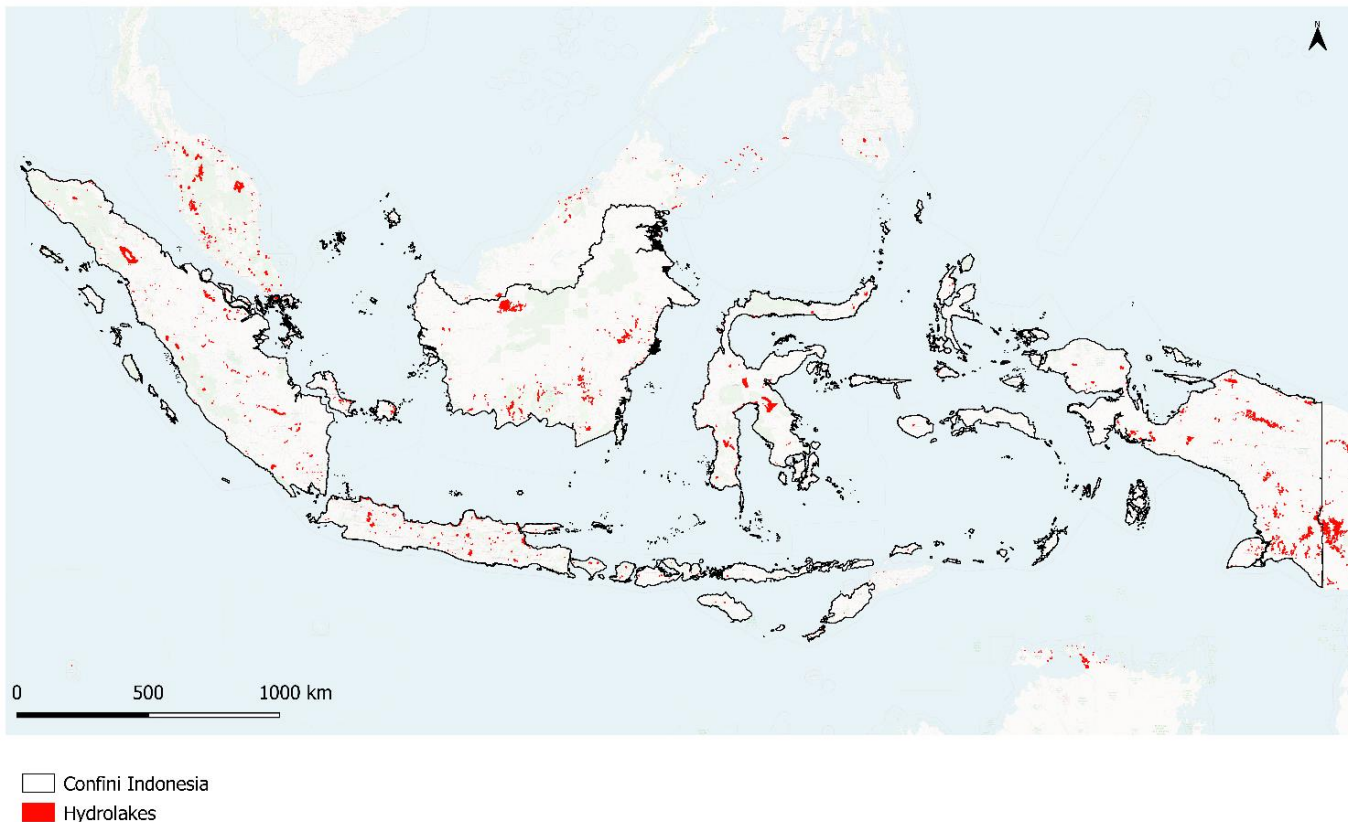


Figura 13: Rappresentazione dei laghi presenti sul territorio dell'Indonesia (HydroSHEDS, 2023).

Importando la tabella degli attributi del layer ottenuto sul software Excel è stato possibile selezionare ed isolare i dati relativi ai soli laghi appartenenti al territorio dell'Indonesia impostando un filtro sulla colonna degli attributi relativa allo stato di appartenenza, ottenendo così 3039 voci. Allo stesso modo è stato possibile anche isolare le 389 voci corrispondenti ai laghi presenti sul territorio dell'isola di Giava. A seguire, utilizzando il dato di superficie occupata dei laghi così identificati, è stato possibile ottenere le informazioni dell'estensione totale dei laghi in Indonesia e sull'isola di Giava, utilizzate nel seguito delle analisi, rispettivamente pari a 8063.18 km<sup>2</sup> e 1223.29 km<sup>2</sup>.

## 3.2 Elaborazione dati

Una volta elaborati i dati ed ottenuti i raster layers sopra mostrati, al fine di studiare lo sviluppo degli insediamenti e della popolazione sull'isola di Giava in Indonesia, si è deciso di considerare unitamente tutti gli eventi di inondazione a disposizione per definire le aree "Allagate" e le aree "Non Allagate" sull'isola di Giava. Con tale approccio, la definizione di queste due superfici risulta essere indipendente dal tempo, e dunque univoca per tutto il periodo di tempo considerato. Per ottenere un unico layer considerante tutti gli eventi selezionati, è stato necessario sommare le mappe di inondazione attraverso l'utilizzo del *Raster Calculator* su QGIS. Nel completare questa operazione, si è inoltre provveduto ad assegnare ai pixels privi di informazione, ovvero contenenti informazione "no data", presenti nelle mappe di inondazione, valore pari a 0, supponendo quindi definiti un'area non ricoperta né da acqua di inondazione, né da acqua permanente. Sempre utilizzando il *Raster Calculator*, è stato possibile anche modificare la risoluzione e l'estensione della mappa risultante, adattandole alle proprietà del raster layer contenente i dati WSF-Evolution. Tale operazione ha permesso di completare le successive analisi in maniera uniforme alla risoluzione migliore disponibile, ovvero quella dei dati di sviluppo dell'impronta degli insediamenti, pari a 30 metri.

Lo script utilizzato sul raster calculator è il seguente, il quale ha permesso di ottenere la mappa alluvionale rappresentata nella Figura 14.

```
("Evento1.tif@1"=1) + ("Evento2.tif@1"=1) + ("Evento3.tif@1"=1) +  
+("Evento4.tif@1"=1) + ("Evento5.tif@1"=1) + ("Evento6.tif@1"=1) +  
+("Evento7.tif@1"=1) + ("Evento8.tif@1"=1) + ("Evento9.tif@1"=1) +  
+("Evento10.tif@1"=1) + ("Evento11.tif@1"=1) + ("Evento12.tif@1"=1) +  
+("Evento13.tif@1"=1) + ("Evento14.tif@1"=1) + ("Evento15.tif@1"=1) .
```

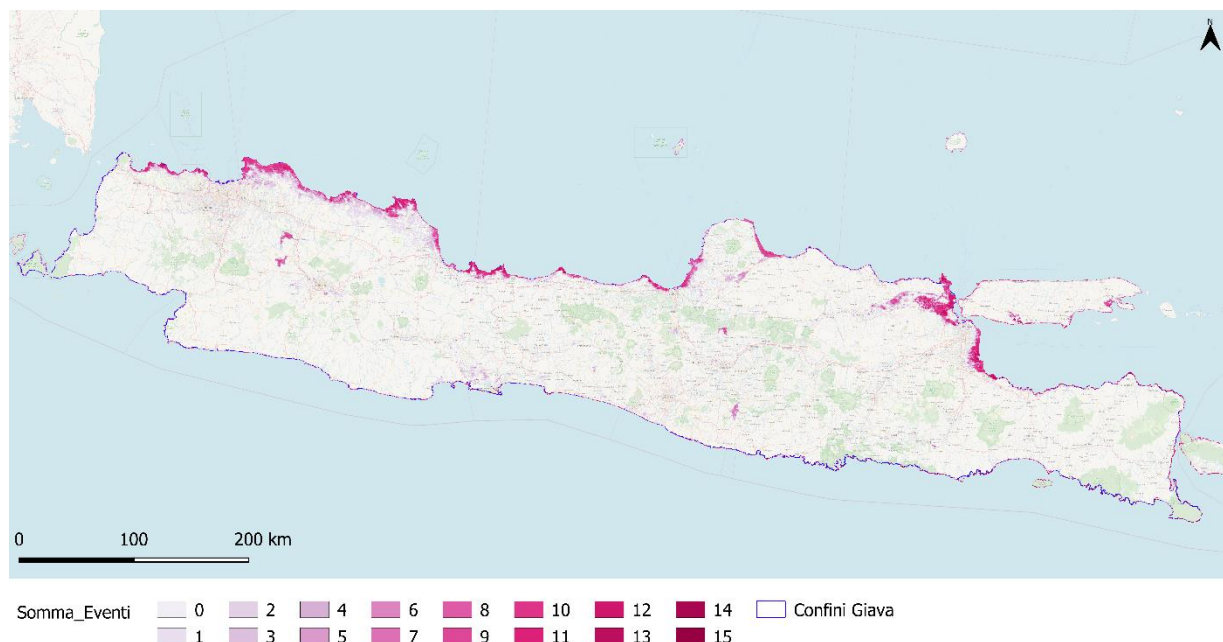


Figura 14: Mappa rappresentante la somma dei 15 eventi di inondazione considerati nello studio (GFD, 2022).

La mappa risultante contiene pixels con valori possibili da 0 a 15, in funzione della frequenza di allagamento della zona ricoperta, dati i 15 eventi di alluvione. Osservando le zone più frequentemente allagate in prossimità della costa, si notano delle sovrapposizioni con l'acqua permanente precedentemente illustrate; quindi, si sono volute escludere dall'analisi tutte le zone ricoperte da acqua permanente, considerando così nello studio solamente le aree insediabili dell'isola, ovvero le aree su cui è possibile costruire e abitare. Dopo aver assegnato valore 0 ai pixel non contenenti informazione nella maschera rappresentativa dell'acqua permanente, supponendoli non definiti una superficie acquatica, si è quindi utilizzato il *Raster Calculator* per ottenere una nuova mappa degli eventi alluvionali avente valore corrispondente a "no data" nelle aree ricoperte da acqua permanente.

Ritagliando poi questo risultato con il comando *Clip by Mask Layer* inserendo come maschera il confine dell'isola di Giava precedentemente ottenuto, si è ottenuta la mappa mostrata nella Figura 15, la quale rappresenta la base di tutte le successive analisi dello sviluppo degli insediamenti e della popolazione sull'isola. A seguito dell'esclusione delle superfici di acqua permanente e del ritaglio effettuato con i confini dell'isola ricavati con i dati da GADM (GADM, 2022), si osserva che nella mappa rappresentante la somma degli eventi non registra aree insediabili allagate un numero di volte pari al totale degli eventi alluvionali considerati nello studio.

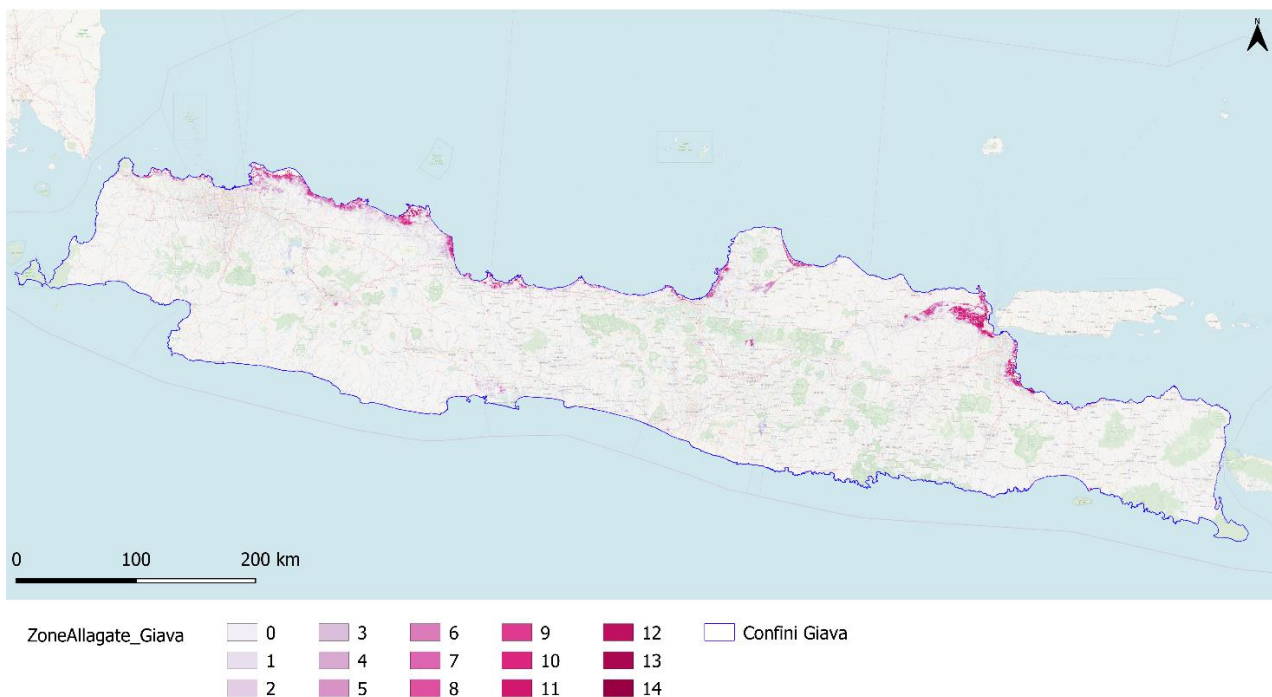


Figura 15: Mappa rappresentante la somma dei 15 eventi di inondazione considerati nello studio per la sola isola di Giava ed escludente le aree di acqua permanente.

Dopo aver ritagliato anche il raster layer contenente le informazioni dello sviluppo dell'impronta degli insediamenti entro i confini dell'isola, si è proceduto nell'analisi separando le informazioni in esso contenute in 5 differenti zone, tutte riferite alla sola superficie insediabile, così definite:

- 1) Zone Allagate: definisce in maniera univoca, considerando tutti i 15 eventi alluvionali contemporaneamente, le zone che nello studio verranno considerate come soggette ad alta probabilità di allagamento. I pixels assumenti valore pari ad 1 in tale maschera indicano zone che sono state allagate almeno una volta nel periodo di tempo 2003-2015, ovvero arco temporale in cui sono avvenuti gli eventi di inondazione selezionati. Tutti gli altri pixels definenti l'estensione del raster assumono valore corrispondente a "no data".
- 2) Zone Non Allagate: definisce in maniera univoca, considerando tutti i 15 eventi alluvionali contemporaneamente, le zone che non sono mai state allagate nel periodo di studio, assegnando ai pixels definenti tali aree valore 1 e valore corrispondente a "no data" altrove.
- 3) Zone Allagate 1-5 Volte: definisce tra le Aree Allagate quelle che sono state allagate un numero di volte compreso tra 1 e 5, assegnando ai pixels definenti tali aree valore 1 e valore corrispondente a "no data" altrove.
- 4) Zone Allagate 6-10 Volte: definisce tra le Aree Allagate quelle che sono state allagate un numero di volte compreso tra 6 e 10, assegnando ai pixels definenti tali aree valore 1 e valore corrispondente a "no data" altrove.

- 5) Zone Allagate 11-14 Volte: definisce tra le Aree Allagate quelle che sono state allagate un numero di volte compreso tra 11 e 14, assegnando ai pixels definiti tali aree valore 1 e valore corrispondente a “no data” altrove.

Al fine di ottenere e visualizzare separatamente le informazioni di sviluppo degli insediamenti per le aree sopra definite, si è proceduto compilando con il *Raster Calculator* gli script sotto riportati in ordine concorde con la definizione delle aree:

- 1) ("ZoneAllagate\_Giava@1">=1) • "WSF\_Giava@1" +  
+ ("ZoneAllagate\_Giava@1"<1) • -3.40282e+38
- 2) ("ZoneAllagate\_Giava@1"=0) • "WSF\_Giava@1" +  
+ ("ZoneAllagate\_Giava@1"! =0) • -3.40282e+38
- 3) (("ZoneAllagate\_Giava@1">=1) AND ("ZoneAllagate\_Giava@1"<=5)) •  
• "WSF\_Giava@1"+(("ZoneAllagate\_Giava@1">5) OR  
("ZoneAllagate\_Giava@1"<1)) • -3.40282e+38
- 4) (("ZoneAllagate\_Giava@1">=6) AND ("ZoneAllagate\_Giava@1"<=10)) •  
• "WSF\_Giava@1"+(("ZoneAllagate\_Giava@1"<6) OR  
("ZoneAllagate\_Giava@1">10)) • -3.40282e+38
- 5) (("ZoneAllagate\_Giava@1">=11) AND ("ZoneAllagate\_Giava@1"<=14)) •  
• "WSF\_Giava@1" + (" ZoneAllagate\_Giava@1"<11) • -3.40282e+38

Da qui si sono estratti i dati di conteggio di numero di pixel e si sono fatte le analisi che hanno portato ai risultati mostrati e discussi nel seguito. In particolare, attraverso lo strumento “*Raster Layer Unique Values Report*” si è ricercato il conteggio del numero di pixels per ogni anno incluso nei dati WSF-Evolution per ogni area sopra definita, compreso l’anno 0 rappresentativo delle aree non insediate. Importando i risultati di queste analisi su Excel e trasformando l’informazione utile da “numero di pixels” ad “area” conoscendo la risoluzione dei dati, si sono quindi ottenuti i dati di partenza per le successive analisi in termini di area insediabile, insediata e non insediata, a cadenza annuale. Numericamente, questo passaggio corrisponde al calcolo dell’area insediata in km<sup>2</sup>, specifica per ogni zona, secondo l’Equazione 1 successivamente riportata. La stessa analisi e le stesse operazioni sono state svolte anche per la sotto-area di interesse comprendente la città di Surabaya.

Per quanto riguarda i dati ricavati dal database WSF-Evolution per l’intera Indonesia, al fine di analizzare e confrontare lo sviluppo delle aree costruite in essa e nella sua isola più popolata, Giava, si è proceduto analogamente per quanto riguarda l’estrazione dei dati di sviluppo degli insediamenti, ma per definire la superficie insediabile, ovvero non comprensiva delle zone ricoperte da acqua

permanente, si è reso necessario l'utilizzo del database precedentemente introdotto HydroLAKES (HydroSHEDS, 2023).

Utilizzando questi dati, si è infatti ottenuta la stima della superficie indonesiana ricoperta da acqua permanente, pari a circa 8'063 km<sup>2</sup>, la quale è stata sottratta dalla superficie totale indonesiana ottenuta dall'estensione totale del raster contenente i dati di impronta degli insediamenti all'interno dei confini di livello 0 del database GADM, pari a circa 1'907'310 km<sup>2</sup>, al fine di valutare la superficie insediabile indonesiana, risultante pari a circa 1'899'247 km<sup>2</sup>.

Al fine di confrontare l'espansione delle aree urbane con lo sviluppo della popolazione, si è proseguito con l'elaborazione dei dati GHS-POP, condotta sulla falsa riga della precedente. Tuttavia, per questa elaborazione sono stati selezionate dal database solamente le informazioni appartenenti all'arco temporale 1995-2015, in ragione della discussione riportata nel seguito dei risultati ottenuti sull'espansione degli insediamenti.

In particolare, dopo aver scaricato, unito attraverso il comando *Merge* e ritagliato secondo i confini desiderati attraverso il comando *Clip by Mask Layer* i dati di popolazione ricoprenti l'intera superficie indonesiana per gli anni 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015, al fine di ottenere l'informazione di abitanti totali per ogni anno nelle aree di interesse sopra definite, è stato necessario:

- Adattare la risoluzione e l'estensione della mappa somma degli eventi precedentemente ottenuta ai nuovi raster layer contenenti le informazioni sul numero di abitanti per gli anni di interesse ad una risoluzione di circa 90 x 90 metri.
- Creare maschere definenti le zone Allagate, Non Allagate ed Allagate 1-5, 6-10 e 11-15 volte a partire dalla mappa degli eventi avvenuti registrati sull'isola di Giava.
- Utilizzare il *Raster Calculator* per creare un nuovo raster layers contenete le informazioni di numero di abitanti assoluti per cella per ogni maschera creata e per ogni anno disponibile. Gli script utilizzati a tal fine prevedono una moltiplicazione tra la maschera i-esima (indicando con "i" la specifica area prima definita: Zone Allagate, Zone Non Allagate, Zone Allagate 1-5 Volte, Zone Allagate 6-10 Volte, Zone Allagate 11-14 Volte) e il raster n-esimo contenente i dati di abitanti assoluti (con n assumente valore 1995, 2000, 2005, 2010, 2015).
- Analizzare i raster layers così ottenuti attraverso lo strumento *Zonal Statistic*, il quale fornisce le informazioni di valore massimo, minimo, medio, e somma per un raster all'interno di un'area definita attraverso un layer vettoriale.
- Importare e studiare in formato tabellare e grafico i dati ottenuti su Excel.



### 3.3 Analisi

Importati tutti i dati sul software Excel, si è proceduto con una loro analisi preliminare in termini di espansione degli insediamenti e sviluppo della popolazione assoluti nell'area dell'Indonesia e nelle sotto aree dell'isola di Giava e della città di Surabaya, i cui risultati sono mostrati e discussi nell'apposita sezione. Tali risultati riporteranno quindi gli andamenti assoluti di crescita dell'area insediata espressa in km<sup>2</sup> e della popolazione espressa in numero di abitanti, con focus relativo alle diverse zone i-esime studiate. Gli andamenti assoluti relativi allo sviluppo degli insediamenti riporteranno l'ordinata calcolata con l'Equazione 1, riferente ai dati WSF-Evolution (risoluzione di 30 x 30 metri). Quelli relativi alla crescita della popolazione, invece, mostreranno in ordinata il numero di abitanti direttamente ottenuto dall'elaborazione dei raster layers delle aree i-esime descritta precedentemente (dati GHS-POP di risoluzione di 90 x 90 m).

$$AreaInsediata, i (t) = \left( \sum_{y=1985}^t \#Pixels, i(y) \right) \cdot 9 \cdot 10^{-4}$$

*Equazione 1*

Successivamente, volendo scendere nel dettaglio di analisi dell'evoluzione delle aree insediate e dello sviluppo della popolazione in relazione agli eventi alluvionali registrati sull'isola di Giava negli ultimi anni, si è proseguito ricercando e successivamente confrontando le tendenze rappresentate dalle aree definite "Allagate" e "Non Allagate". A tal fine, inizialmente sono stati analizzati gli sviluppi assoluti dell'impronta degli insediamenti (area insediata) e della popolazione nelle suddette aree, e successivamente sono stati seguiti i due approcci di indagine sotto descritti, i cui risultati sono riportati in ordine nel capitolo dei Risultati. Nell'interpretazione dei Risultati ottenuti sarà poi ipotizzato un andamento crescente lineare sia dell'impronta degli insediamenti che della popolazione, al fine di poterli approssimare con una retta di tendenza e quindi studiare i rispettivi tassi di crescita. I tassi di crescita saranno quindi determinati per tutto l'intervallo di tempo considerato e solamente per un range di anni reputato interessante per mettere in evidenza le variazioni degli andamenti ritenute significative. Il tasso dell'andamento lineare è graficamente interpretabile dalla pendenza della curva tra due specifiche ascisse (nel presente studio determinate da due anni del periodo di studio) e numericamente determinabile dal coefficiente angolare dell'equazione della retta di tendenza, avente espressione di forma  $y = mx + q$ . Tali valori sono stati ottenuti utilizzando l'apposito strumento del software Excel, il quale calcola la retta di regressione attraverso il metodo dei minimi quadrati.

### 3.3.1 Distribuzione degli insediamenti e della popolazione

Al fine di studiare come gli insediamenti e la popolazione si sono espansi ed evoluti nel tempo nelle aree più e meno soggette ad inondazione, si è per prima cosa ricercata la distribuzione in termini percentuali delle aree insediate totali e della popolazione totale nelle due aree definite “Allagate” e “Non Allagate”, anno per anno.

In tal senso, gli andamenti risultati di questa indagine e riportati nel capitolo successivo sono stati ottenuti calcolando, anno per anno, l’ordinata secondo le formulazioni 2 e 3 sotto riportate, rispettivamente riferenti alla quota di area insediata al tempo (t) ricadente in zone frequentemente allagate e alla complementare a 100% quota di area insediata al tempo (t) ricadente nelle zone non allagate. In queste formulazioni, il valore di area insediata all’anno (t) è stato ottenuto attraverso una somma cumulata anno per anno, come spiegato attraverso l’Equazione 1.

$$\%Insediamenti_{ZoneAllagate}(t) = \frac{AreaInsediata_{ZoneAllagate}(t)}{AreaInsediata_{Totale}(t)} \cdot 100$$

*Equazione 2*

$$\begin{aligned} \%Insediamenti_{ZoneNonAllagate}(t) &= \frac{AreaInsediata_{ZoneNonAllagate}(t)}{AreaInsediata_{Totale}(t)} \cdot 100 \\ &= 100 - \%Insediamenti_{ZoneAllagate}(t) \end{aligned}$$

*Equazione 3*

Seguendo tale approccio, si è analogamente studiato l’andamento della quota di popolazione totale dell’isola di Giava e della città di Surabaya in termini di numero di persone, anno per anno, ricadente nelle zone qui definite come “Allagate”, applicando la formulazione 4.

$$\%Abitanti_{ZoneAllagate}(t) = \frac{Abitanti_{ZoneAllagate}(t)}{Abitanti_{Totali}(t)} \cdot 100$$

*Equazione 4*

Infine, ottenuto l’andamento negli anni della distribuzione degli insediamenti e della popolazione nelle zone più frequentemente soggette ad allagamento, si è voluto indagare come questi si sono a loro volta distribuiti nelle zone precedentemente definite come “Allagate n-volte”. I risultati di tale indagine fanno riferimento alle formulazioni 5 e 6, rispettivamente consideranti i dati di impronta degli insediamenti (WSFEvolution, 2015) e di popolazione (GHSL, 2023).

$$\begin{aligned} \%Insediamenti_{ZoneAllagate\_nVolte}(t) &= \\ &= \%Insediamenti_{ZoneAllagate}(t) \cdot \frac{AreaInsediat a_{ZoneAllagate\_nVolte}(t)}{AreaInsediat a_{ZoneAllagate}(t)} \cdot 100 \end{aligned}$$

Equazione 5

$$\begin{aligned} \%Abitanti_{ZoneAllagate\_nVolte}(t) &= \\ &= \%Abitanti_{ZoneAllagate}(t) \cdot \frac{Abitanti_{ZoneAllagate\_nVolte}(t)}{Abitanti_{ZoneAllagate}(t)} \cdot 100 \end{aligned}$$

Equazione 6

### 3.3.2 Occupazione dell'area insediabile e sviluppo della densità di popolazione

Questo secondo approccio è stato implementato al fine di studiare il tasso di occupazione dell'area insediabile nelle zone allagate e non allagate, sia sull'isola di Giava che nella città di Surabaya, così da poter visualizzare e confrontare con quale velocità la popolazione negli anni ha occupato i km<sup>2</sup> liberi nelle specifiche zone.

In tal senso tale approccio prevede la adimensionizzazione, e quindi la divisione, dei km<sup>2</sup> insediati per ogni zona anno per anno per il dato "Area Insediabile", specifico di ogni classe e valore costante nel tempo. In particolare, i dati di area insediabile utilizzati per ogni specifica area di studio sono stati ottenuti dall'elaborazione dei dati WSF-Evolution descritta in precedenza e sono riassunti nella Tabella 2. Tali dati nel presente studio rappresentano la superficie totale e costante, riferita ad ogni area di studio (Indonesia, isola di Giava, città di Surabaya e rispettive Aree Allagate, Allagate n-Volte e Non Allagate) su cui è possibile insediare ed abitare. Il dato di "Area Insediabile" tiene dunque conto delle aree insediate e non insediate su tutto il periodo temporale di studio ed è valido anche per gli anni precedenti e successivi ad esso, in quanto è supposto costante e relativo alla superficie "spoglia" del territorio. Infatti, tali valori di area insediabile rappresentano, in questo studio, la superficie della specifica area di studio al netto della sola acqua permanente. Infatti, nella sua determinazione non sono state studiate, e quindi escluse, altre aree non insediabili a causa di conformazioni territoriali particolari, assenza di infrastrutture, pericoli geofisici o altre motivazioni, nonché le aree insediate anno dopo anno. Infatti, la quota di superficie insediata nel tempo non è stata sottratta di volta in volta al dato di area insediabile, che risulta appunto costante nel tempo, in quanto si è voluta analizzare la velocità di occupazione dell'area "insediabile" originaria. Queste scelte fatte nella determinazione delle aree insediabili implicano che le loro estensioni calcolate non corrispondano alla reale superficie insediabile del territorio in esame. Questo fatto, e ciò che ne consegue sui risultati ottenuti verranno dettagliatamente discussi nell'apposita sezione.

Area di Studio		Area Insedibile (km <sup>2</sup> )	=	Area Totale (km <sup>2</sup> )	-	Superficie Ricoperta da AP (km <sup>2</sup> )
Indonesia		1899247.7		1907310.84		8063.18
Giava		127221.4		128636.07		1414.65
	Non Allagata	121679.5				
	Allagata	5541.9				
	Allagata 1-5 Volte	4184.7				
	Allagata 6-10 Volte	1123.8				
	Allagata 11-14 Volte	233.3				
Surabaya		1288.5		1381.39		92.93
	Non Allagata	952.1				
	Allagata	336.3				
	Allagata 1-5 Volte	123.0				
	Allagata 6-10 Volte	147.0				
	Allagata 11-14 Volte	66.4				

Tabella 2: Superfici dell'Area Insedibile per ogni area/classe di studio.

L'operazione di adimensionalizzazione eseguita al fine di studiare la velocità di occupazione dell'area originariamente disponibile agli insediamenti, suddivisa nelle specifiche zone di studio, è stata effettuata impostando l'Equazione 7 sotto riportata.

$$\%AreaInsedibileInsediata_i(t) = \frac{AreaInsediatat_i(t)}{AreaInsedibile_i} \cdot 100$$

Equazione 7

Utilizzando lo stesso approccio, e quindi dividendo per lo stesso dato di area insediabile i dati di popolazione totale nell'area di studio specifica i-esima, anno per anno, come da Equazione 8, si ottiene una rappresentazione in termini di densità di popolazione per ogni specifica area definita precedentemente.

$$DensitàPopolazione_i(t) = \frac{Popolazione_i(t)}{AreaInsedibile_i}$$

Equazione 8

Si ritiene necessario specificare che, con tale approccio si è anche potuto studiare il tasso di occupazione delle aree insediabili totali e lo sviluppo della densità di popolazione riferiti all'intera Indonesia. In questo modo è stato possibile confrontare questi con quelli riscontrati per l'isola di Giava e per la città di Surabaya attraverso i risultati e la loro discussione riportate nel capitolo dei Risultati.

## 4. Risultati

Pre-analizzando i dati ottenuti di area insediabile ed insediata per l'Indonesia, l'isola di Giava e l'area della città di Surabaya, si è osservato che la superficie insediabile di Giava, pari a circa 127'221 km<sup>2</sup>, rappresenta il 6.70% della superficie insediabile indonesiana (pari a circa 1'899'247 km<sup>2</sup> come ricavato dai dati), e l'area insediabile di Surabaya, pari a circa 1'288 km<sup>2</sup>, rappresenta lo 1.01% della precedente porzione. Osservando poi la superficie occupata dagli insediamenti, ovvero definente l'area insediata, dai grafici riportati nella Figura 16 si nota che l'isola di Giava, nonostante rappresenti una piccola porzione dell'area insediabile indonesiana, ospita dal 1985 al 2015 circa la metà degli insediamenti indonesiani totali (Figura 16a), e che circa il 3% di essi ricade all'interno dell'area di Surabaya (Figura 16b).

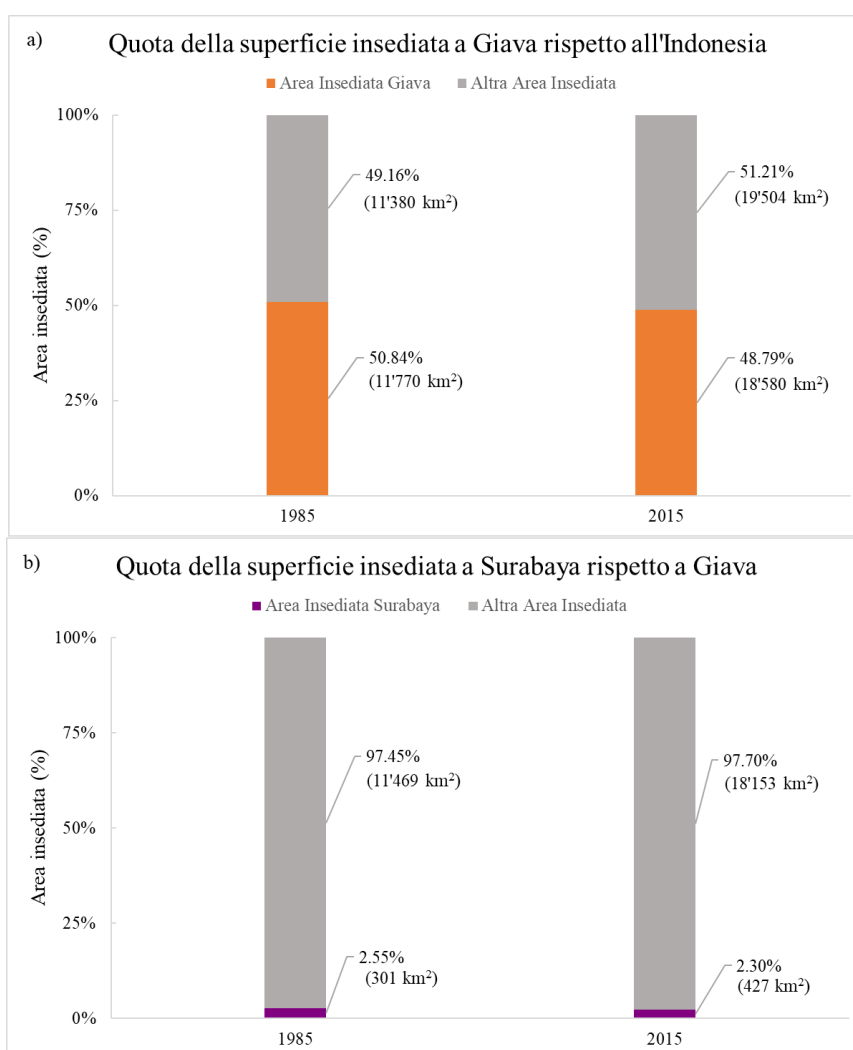


Figura 16: Porzione di insediamenti a Giava rispetto all'intera Indonesia (a) e a Surabaya rispetto a Giava (b) per gli anni 1985 e 2015.

Osservando gli sviluppi assoluti degli insediamenti in Indonesia, sull'isola di Giava e nell'area di Surabaya, ottenuti dall'analisi dei dati WSF-Evolution applicando l'Equazione 1 per calcolare le tre ordinate, e mostrati nei grafici nella Figura 17a, 17b e 17c rispettivamente, ci si è accorti che il dataset mostra un andamento non significativo nel periodo temporale dall'anno 1985 all'anno 1995.

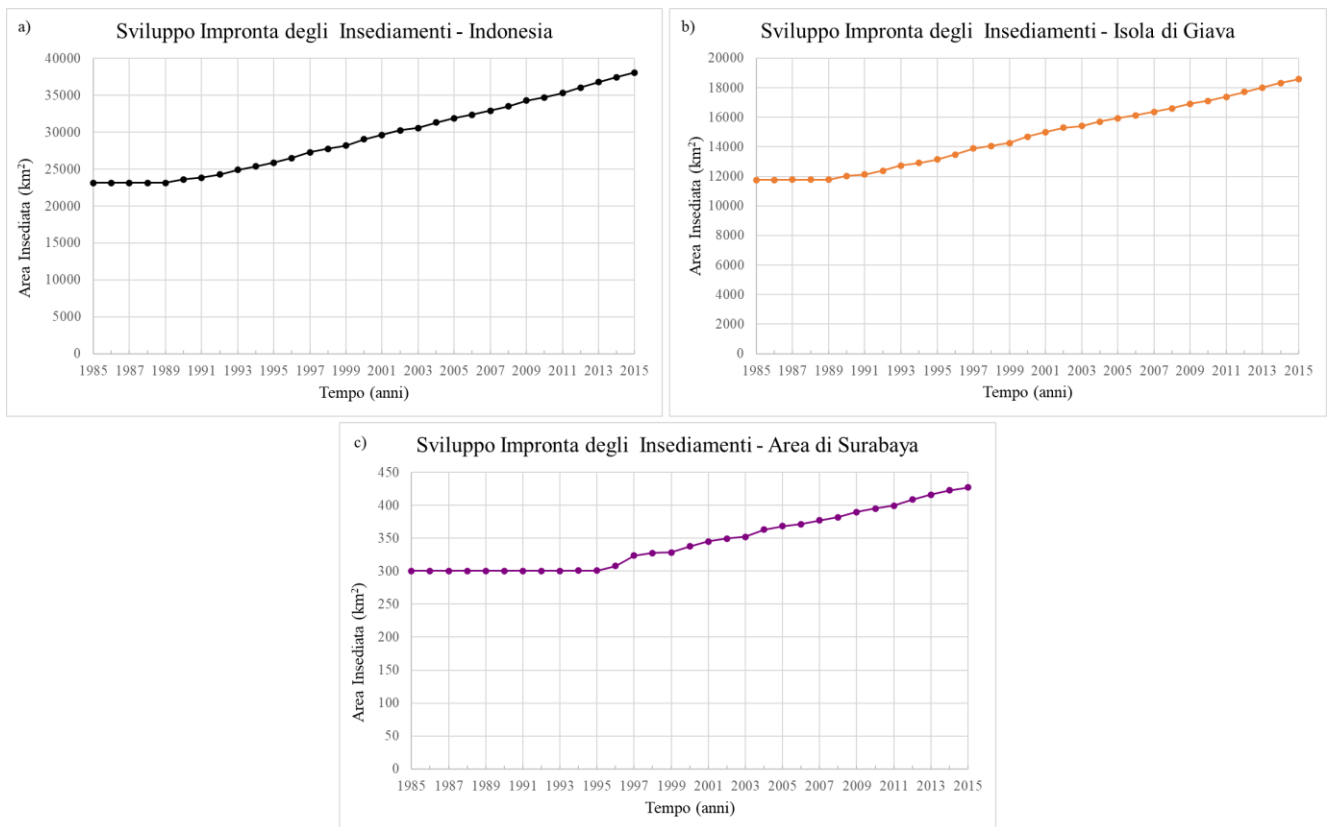


Figura 17: Sviluppo dell'impronta degli insediamenti in termini di area occupata in Indonesia (a), Giava (b) e Surabaya (c) dal 1985 al 2015.

Data questa limitazione, probabilmente dovuta alle operazioni di integrazione a ritroso dei dati alla base della creazione del dataset, si è deciso di proseguire nelle analisi focalizzandosi solamente sul periodo 1995-2015, sia per quanto riguarda i dati di sviluppo degli insediamenti sia per quelli di crescita della popolazione, come anticipato nella sezione dei metodi di analisi degli stessi.

La Figura 18 riporta quindi la crescita della popolazione, espressa in numero assoluto di abitanti, dall'anno 1995 all'anno 2015, registrata per l'intera Indonesia, per la sola isola di Giava e per l'area di Surabaya. Da questi andamenti e dalle ordinate riportate si conferma il risultato ottenuto analizzando l'impronta degli insediamenti, ovvero che l'isola di Giava, per tutti gli anni del periodo di osservazione, ha ospitato circa metà della popolazione indonesiana totale.

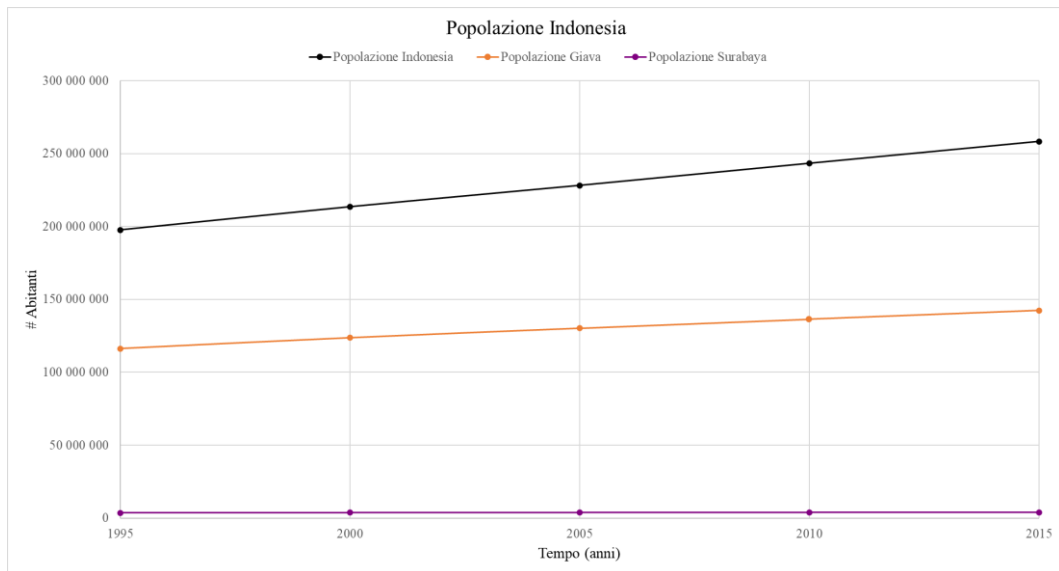


Figura 18: Sviluppo della popolazione in termini di abitanti assoluti totali dal 1995 al 2015 in Indonesia, Giava e Surabaya.

Successivamente all’ottenimento di questi risultati preliminari si è proseguito scendendo nel dettaglio dello studio in relazione agli eventi alluvionali e quindi in relazione alle zone qui definite come “Allagate”. In particolare, nelle sezioni successive sono riportati, in ordine, gli sviluppi assoluti degli insediamenti e della popolazione suddivisi tra le aree “Allagate” e “Non Allagate”, e a seguire i risultati ottenuti dell’analisi della distribuzione del totale delle aree insediate in quelle frequentemente inondate e nelle rimanenti e i risultati dello studio del tasso di occupazione delle aree insediabili di ogni zona. A tal fine, avendo definito le aree “Allagate” a partire dalla considerazione dei 15 eventi alluvionali selezionati, si è ottenuta la suddivisione della superficie totale insediabile dell’isola di Giava, pari a circa 127’221 km<sup>2</sup>, e dell’area della città di Surabaya, pari a circa 1’288 km<sup>2</sup>, nelle aree “Allagate” e “Non Allagate”, le cui estensioni sono mostrate nei grafici riportati nella Figura 19.

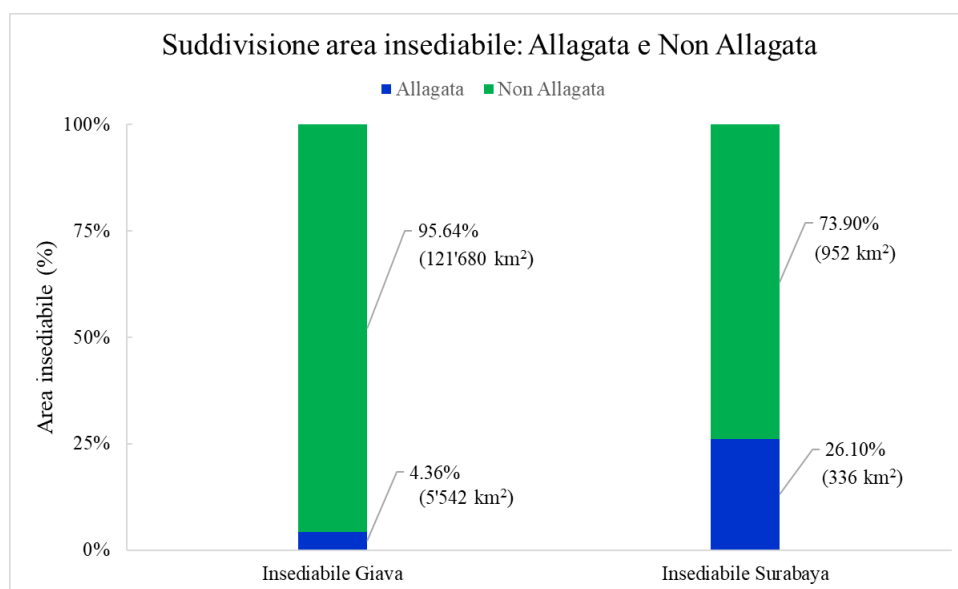


Figura 19: Estensione delle aree insediabili definite "Allagate" e "Non Allagate" sull'isola di Giava e nell'area di Surabaya.

Da questa si osserva che, come era lecito aspettarsi, le aree insediabili frequentemente colpite da eventi alluvionali sull'isola di Giava ricoprono una piccola percentuale del territorio, e dunque è lecito aspettarsi che gli sviluppi degli insediamenti e della popolazione in esse siano per entità, in termini assoluti, inferiori a quelli osservabili nelle zone lontane dai corsi d'acqua e dalla costa, non soggette ad elevato rischio di allagamento. Questo fatto è confermato dagli andamenti di sviluppi assoluti riportati nella Figura 20, ottenuti utilizzando la formulazione esplicitata dall'Equazione 1, ed è il motivo per cui successivamente si è condotta un'analisi in termini di velocità di occupazione delle aree insediabili ricadenti in zone frequentemente allagate (vale a dire il tasso di occupazione di tali aree, interpretabile dalla pendenza della curva e calcolabile attraverso regressione lineare come anticipato nella sezione dei Metodi).

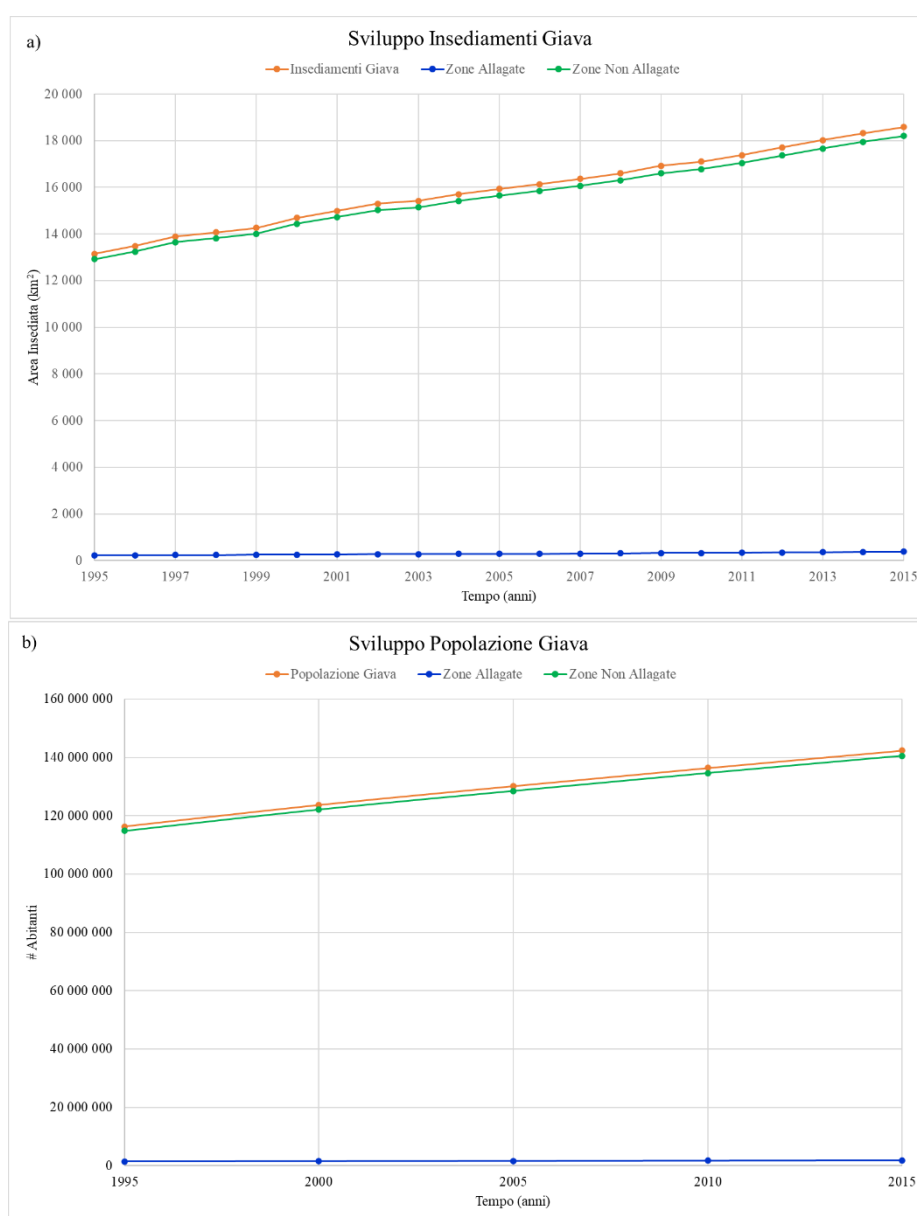


Figura 20: Sviluppi in termini assoluti dell'impronta degli insediamenti (a) e della popolazione (b) dal 1995 al 2015 sull'isola di Giava.



Inoltre, dalla suddivisione delle aree insediabili di Surabaya riportata nella Figura 19 e dai grafici riportati nella Figura 21, ottenuti analogamente ai precedenti, si osserva che la quota di aree insediabili allagate rispetto alla totale superficie insediabile nell'area costiera comprendente la città di Surabaya è maggiore, a conferma del fatto che questa città e le aree ad essa limitrofe sono tra le zone indonesiane più frequentemente soggette ad eventi di inondazione particolarmente rilevanti in termini di area colpita. Questo risultato conferma e supporta l'iniziale curiosità di indagare l'espansione degli insediamenti e l'evoluzione della popolazione in questa area a confronto con quelli riscontrabili sull'intera isola.

Inoltre, anche per questa area più ristretta, non sorprende il risultato ottenuto negli andamenti riportati, ovvero sviluppi degli insediamenti e della popolazione più rilevanti in termini assoluti nelle aree definite come non allagate, anche se si nota un preoccupante aumento della pendenza dell'andamento di sviluppo dell'impronta degli insediamenti nelle aree frequentemente soggette ad inondazione negli ultimi anni, soprattutto tra il 2011 e il 2015.

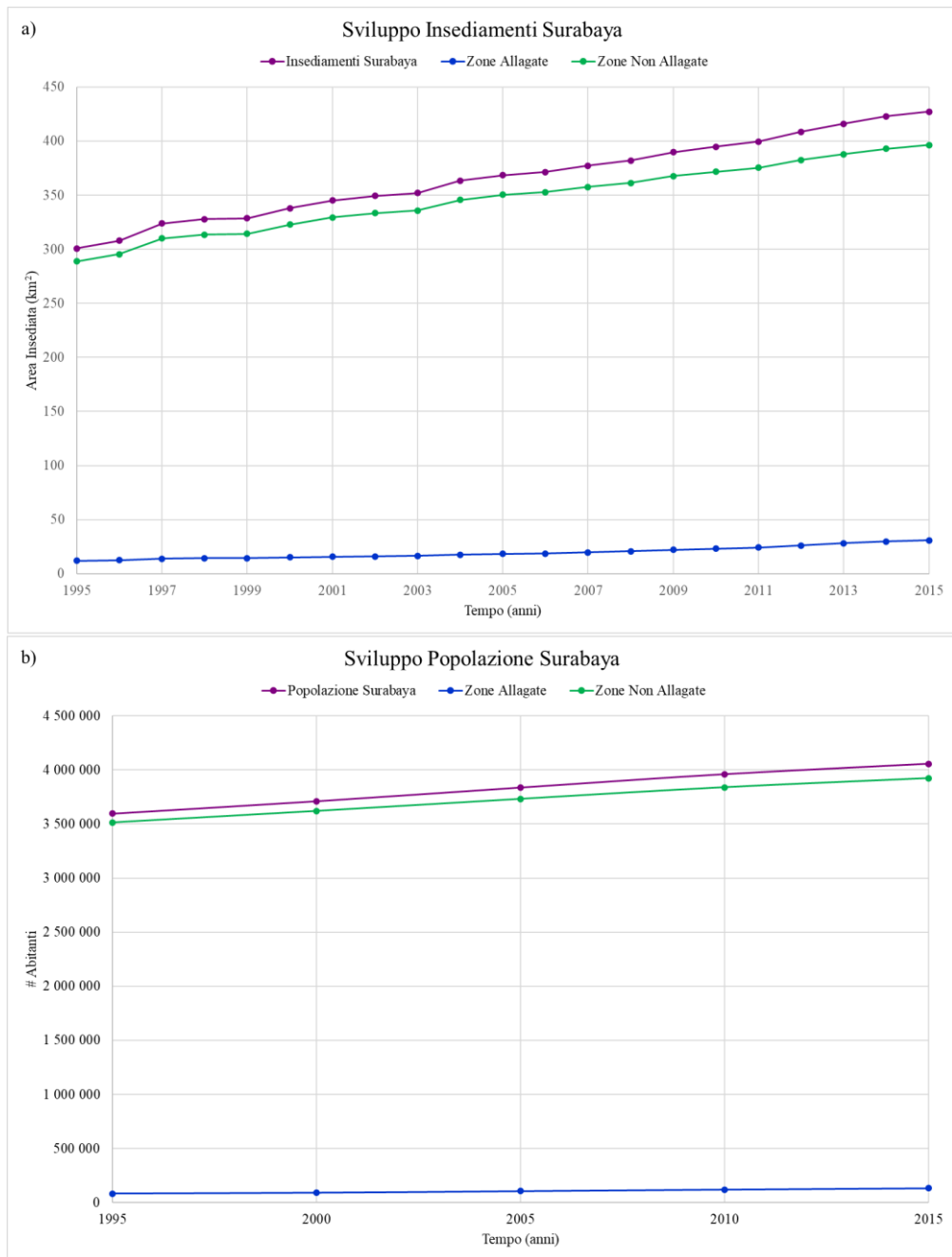


Figura 21: Sviluppi in termini assoluti dell'impronta degli insediamenti (a) e della popolazione (b) dal 1995 al 2015 nell'area di Surabaya.

## 4.1 Distribuzione degli insediamenti e della popolazione

Ricavate le informazioni di area insediata totale, area insediata nelle zone allagate e in quelle non allagate anno per anno dal 1995 al 2015, il grafico riportato nella Figura 22a mostra la quota, anno per anno, delle aree insediate ricadenti in zone allagate rispetto a quelle totali nell'isola di Giava. L'andamento speculare e complementare al 100% del precedente, quindi rappresentativo della quota di insediamenti ricadenti in aree non allagate, è riportato nella Figura 22b. In particolare, tali grafici riportano l'andamento della distribuzione, anno per anno, degli insediamenti nelle zone qui definite come "Allagate" e "Non Allagate", secondo le ordinate calcolate utilizzando le Espressioni 2 e 3 descritte nell'apposita sezione de metodi di analisi.

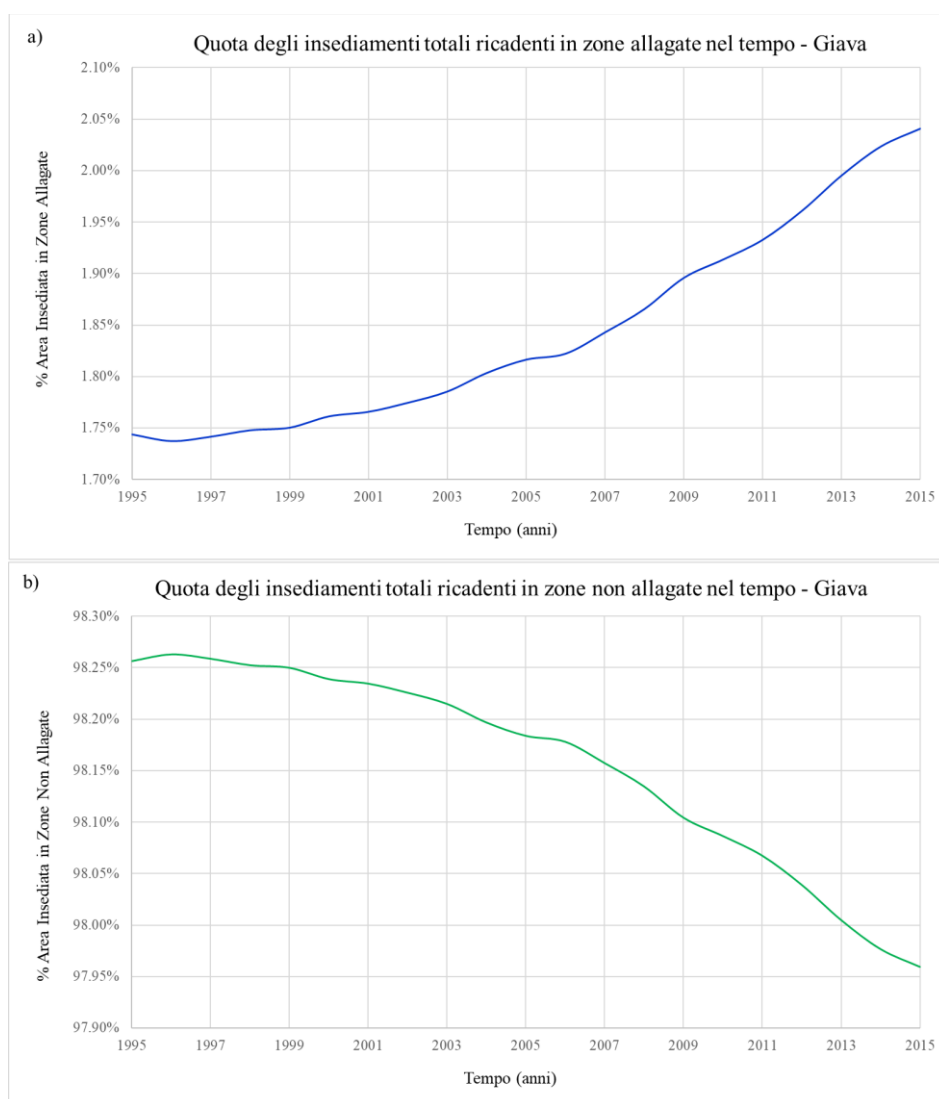


Figura 22: Distribuzione degli insediamenti nel tempo nelle aree allagate (a) e non allagate (b) sull'isola di Giava.

Data la natura del dataset WSF-Evolution, tutti gli insediamenti sono supposti in crescita e quindi in espansione negli anni, ma attraverso questi grafici è parso chiaro che la loro distribuzione nel periodo 1995-2015 è a favore delle zone definite nel presente studio come “Allagate”. Infatti, si osserva che la quota percentuale di insediamenti ricadenti in queste aree rispetto al totale delle aree insediate sull’isola è in aumento, in quanto passa da un 1.74 % nel 1995, corrispondente a circa 229 km<sup>2</sup> su circa 13’154 km<sup>2</sup> ad un 2.04% nel 2015, corrispondente a circa 379 km<sup>2</sup> su un totale di circa 18’580 km<sup>2</sup>. Limitatamente all’area comprendente la città di Surabaya, una delle più popolate zone costiere dell’isola di Giava, si osserva che tale distribuzione degli insediamenti dal 1995 al 2015 mostra un andamento ancora più a favore delle aree definite allagate. Infatti, osservando i grafici mostrati nella Figura 23a e 23b, si vede che nel 1995 il 4.01% delle aree costruite a Surabaya apparteneva alle zone qui definite allagate, ovvero circa 12 km<sup>2</sup> rispetto ai circa 300 km<sup>2</sup> costruiti totali, mentre nel 2015 questa percentuale è pari al 7.22%, con circa 31 km<sup>2</sup> di aree insediate nelle zone più soggette ad alluvione rispetto ai 427 km<sup>2</sup> costruiti nell’area di Surabaya.

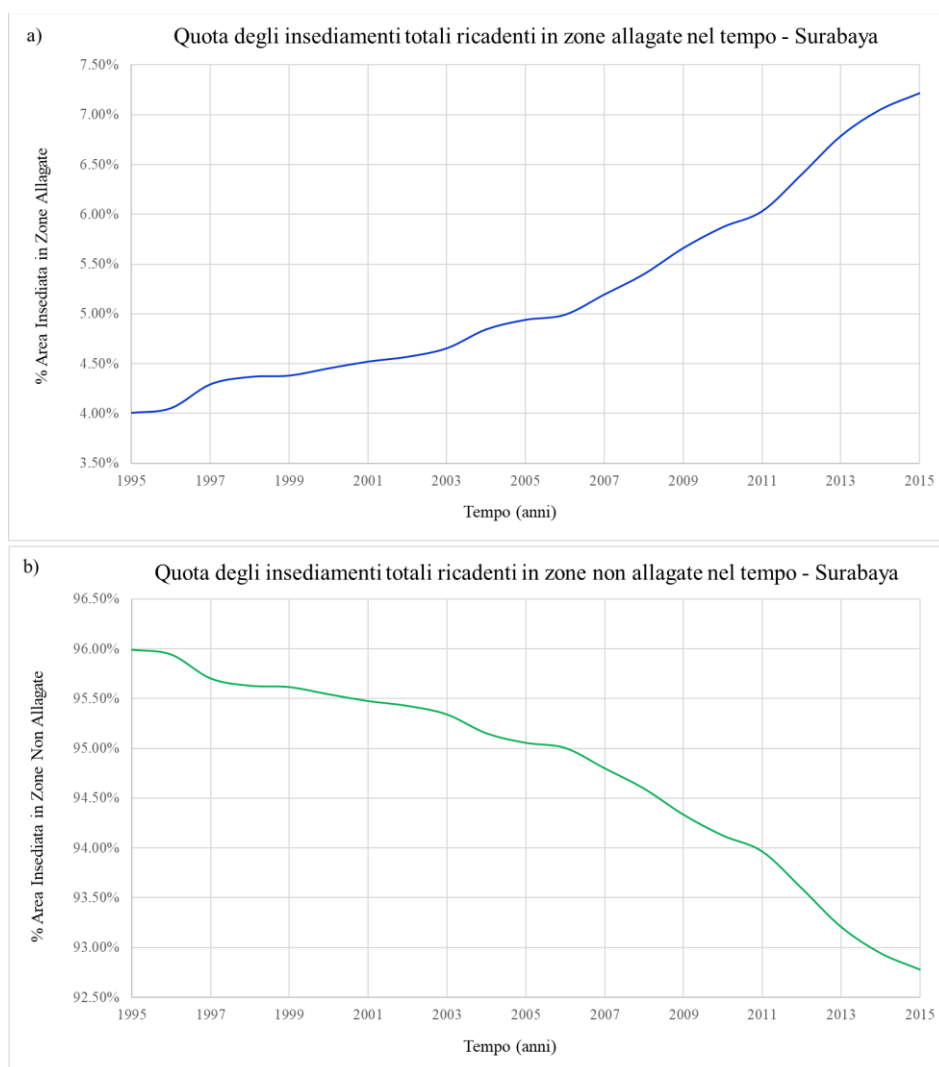


Figura 23: Distribuzione degli insediamenti nel tempo nelle aree allagate (a) e non allagate (b) nell’area della città di Surabaya.

Per analizzare nel dettaglio la distribuzione delle aree insediate ottenuta, si sono poi calcolate le crescite relative degli insediamenti totali, allagati e non allagati riportate nella Tabella 3, la quale riassume anche i valori di quota percentuale ed estensioni in chilometri quadrati dell'area insediata di ogni zona negli anni estremi del periodo di studio su Giava e Surabaya. Dai valori riportati in Tabella si evince come la crescita relativa degli insediamenti nelle zone qui definite allagate sia nettamente maggiore, soprattutto a Surabaya, di quella registrata per lo stesso arco temporale nelle zone ritenute sicure perché mai inondate dagli eventi alluvionali considerati nello studio.

Crescite relative 1995-2015: Sviluppo degli insediamenti					
Area di studio	1995		2015		Crescita Relativa (%) ( $\Delta_{Sup}$ )/Sup <sub>1995</sub>
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Quota (%)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Quota (%)	
<b>Giava</b>					
Area Insediata Totale	13154.28		18580.25		41.25%
Allagata	229.38	1.74%	379.17	2.04%	65.30%
Non Allagata	12924.90	98.26%	18201.08	97.96%	40.82%
<b>Surabaya</b>					
Area Insediata Totale	300.73		427.17		42.04%
Allagata	12.06	4.01%	30.84	7.22%	155.81%
Non Allagata	288.67	95.99%	396.33	92.78%	37.29%

Tabella 3: Crescite relative delle aree insediate totali, allagate e non allagate a Giava e Surabaya.

Avendo poi voluto analizzare allo stesso modo, e quindi secondo la formulazione dell'Equazione 4 riportata nella stessa sezione dei metodi di analisi, lo sviluppo della popolazione nelle stesse aree, si sono osservati un andamento e una tendenza simili ai precedenti sia sull'isola di Giava che nella specifica area contenente la città di Surabaya.

Infatti, dall'andamento riportato nella Figura 24, si nota che dei 116'320'024 abitanti totali a Giava nel 1995, 1.25% risiedeva nelle aree allagate, ovvero 1'454'415 persone, mentre nel 2015 questa percentuale è salita a 1.31%, con 1'869'899 abitanti in zone allagate su un totale di 142'370'303 abitanti.

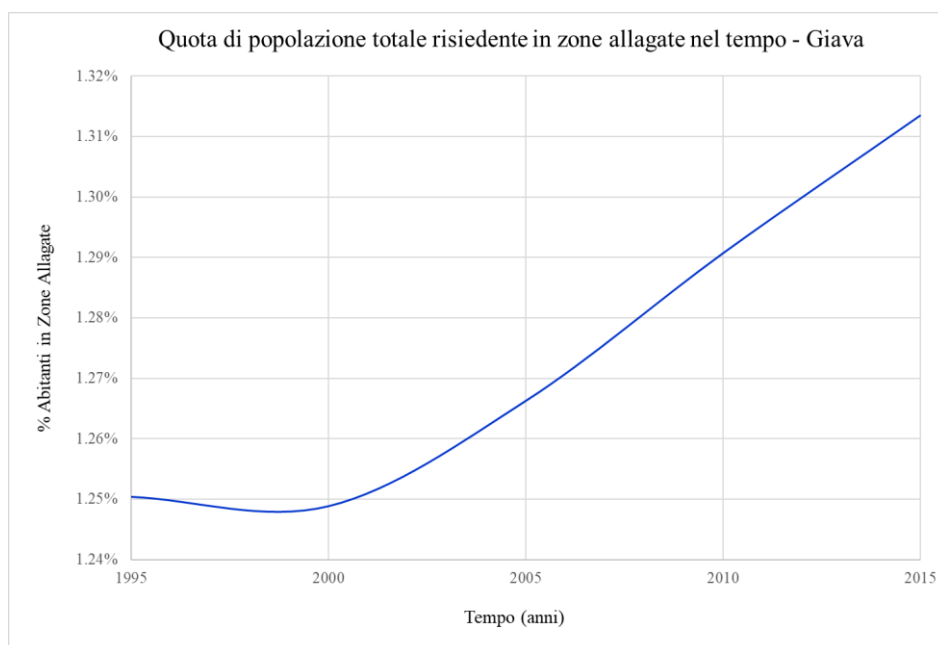


Figura 24: Quota della popolazione residente in aree definite allagate sull'isola di Giava.

Analogamente a quanto visto per l'impronta degli insediamenti, limitatamente all'area di Surabaya, l'aumento di questa percentuale è più accentuato, in quanto si passa da un 2.29% nel 1995 (corrispondente a 82'242 persone su un totale di 3'596'544) ad un 3.28% nel 2015 (corrispondente a 132'987 persone su un totale di 4'056'004), come riscontrabile dall'andamento in Figura 25.

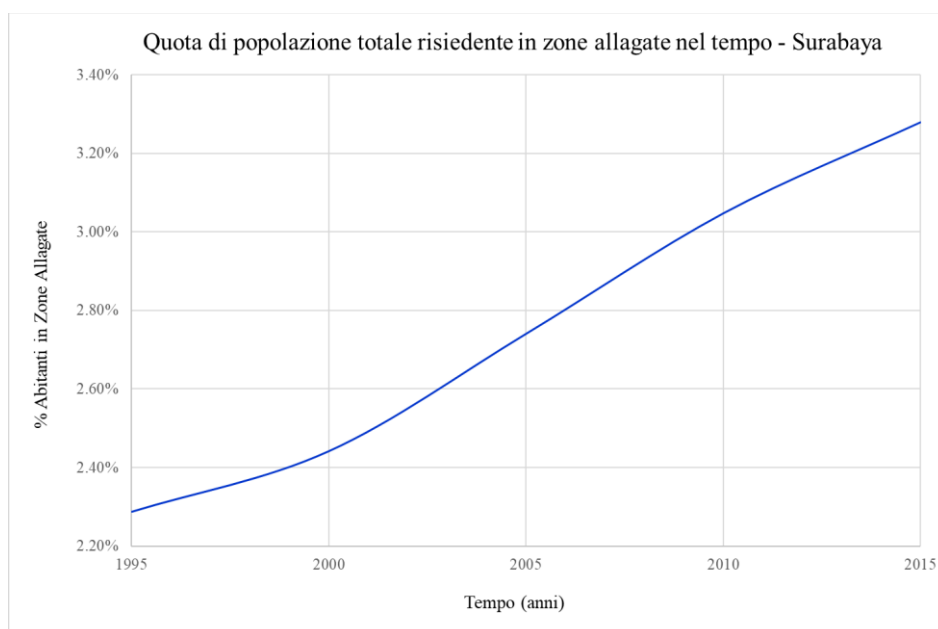


Figura 25: Quota della popolazione residente in aree definite allagate nell'area di Surabaya.

Analogamente a quanto riportato per l'insediato, la Tabella 4 raccoglie i valori di crescita relativa della popolazione totale e residente nelle aree allagate e non allagate. Anche qui si ottiene una crescita relativa della popolazione nettamente maggiore nelle aree definite allagate nello studio, a conferma del fatto che tali aree continuano ad essere insediate e popolate nonostante i pericoli annessi.

Crescite relative 1995-2015: Sviluppo popolazione					
Area di studio	1995		2015		Crescita Relativa (%) ( $\Delta_{Pop}$ )/Pop <sub>1995</sub>
	Popolazione (#Persone)	Quota (%)	Popolazione (#Persone)	Quota (%)	
<b>Giava</b>					
Popolazione Totale	116320024		142370303		22.40%
Allagata	1454415	1.25%	1869899	1.31%	28.57%
Non Allagata	114865609	98.75%	140500404	98.69%	22.32%
<b>Surabaya</b>					
Popolazione Totale	3596544		4056004		12.78%
Allagata	82242	2.29%	132987	3.28%	61.70%
Non Allagata	3514302	97.71%	3923017	96.72%	11.63%

Tabella 4. Crescite relative della popolazione totale e residente in aree allagate e non allagate a Giava e Surabaya.

Dato l'andamento negli anni della quota degli insediamenti e della popolazione nelle aree allagate, è poi parso interessante indagare come questi si sono a loro volta distribuiti nelle zone precedentemente definite come allagate 1-5, 6-10 e 11-14 volte a seconda di quanto spesso queste aree sono state colpite dagli eventi di inondazione considerati.

I risultati di tale analisi, ottenuti calcolando le ordinate attraverso le formulazioni riportate in precedenza (Equazioni 5 e 6), per quanto riguarda l'impronta degli insediamenti e la popolazione sull'isola di Giava sono riportati rispettivamente nella Figura 26a e 26b. Tali grafici riportano quindi le stesse ordinate dei precedenti, ma suddivise nelle rispettive classi di frequenza di inondazione delle aree qui definite allagate. Analogamente si possono osservare i risultati ottenuti per la città di Surabaya nella Figura 27a e 27b.



Figura 26: Distribuzione delle aree insediate (a) e della popolazione (b) ricadenti in zone definite allagate nelle tre classi con diversa frequenza registrata di allagamento 1-5, 6-10, 11-14 per l'isola di Giava.



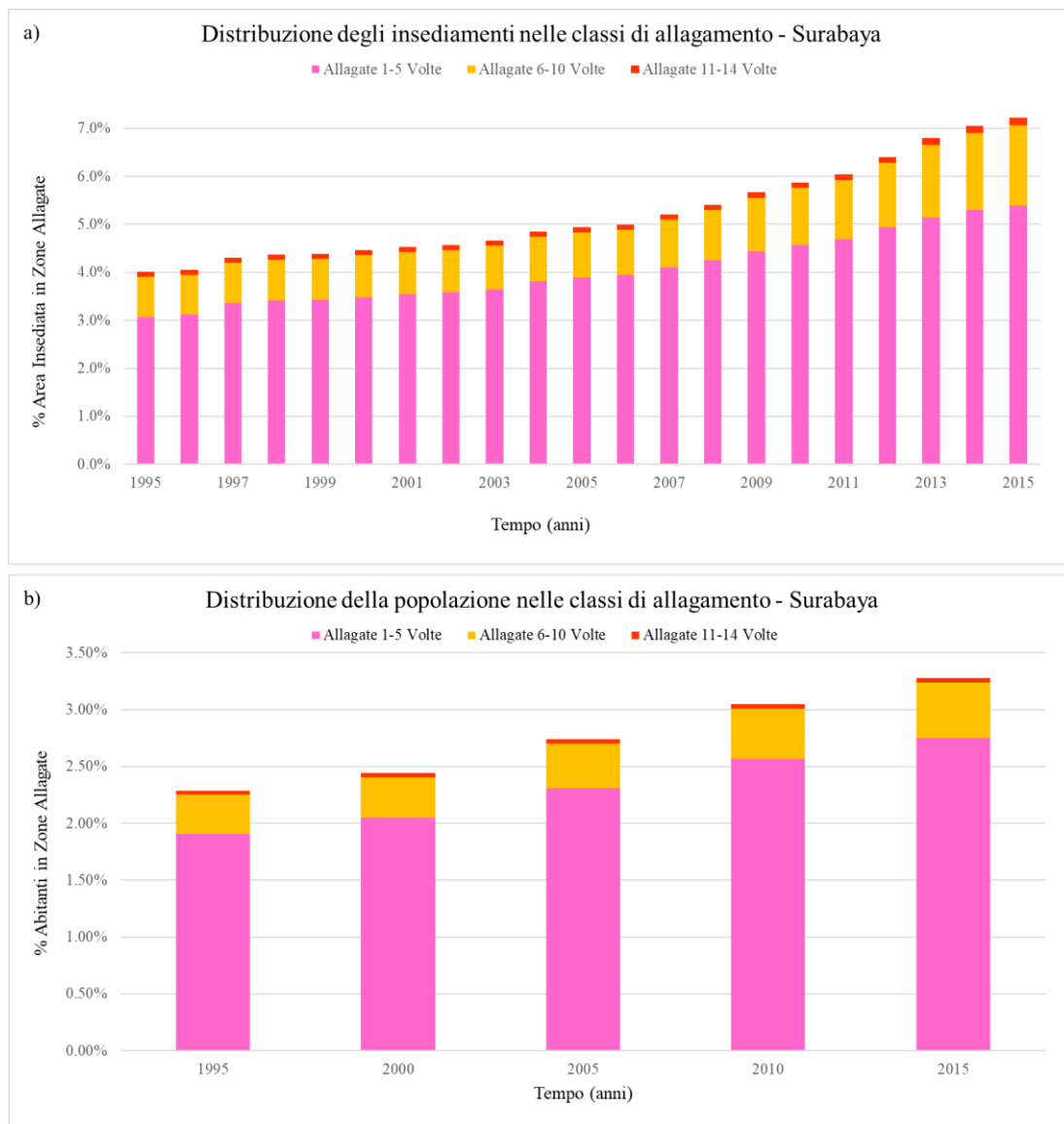


Figura 27: Distribuzione delle aree insediate (a) e della popolazione (b) ricadenti in zone definite allagate nelle tre classi con diversa frequenza registrata di allagamento 1-5, 6-10, 11-14 per la città di Surabaya.

Da questi si nota che la maggior parte di insediamenti e popolazione ricadenti nelle aree qui definite allagate, appartengono alla classe di allagamento 1-5 volte, ovvero quella caratterizzata dalla minore probabilità di inondazione, come era lecito aspettarsi e sperare. Tuttavia, questi risultati dimostrano anche che una percentuale non trascurabile degli insediamenti e della popolazione indonesiana risiedono in aree più frequentemente soggette a fenomeni di inondazione (classe 6-10 volte), e che questa percentuale è in aumento negli ultimi anni, soprattutto quella degli insediamenti. Questo risultato è meglio percepibile nei grafici mostrati nelle Figure 28 e 29, rispettivamente per l'area di Giava e quella di Surabaya, i quali riportano l'andamento nel tempo della proporzione esistente tra le tre classi di frequenza di inondazione, rese 100% l'area insediata (grafici a) e la popolazione (grafici b) ricadenti nelle aree allagate anno per anno.

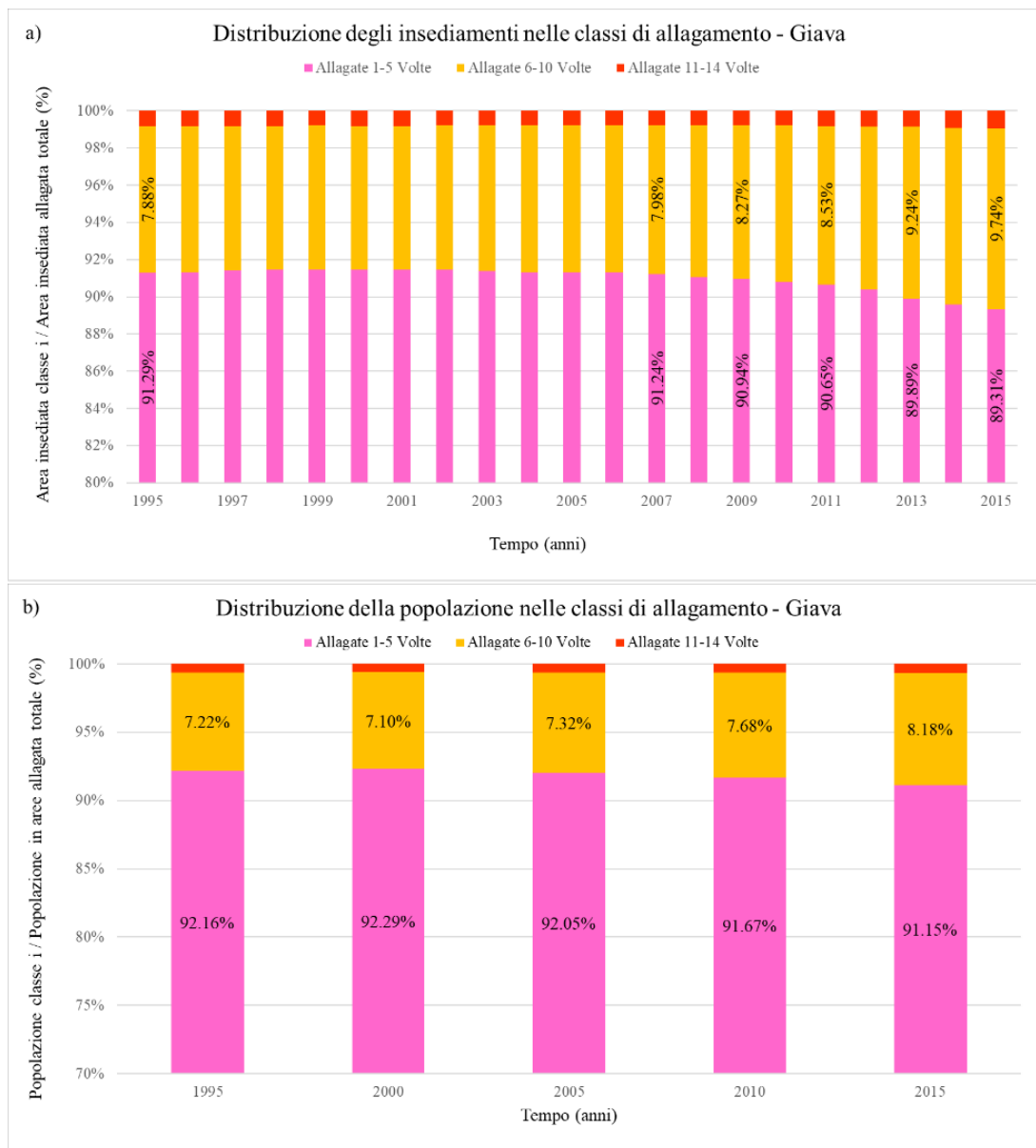


Figura 28: Distribuzione percentuale delle aree insediate (a) e della popolazione (b) nelle classi di frequenza di allagamento sull'isola di Giava.

In particolare, sull'isola di Giava si riscontra una distribuzione sia degli insediamenti (Figura 28a) che della popolazione (Figura 28b) a favore delle aree allagate 6-10 volte a scapito di quelle allagate 1-5 volte, mentre la porzione di insediamenti e popolazione nelle aree allagate 11-14 volte sembra rimanere pressoché costante nel periodo di studio. Nell'area della città di Surabaya invece, si evince un aumento della quota di insediamenti allagati nella classe 6-10 volte, ma una diminuzione della percentuale di popolazione residente in queste zone rispetto a quelle totalmente allagate.

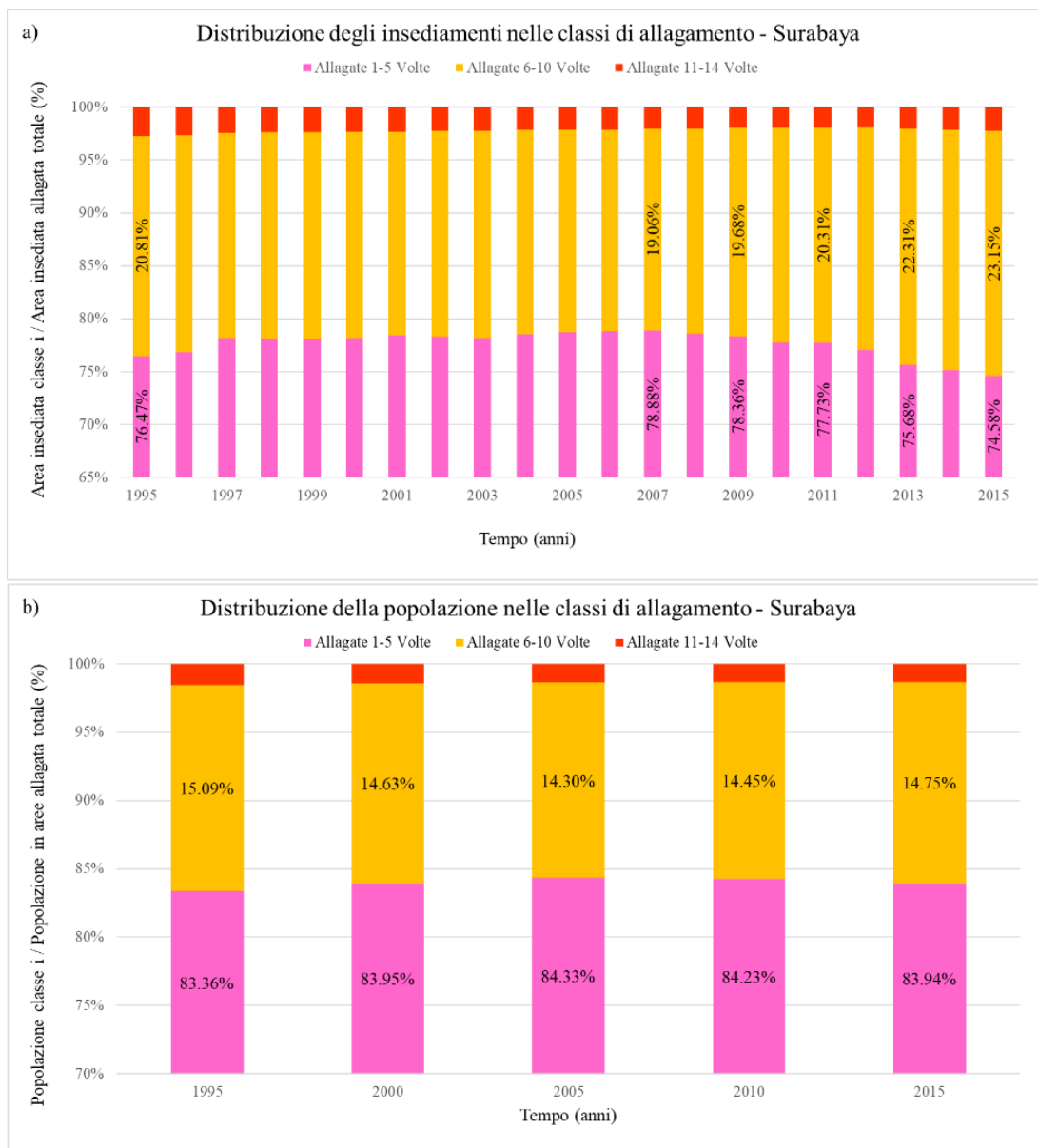


Figura 29: Distribuzione percentuale delle aree insediate (a) e della popolazione (b) nelle classi di frequenza di allagamento nella città di Surabaya.

Osservando i valori rappresentativi della distribuzione di insediamenti e popolazione dell'isola di Giava e della città di Surabaya per gli anni estremi del periodo di studio riportati nelle Tabelle 5 e 6 rispettivamente, si percepisce ancora meglio la variazione della proporzione esistente tra le tre classi di allagamento definite.

Crescite relative 1995-2015: Sviluppo degli insediamenti					
Area di studio	1995		2015		Crescita Relativa (%) ( $\Delta_{Sup}$ )/ $Sup_{1995}$
	Superficie (km <sup>2</sup> )	Quota (%)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Quota (%)	
<b>Giava</b>					
Area Insediate Allagata	229.38		379.17		65.30%
Allagata 1-5 Volte	209.3985	91.29%	338.6214	89.31%	61.71%
Allagata 6-10 Volte	18.07	7.88%	36.94	9.74%	104.43%
Allagata 11-14 Volte	1.91	0.83%	3.60	0.95%	88.51%
<b>Surabaya</b>					
Area Insediate Allagata	12.06		30.84		155.81%
Allagata 1-5 Volte	9.2187	76.47%	22.9986	74.58%	149.48%
Allagata 6-10 Volte	2.51	20.81%	7.14	23.15%	184.54%
Allagata 11-14 Volte	0.33	2.72%	0.70	2.27%	114.01%

Tabella 5: Crescite relative degli insediamenti in zone allagate nelle tre classi di frequenza di allagamento e distribuzione in esse.

Crescite relative 1995-2015: Sviluppo popolazione					
Area di studio	1995		2015		Crescita Relativa (%) ( $\Delta_{Pop}$ )/ $Pop_{1995}$
	Popolazione (#Persone)	Quota (%)	Popolazione (#Persone)	Quota (%)	
<b>Giava</b>					
Popolazione Totale Allagata	1454415		1869899		28.57%
Allagata 1-5 Volte	1340363	92.16%	1704330	91.15%	27.15%
Allagata 6-10 Volte	105044	7.22%	152984	8.18%	45.64%
Allagata 11-14 Volte	9007	0.62%	12585	0.67%	39.72%
<b>Surabaya</b>					
Popolazione Totale Allagata	82242		132987		61.70%
Allagata 1-5 Volte	68561	83.36%	111631	83.94%	62.82%
Allagata 6-10 Volte	12412	15.09%	19622	14.75%	58.09%
Allagata 11-14 Volte	1269	1.54%	1734	1.30%	36.58%

Tabella 6: Crescite relative della popolazione residente in zone allagate nelle tre classi di frequenza di allagamento e distribuzione in esse.

In particolare, per quanto riguarda gli insediamenti si è ottenuta una ridistribuzione nelle tre classi di allagamento a favore della seconda (6-10 volte) per entrambe le aree di studio, in quanto la crescita relativa di queste classi risulta spiccatamente maggiore di quella riscontrata nelle altre classi. Invece, per quanto riguarda lo sviluppo della popolazione si ottengono risultati diversi: per l'isola di Giava si è ottenuta la crescita relativa maggiore nelle aree allagate 6-10 volte, anche se la differenza con le altre crescite non è così spiccata come nei dati di insediamento; mentre nella città di Surabaya la popolazione residente in aree allagate si è relativamente sviluppata di più in quelle inondate 1-5 volte. Questo ultimo fatto potrebbe essere dovuto ad uno sviluppo di insediamenti non abitativi in queste aree. Inoltre, sia per quanto riguarda gli insediamenti che la popolazione sull'isola di Giava si osserva qui che anche la classe di allagamento "11-14 volte", e quindi quella caratterizzata da rischio più elevato, presenta una crescita relativa maggiore di quella che si verifica per le aree allagate con minore frequenza, fatto che non si era percepito nella rappresentazione grafica in Figura 28.

## 4.2 Occupazione area insediabile e sviluppo densità di popolazione

Questo secondo approccio è stato implementato al fine di studiare il tasso di occupazione dell'area insediabile nelle zone allagate e non allagate, sia sull'isola di Giava che nella città di Surabaya, così da poter visualizzare e confrontare con quale velocità la popolazione negli anni ha occupato i km<sup>2</sup> liberi nelle specifiche zone. Inoltre, con tale approccio è stato possibile considerare anche i dati di insediamento e di popolazione per l'intero stato, al fine di confrontare i tassi di crescita in esso, sull'isola di Giava e nella più confinata area di Surabaya. I grafici nella Figura 30 riportano questo paragone tra i tre andamenti di occupazione dell'area insediabile (Figura 30a) e i tre andamenti di crescita della densità di popolazione (Figura 30b) per le tre aree di studio. Questi sono stati ottenuti applicando l'adimensionalizzazione descritta in precedenza e quindi calcolando le ordinate attraverso le Equazioni 7 e 8, rispettivamente per i dati di impronta degli insediamenti e per quelli della popolazione.

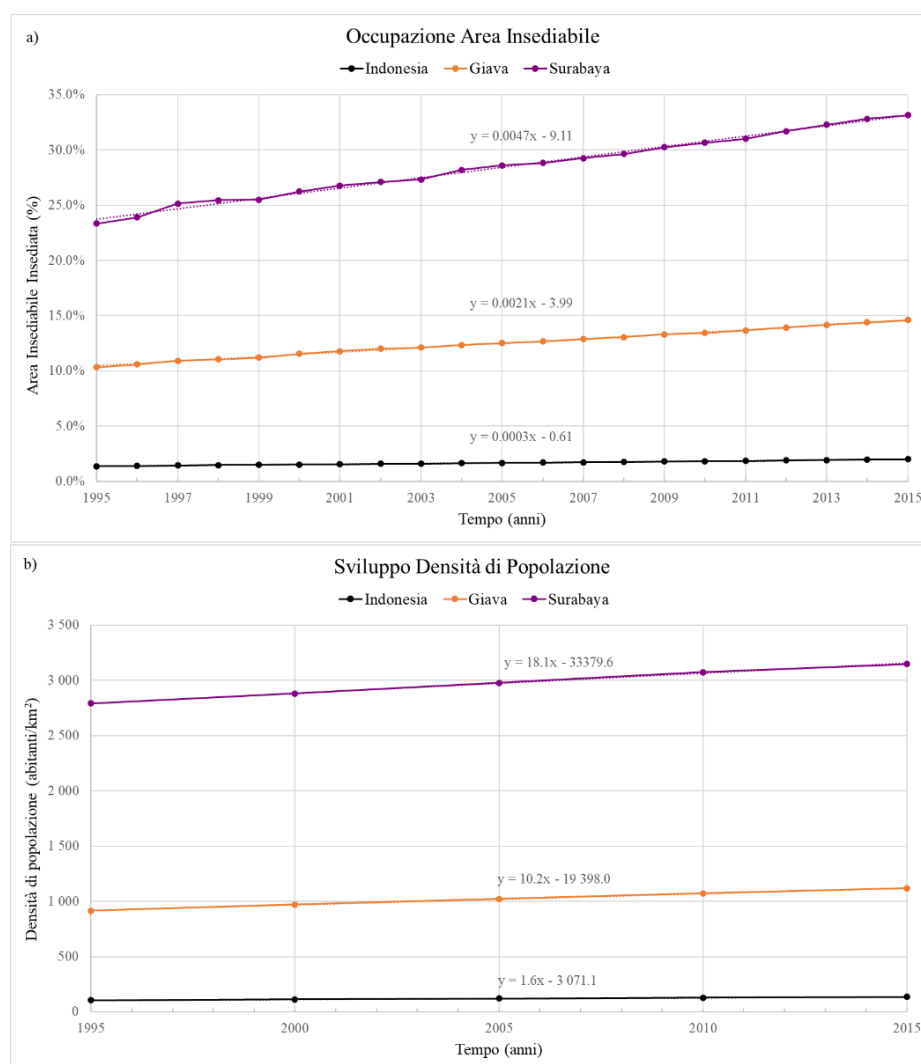


Figura 30: Occupazione delle aree insediabili totali (a) e sviluppo della densità di popolazione su esse (b) per l'Indonesia, Giava e Surabaya.

Tra gli andamenti riportati nei due grafici in Figura 30, è possibile notare una grande somiglianza, ed in particolare, per entrambi si osserva che l'area di Surabaya e dell'intera isola di Giava hanno andamenti molto più spiccati rispetto a quelli relativi all'intera Indonesia. Questo è un risultato atteso, in quanto esse sono tra le zone più popolate dell'Indonesia, la quale invece presenta una vasta area insediabile non occupata dalle persone, come osservato all'inizio del presente capitolo.

Infatti, come già notato precedentemente, siccome l'isola di Giava ospita circa la metà degli insediamenti e della popolazione, questi grafici confermano che le persone preferiscono insediarsi su essa piuttosto che popolare altre zone indonesiane più esterne e più lontane dai centri abitati più sviluppati e con maggiori risorse. Infatti, ciò che gli andamenti con maggiore pendenza indicano, sia relativi all'impronta degli insediamenti che alla popolazione, è che le persone tendono ad occupare e preferire le poche aree disponibili a Giava (ed in particolare a Surabaya), piuttosto che espandersi nel territorio circostante.

Una leggera differenza tra gli sviluppi degli insediamenti e della popolazione si nota sulla serie relativa alla città di Surabaya, in quanto l'andamento di sviluppo degli insediamenti risulta più spiccato del corrispondente della popolazione, e questo potrebbe significare che negli anni di studio si sono sviluppati più insediamenti, probabilmente industriali, economici, aziendali o di altro tipo piuttosto che civili e quindi piuttosto che la popolazione. Tale fatto trova inoltre riscontro con quanto osservato per l'area di Surabaya nel paragrafo precedente confrontando le crescite relative di insediamenti e popolazione nella città.

Ottenuti questi risultati si è quindi proceduto applicando la medesima metodologia (utilizzando le Equazioni 7 ed 8, rispettivamente) per indagare le stesse variabili, vale a dire ricercando il tasso di occupazione delle aree insediabili a partire dai dati WSF-Evolution e la densità di popolazione a partire dai dati GHS-POP, per le aree inizialmente definite come "Non Allagate", "Allagate", e "Allagate n Volte" per l'isola di Giava e la città di Surabaya.

Per quanto riguarda l'isola di Giava, dagli andamenti di occupazione delle aree insediabili mostrati nel grafico in Figura 31, il quale riporta anche lo sviluppo osservato relativo all'intera Indonesia, si osserva che sia la serie relativa alle aree non allagate, sia quella relativa alle aree allagate, si posizionano al di sopra, e con maggiore pendenza rispetto alla serie indonesiana. Questo fatto dimostra che le aree definite allagate a Giava vengono occupate più velocemente delle aree disabitate dell'intera Indonesia, magari caratterizzate da un bassissimo rischio di inondazione. Infatti, il tasso medio (pendenza) delle curve "Giava", "Allagate" e "Non allagate" è maggiore di quello della serie "Indonesia".

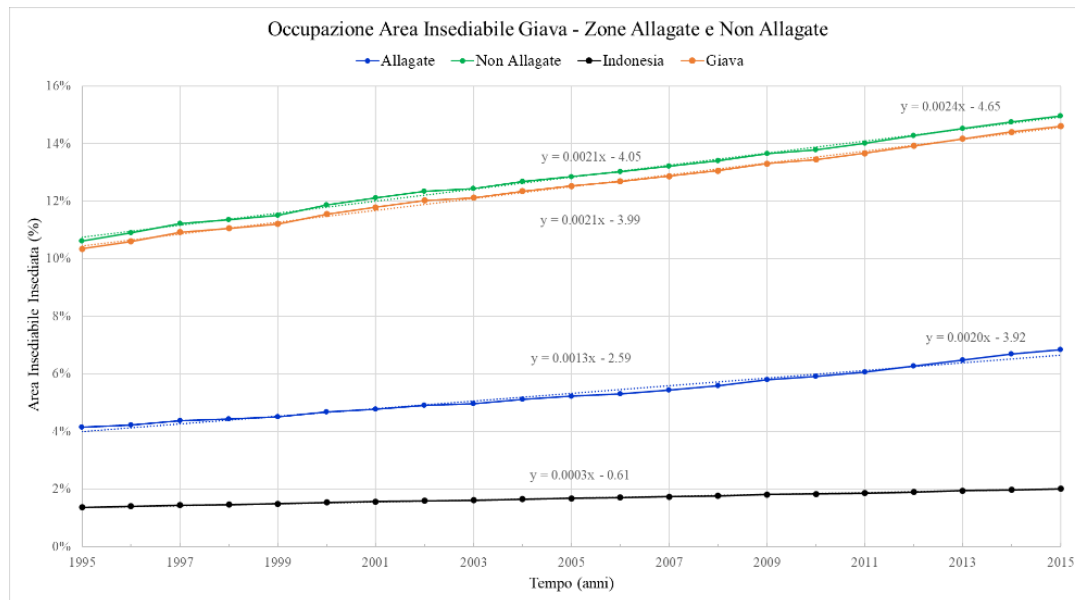


Figura 31: Occupazione delle aree insediabili allagate e non allagate a Giava.

Come osservato anche precedentemente analizzando dati relativi all'area di Surabaya (Figura 21), questi risultati mostrano che tutte le curve, anche quella rappresentativa dello sviluppo degli insediamenti nelle zone allagate, presentano un picco e un cambio di pendenza rilevante a partire dall'anno 2011. Calcolata infatti la pendenza media dell'andamento 2011-2015 per le serie "Allagate" e "Non Allagate", individuate dai valori dei coefficienti angolari delle linee di tendenza delle due serie per questo range temporale, si osserva che entrambe sono significativamente maggiori rispetto alla pendenza calcolata sull'intero periodo. Inoltre, per questi anni più recenti, la seconda rimane maggiore alla prima, ma l'entità della differenza tra esse si riduce notevolmente.

Confrontando poi il tasso di occupazione delle aree insediabili allagate in questo range temporale con quelli relativi alle altre aree insediabili su tutto il periodo di studio, si evince che questo è pressoché identico al tasso medio di occupazione delle serie "Non Allagate" e "Giava". Questo è un risultato che desta preoccupazione, in quanto è relativo agli anni più recenti, nei quali la consapevolezza del pericolo sarebbe dovuta aumentare, portando le persone ad evitare completamente di insediarsi in zone a rischio alluvione. Inoltre, questa similarità tra i tassi di occupazione dimostra che le persone in questi anni hanno occupato le zone disponibili tra quelle allagate e quelle non allagate alla stessa velocità, preferendo le prime a scapito di zone sicure e disponibili al di fuori dell'isola.

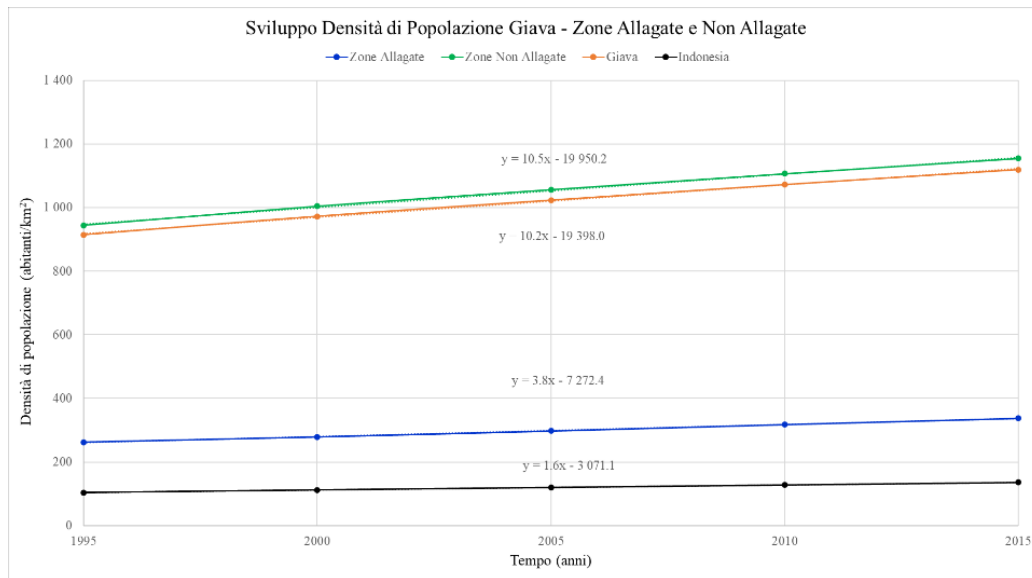


Figura 32: Sviluppo della densità di popolazione nelle aree allagate e non allagate a Giava.

Osservando poi i risultati in termini di densità abitativa riportati nella Figura 32, si vede che analogamente a prima il tasso di crescita maggiore appartiene alla serie “Non Allagate”, ma anche che quello della serie “Allagate” è maggiore di quello relativo all’intera Indonesia, fatto che conferma che la densità abitativa nelle aree qui definite come predisposte ad allagamento aumenta più rapidamente della densità abitativa calcolata sull’intero stato. Tuttavia, in questi risultati non si evince, a differenza di quanto ottenuto dai dati dell’impronta degli insediamenti, una spiccata variazione delle pendenze negli anni più recenti all’interno del periodo di studio.

Procedendo alla stessa maniera si sono ottenuti i risultati mostrati nella Figura 33 riferiti all’area della città di Surabaya, in termini di occupazione delle aree insediabili (a) e di sviluppo della densità di popolazione su esse (b). Analogamente a quanto osservato sull’intera isola, anche qui tutti gli andamenti relativi ai dati di impronta degli insediamenti risultano essere maggiori di quello riferente all’intera Indonesia; quindi, si conferma che generalmente le aree insediabili definite a rischio di allagamento vengono occupate più velocemente delle aree disabitate nell’intera Indonesia. Infatti, anche qui il tasso medio (pendenza) delle curve “Surabaya”, “Allagate” e “Non Allagate” è maggiore di quello della serie “Indonesia”. Inoltre, anche per questa area si riscontra un rilevante e più accentuato cambio di pendenza delle serie a partire dall’anno 2011.



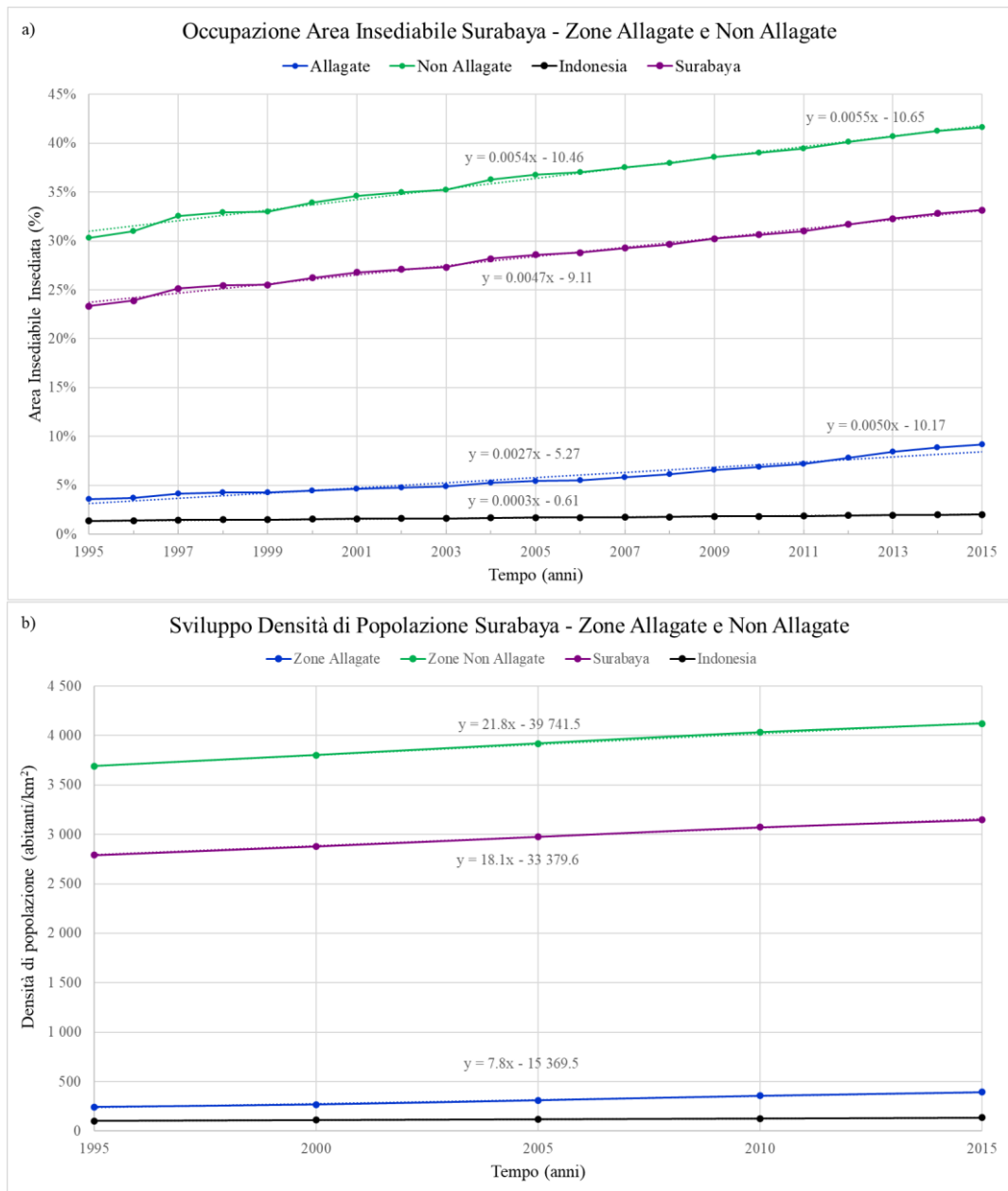


Figura 33: Occupazione delle aree insediabili allagate e non (a) e sviluppo della densità di popolazione su esse (b) a Surabaya.

Tuttavia, a differenza di prima, in questi grafici la pendenza della serie “Allagate” nel periodo dal 2011 al 2015 risulta più rilevante, in quanto risulta essere sempre di poco inferiore a quella della serie “Non Allagate” per lo stesso range temporale ed anche per l’intero periodo, ma risulta essere maggiore del tasso medio di crescita della densità abitativa sull’intera città per l’intero periodo 1995-2015. Ciò attesta che le aree disponibili nelle zone qui definite “Allagate”, negli anni 2011-2015, sono state occupate più velocemente di quanto registrato nella città per tutto il periodo di osservazione 1995-2015.

In termini di densità abitativa (Figura 33b), analogamente a prima, il maggiore tasso di crescita appartiene alla serie “Non Allagate” e quello minore alla serie “Indonesia”, a conferma del fatto che la densità abitativa nelle aree insediabili a rischio alluvione aumenta più rapidamente che nelle aree indonesiane più sicure e lontane. Anche qui non si evince, a differenza di quanto ottenuto coi dati dell'impronta degli insediamenti, una verticalizzazione negli anni più recenti del periodo di studio.

Preso atto di quanto visto per le specifiche serie delle zone frequentemente soggette ad allagamento, sempre in termini di occupazione delle aree disponibili e di densità abitativa, si riportano nella la Figura 34 gli esiti dell'elaborazione per le varie classi di allagamento definite in base alla frequenza di inondazione sull' isola di Giava e nella Figura 35 gli esiti della medesima analisi sull'area di Surabaya.

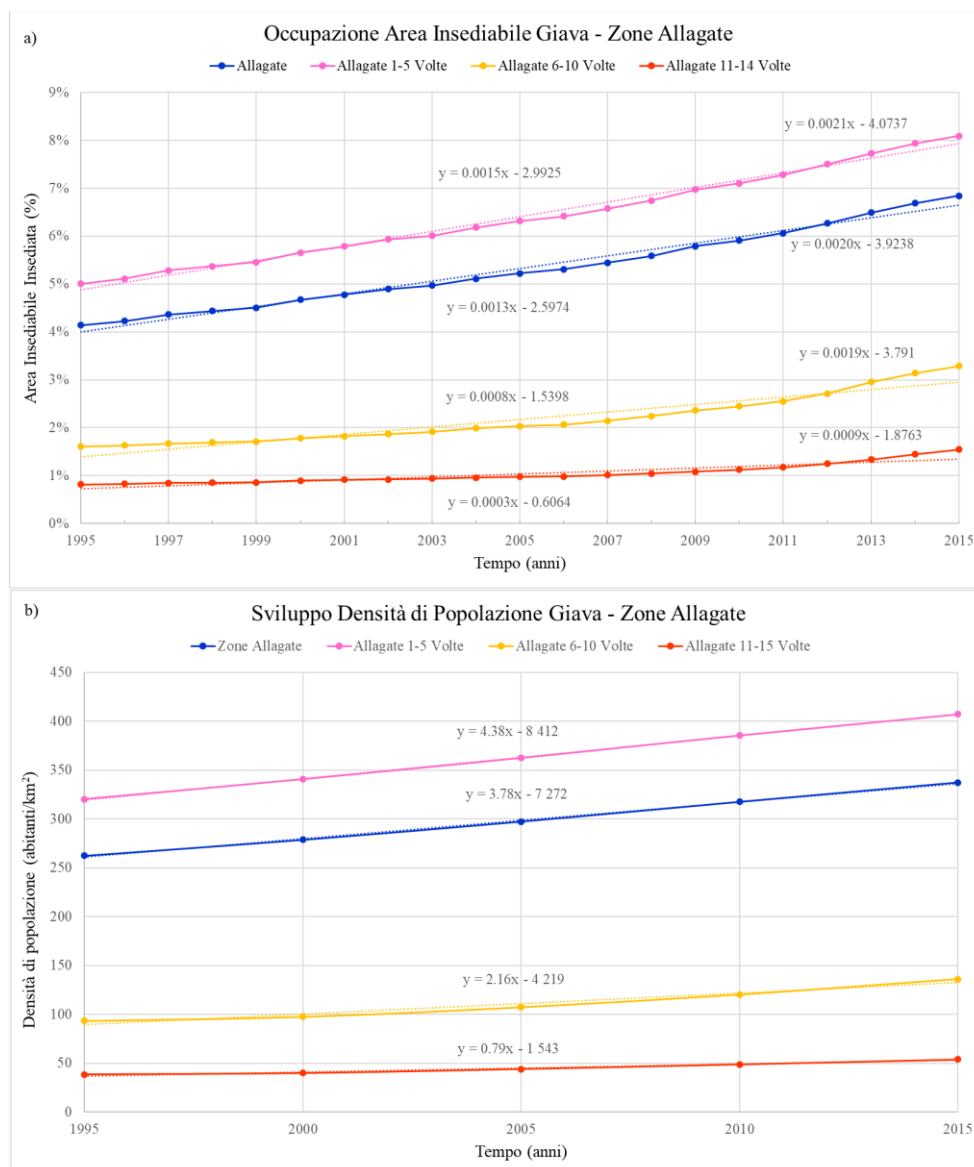


Figura 34: Occupazione delle aree insediabili allagate (a) e sviluppo della densità di popolazione su esse (b) per Giava.

Sull'area dell'isola di Giava (Figura 34) si nota bene la variazione della pendenza degli andamenti a partire dall'anno 2011 prima osservato, ed in particolare, le zone con tasso maggiore sono quelle allagate con frequenza di allagamento 1-5 e 6-10 volte, risultato rassicurante essendo queste le zone a minor probabilità di inondazione. Tuttavia, proprio queste zone, ma anche quelle della classe 11-14, mostrano un aumento di pendenza anche all'interno del periodo ristretto, a partire dall'anno 2013 (Figura 34a). Osservando poi la densità di popolazione in queste zone (Figura 34b), si osserva un più accentuato cambio di pendenza per le serie 1-5 e 6-10 a partire dall'anno 2010, fatto che non era stato percepito nell'analisi precedente. Generalmente, gli andamenti della densità di popolazione sembrano rispecchiare a pieno quelli dell'impronta degli insediamenti.

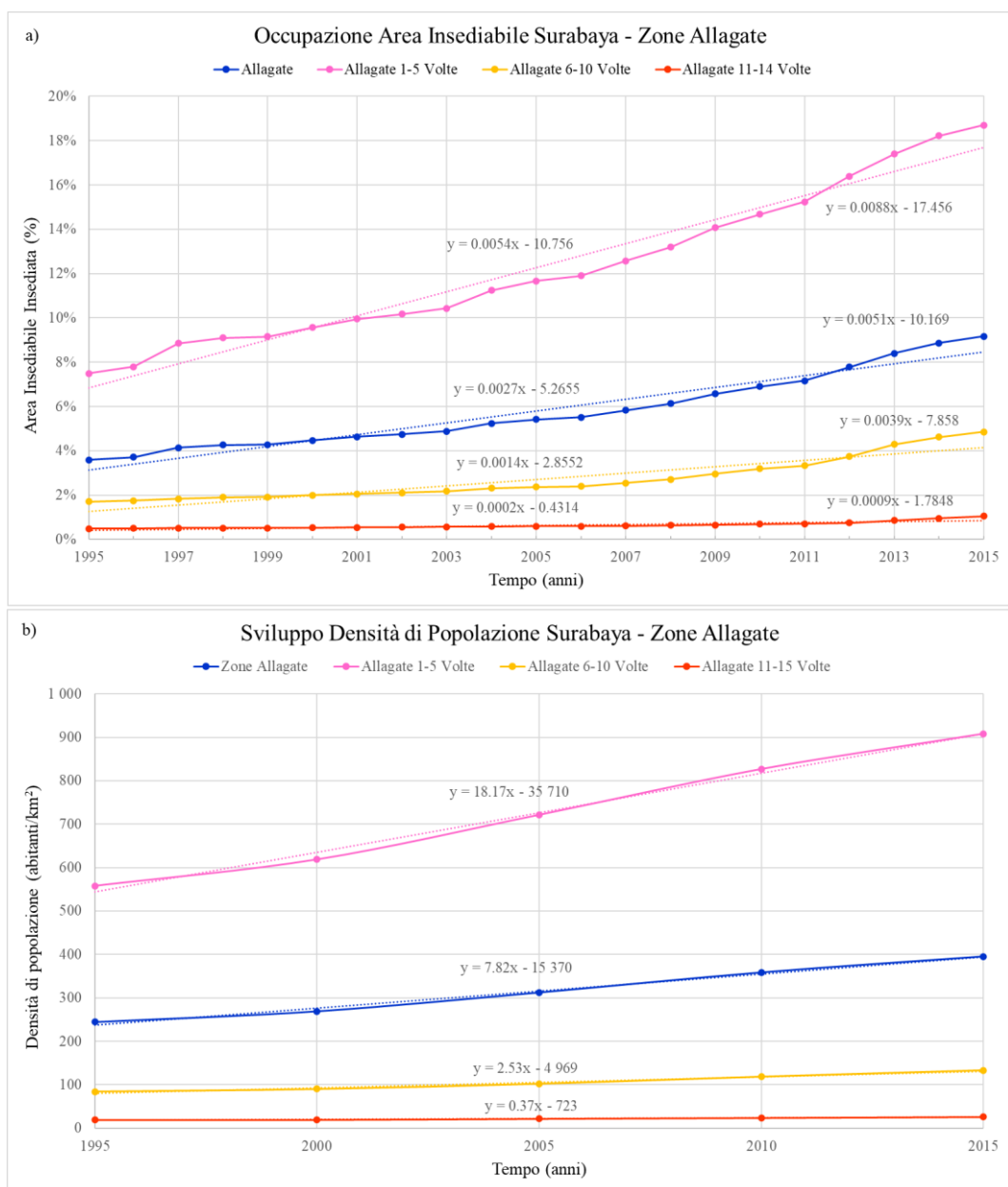


Figura 35: Occupazione delle aree insediabili allagate (a) e sviluppo della densità di popolazione su esse (b) per Surabaya.

Gli andamenti ottenuti per la città di Surabaya (Figura 35a e 35b) mostrano cambi di pendenze ancora più accentuati e tassi di crescita maggiori. La serie rappresentativa delle zone allagate 1-5 volte, sia per i dati di insediamento che per quelli di popolazione, è molto più spiccata delle altre, e presenta il tasso di crescita massimo per il periodo 2011-2015. Mentre per Giava le zone 1-5 e 6-10 presentavano per il periodo 2011-2015 circa lo stesso tasso di crescita, qui la serie “Allagate 1-5 Volte” ha pendenza più accentuata delle altre serie, risultato rassicurante in quanto tra le zone allagate che continuano ad essere insediate velocemente, l’area insediabile che viene occupata più velocemente appartiene alle aree con minor probabilità di allagamento.

Per facilitare il confronto dei vari coefficienti angolari delle rette di tendenza calcolate e commentate nei grafici mostrati in questo paragrafo si riporta la Tabella 7, la quale racchiude tutti i valori visti in termini di velocità di occupazione delle aree insediabili (derivanti dall’analisi dei dati di impronta degli insediamenti WSF-Evolution) e di crescita della densità abitativa (derivanti dall’analisi dei dati di popolazione GHS-POP) per tutte le aree e zone di interesse.

<b>Tassi di crescita: Occupazione delle aree insediabili e Sviluppo della densità abitativa</b>						
Area di Studio	Occupazione aree insediabili		Sviluppo densità abitativa	Occupazione aree insediabili		Sviluppo densità abitativa
	Valori estremi periodo (%)			Tassi di crescita (1/anni)		
	1995-2015	2011-2015	Valori estremi periodo (ab/km <sup>2</sup> )	1995-2015	2011-2015	1995-2015
Indonesia	1.36-2.02		104-135	0.0003		1.60
Giava	10.34-14.60		914-1119	0.0021		10.20
Non Allagate	10.62-14.96	14.01-14.96	944-1155	0.0021	0.0024	10.50
Allagate	4.14-6.84	6.06-6.84	262-337	0.0013	0.0020	3.78
Allagate 1-5 Volte	5.00-8.09	7.28-8.09	320-407	0.0015	0.0021	4.38
Allagate 6-10 Volte	1.61-3.29	2.55-3.29	93-136	0.0008	0.0019	2.16
Allagate 11-14 Volte	0.82-1.54	1.17-1.54	39-54	0.0003	0.0009	0.79
Surabaya	23.34-33.15		2791-3148	0.0047		18.10
Non Allagate	30.32-41.63	39.43-41.63	3691-4120	0.0054	0.0055	21.80
Allagate	3.58-9.17	7.17-9.17	245-395	0.0021	0.0021	18.20
Allagate 1-5 Volte	7.50-18.70	15.24-18.70	558-908	0.0054	0.0088	2.50
Allagate 6-10 Volte	1.71-4.86	3.33-4.86	84-133	0.0014	0.0039	2.50
Allagate 11-14 Volte	0.49-1.06	0.71-1.06	19-26	0.0002	0.0009	0.37

Tabella 7: Tassi di crescita - Analisi dell'occupazione delle aree insediabili e della densità abitativa.

## 5. Discussione e sviluppi futuri

In conclusione ai risultati dell'analisi effettuata è opportuno riservare un capitolo a quelle che sono le sue limitazioni e alla discussione dell'approccio applicato, nonché alle conseguenze derivanti da determinate ipotesi fatte durante lo studio. In particolare, sia la natura della metodologia applicata, sia i database utilizzati nelle analisi presentano limitazioni e implicano conseguenze discusse in questa sezione.

Per quanto riguarda il focus dell'analisi, ovvero studiare le dinamiche di sviluppo dell'impronta degli insediamenti e della popolazione in relazione ad eventi alluvionali verificatisi nel territorio dell'isola di Giava, è necessario porre attenzione a quali e quanti eventi estremi sono stati considerati, nonché a come essi sono stati analizzati. In particolare, la disponibilità di dati geospaziali che ha permesso la definizione delle aree "Allagate" e "Non Allagate" sull'isola di Giava è limitata in quantità e per tipologia, in quanto, per la natura del database, solo una porzione di eventi rilevanti è stata considerata. Per questo motivo, l'integrazione di ulteriori database con più ampia disponibilità di dati, sia geospaziali che di altra tipologia, aiuterebbe ad aumentare la precisione delle analisi. Inoltre, l'utilizzo congiunto delle mappe di inondazione considerate ha portato ad una definizione univoca e costante delle aree "Allagate", "Non Allagate" ed "Allagate n Volte". Tale definizione risulta essere estremamente conservativa, in quanto basata su un numero di eventi limitato (15) avvenuti in un range di tempo altrettanto limitato (2003-2015) ed esclude in questo modo la possibilità di considerare che altre aree possano essere state colpite da alluvione nel passato, ma soprattutto che altre aree possano essere soggette ad elevato rischio nel futuro, fatto altamente probabile a causa del cambiamento climatico e della conseguente intensificazione degli eventi estremi (IPCC, Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022). Infatti, gli eventi alluvionali estremi, sempre più intensamente e frequentemente creano disagi alla popolazione sia in Indonesia sia in tanti altri paesi del mondo (Seneviratne, et al., 2021), quindi una integrazione di dati ad alta risoluzione sarebbe necessaria al fine di meglio comprendere e verificare le logiche di sviluppo della popolazione di fronte alle problematiche del cambiamento climatico. Inoltre, in questo studio non sono state analizzate eventuali strutture di protezione dalle alluvioni presenti sul territorio, mentre una loro analisi potrebbe portare ad una definizione più accurata di quelle che sono, e considerando la possibile intensificazione degli eventi, quelle che saranno, le zone insediate con più alta probabilità di allagamento e quindi con più alto rischio per la popolazione. Ripetendo quindi le analisi tenendo in considerazione questi fatti, e cercando di migliorare le condizioni alla base delle stesse, si potrebbe incorrere in un risultato ancora più preoccupante, in quanto si potrebbero ottenere più numerose aree insediate e persone esposte ad elevati rischi di allagamento di quelle ottenute nel presente studio.

Per quanto riguarda gli altri dataset che hanno permesso tale analisi, è necessario innanzitutto specificare che l'elaborazione combinata di diversi dati a diversa risoluzione ha comportato una leggera distorsione degli stessi, che potrebbe aver implicato una perdita di informazioni. Inoltre, ogni dataset utilizzato si è visto presentare alcune limitazioni, e primo fra tutti, il dataset WSF-Evolution, il quale, data la scarsa rappresentatività dello sviluppo dell'impronta degli insediamenti nei primi anni disponibili, ha portato alla scelta di restringimento del range temporale di studio, limitando così le analisi. In secondo luogo, l'utilizzo combinato di questo dataset e dei confini amministrativi delle aree di studio ricavati da GADM, si è visto portare ad una perdita di informazioni. Infatti, selezionando i dati di impronta degli insediamenti all'interno dei confini ottenuti, si è visto che alcuni pixel registrati come insediati negli anni più recenti, e talvolta ricadenti nelle aree definite come "Allagate" più costiere, venivano esclusi dalle analisi. Questa limitazione, dunque, ha probabilmente portato a sottostimare gli insediamenti e la popolazione totali dell'isola di Giava, ma anche la percentuale di essi ricadente in zone definite "Allagate" nello studio. Per questo motivo, ripercorrere le analisi utilizzando una diversa fonte di selezione potrebbe portare ad ottenere le estensioni di insediamenti in aree frequentemente allagate più elevate, e ad un conseguente sviluppo delle stesse ancora più rilevante. Un secondo aspetto che si vuole evidenziare in merito ai dati di insediamento, è che in Indonesia, ed in particolare nell'isola di Giava, lo sviluppo urbano potrebbe anche essere dovuto ad insediamenti abusivi che circondano la zona centrale delle città e si estendono su varie aree periferiche. Infatti, gli insediamenti informali illegali esistono in diverse città e villaggi sull'isola, e sono costruiti su terreni non a norma, come lungo le rive dei fiumi, sui pendii dei terreni collinari e lungo i binari dei treni (Santosa, 2005) e questi potrebbero non essere stati visualizzati e considerati nell'analisi, con conseguente possibile sottostima della popolazione esposta alle inondazioni.

Per quanto riguarda invece l'area di studio, l'Indonesia è persa fin dall'inizio molto interessante da analizzare, in quanto uno dei Paesi al mondo più esposti ai disastri naturali, spesso vittima di vari rischi geofisici e legati al clima. In particolare, nel 2021 le inondazioni sono state il disastro naturale più frequente in Indonesia, con un totale di circa 800 casi e a differenza di altri eventi catastrofici come frane, uragani, siccità, incendi boschivi e terremoti, i casi di alluvione hanno mostrato un aumento di intensità rispetto al decennio precedente (Permana, 2023). Essendo poi Giava una delle zone più colpite da inondazione, e data la disponibilità di mappe spaziali rappresentanti i passati eventi di inondazione dati geospaziali (GFD, 2022) su essa, si è voluto concentrare l'analisi in questa isola, al fine di studiarne le dinamiche interne di sviluppo della popolazione e degli insediamenti. Parlando della gestione del rischio da inondazioni urbane, all'interno dell'isola di Giava le singole città affrontano diversamente la problematica, anche se le condizioni geografiche e di andamento delle precipitazioni sono più o meno le stesse, e questo si ripercuote anche sullo sviluppo della

popolazione. I funzionari pubblici indonesiani di solito attribuiscono la cattiva gestione delle inondazioni all'intensità delle precipitazioni, che è stata esacerbata dal cambiamento climatico (IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023), e sostengono che i sistemi di pompaggio, le arginature, i bacini di ritenzione e i canali di drenaggio non sono in grado di gestire lo straripamento delle acque superficiali a causa delle piogge estreme, ma al di là degli ambiti ingegneristici e infrastrutturali, le strutture di potere esistenti e i processi politici svolgono un ruolo cruciale nel plasmare la capacità di una città di far fronte alle inondazioni (Permana, 2023). Infatti, le infrastrutture di difesa dalle inondazioni in Indonesia si basano su sistemi di drenaggio per mantenere il flusso dell'acqua superficiale, riducendo lo straripamento che porta ai fenomeni di inondazione, e i governi locali hanno l'autorità di gestire i canali di drenaggio costruiti da soggetti privati, per garantire il funzionamento ottimale della rete drenante delle città (Permana, 2023). Dunque, mentre il fallimento della gestione delle inondazioni in alcune città potrebbe essere influenzato da fattori non politici ma strutturali e ingegneristici, la letteratura scientifica riporta che in alcune città la dimensione politica delle pratiche di gestione di mitigazione del rischio gioca un ruolo importante. A tal proposito, Permana et al. riportano un confronto tra le politiche messe in atto in tre città dell'isola di Giava, Surabaya, Semarang e Bandung, da cui si evince che nonostante i loro governi locali abbiano la stessa autorità nella gestione delle infrastrutture di difesa dalle inondazioni, la prima città, nonché quella analizzata nel presente studio di tesi, ottiene risultati migliori delle altre, nonostante queste siano dotate di numerosi grandi progetti infrastrutturali. Tali informazioni riportate nella letteratura indonesiana fanno suscitare la curiosità di espandere la presente analisi ad altre città dell'isola, disponibilità di dati permettendo, in quanto avendo osservato uno sviluppo attivo della popolazione nelle numerose zone frequentemente allagate di Surabaya, è lecito chiedersi quali dinamiche presentino le altre località. In relazione ai risultati ottenuti, inoltre, tali informazioni porterebbero a pensare che gli abitanti della città di Surabaya abitino in zone soggette a potenziale rischio da inondazione in virtù di un senso di sicurezza derivante dalla migliore capacità di gestione delle acque rispetto ad altre città, ma servirebbe uno studio più approfondito e una maggiore disponibilità di dati per sostenere questa ipotesi.

Un'altra città dell'isola che ha attirato inizialmente la curiosità al fine dello studio, ma non è stata presa in considerazione a causa di mancata disponibilità di dati satellitari ad alta risoluzione, è la capitale economica e amministrativa dell'Indonesia, Giacarta, in quanto è il luogo in cui si verificano più eventi di inondazione ogni anno, e per cui le conseguenze, in termini di persone colpite e sfollate, e di insediamenti distrutti, sono le più rilevanti. Su questa area le condizioni che portano al verificarsi di eventi estremi molto frequenti e molto intensi sono numerose e di diversa tipologia: climatiche, geofisiche, di pianificazione civile, di urbanizzazione, di uso del territorio, ma anche economiche-

sociali. In particolare, la città costiera è attraversata da 13 fiumi che spesso rompono gli argini durante la stagione dei monsoni esponendo le persone ad elevati rischi, ma sono il pompaggio non regolamentato delle acque sotterranee, che intensifica il fenomeno di subsidenza naturale dell'area, la crescita degli insediamenti informali, i rapidi cambiamenti nell'uso del territorio e l'inefficienza del sistema di drenaggio che hanno aumentato la vulnerabilità della città alle inondazioni (IDCM, 2023). Infatti, il pompaggio eccessivo (legalizzato e non), così come la pressione verticale esercitata dagli edifici sulla falda freatica su cui giace la città sono causa diretta del cedimento del terreno su cui Giacarta è costruita (M.I, 2022). Questo cedimento, l'innalzamento del livello dei mari e all'aumento della frequenza dei cicloni tropicali sollecitati dal cambiamento climatico, espongono sempre di più la città alle alluvioni. Anche varie attività umane, tra cui la deforestazione, il degrado del territorio e l'urbanizzazione non pianificata, stanno aumentando il rischio di sfollamento conseguente a fenomeni di inondazione nella capitale, e sarebbe interessante analizzare come questi fatti potrebbero ripercuotersi sulle altre città dell'isola di Giava, che a loro volta mostrano difficoltà nella gestione dei rischi e dello sviluppo della popolazione. Inoltre, il rapporto dell'International Displacement Monitoring Center del 2023 riferisce che le persone più colpite dalle inondazioni in questa città vivono in case di scarsa qualità vicino alla riva del fiume, dove l'affitto è minore a causa del rischio elevato, aggravato anche dalla pessima gestione dei rifiuti in queste aree densamente abitate; quindi, sarebbe interessante ampliare l'analisi in queste zone integrando anche considerazioni e dati in ambito economico-sociale, al fine di poter valutare anche le circostanze nelle quali sono avvenuti gli eventi più rilevanti.

Inoltre, si ritiene necessario discutere i principali risultati ottenuti in merito alle dinamiche di espansione degli insediamenti e di sviluppo della popolazione sull'isola di Giava in relazione alle aree che qui sono state considerate come insediabili, soggette o meno ad alta probabilità di inondazione. In particolare, l'analisi della distribuzione degli insediamenti nelle aree "Allagate" e "Non Allagate" ha dimostrato che gli insediamenti e la popolazione si stanno sviluppando a favore delle prime, fatto che rivela che non vi è stretta correlazione tra i fenomeni di inondazione e le logiche di insediamento della popolazione. Questo risultato potrebbe essere dovuto ad una noncuranza del rischio da parte della popolazione, che potrebbe preferire la presenza di risorse, collegamenti o infrastrutture a scapito della salute, ma anche ad un fenomeno di saturazione delle aree non esposte alle inondazioni, o perlomeno esposte con minore probabilità. Tuttavia, per verificare e meglio analizzare questi fatti sarebbero necessari studi più approfonditi sostenuti da una maggiore mole di dati. Ciononostante, il secondo approccio portato avanti nell'analisi ha permesso di valutare la densità abitativa dell'isola e quella caratteristica delle zone frequentemente allagate, e i risultati ottenuti dimostrano che, seppure le densità abitative nell'isola di Giava e nella città di Surabaya siano tra le



più elevate al mondo, le percentuali occupate di “Area Insediabile” come definite in questo studio non sono elevate, fatto che porterebbe a pensare che le persone preferiscono insediarsi in zone più comode, ben servite e vicine ai centri economici a scapito della salute, piuttosto che insediare zone maggiormente sicure e più isolate, sia all’interno dell’isola di Giava che in altre zone del territorio indonesiano. Tuttavia, come anticipato nel capitolo dei metodi, il dato “Area Insediabile” utilizzato in questo studio determina la superficie della specifica area al netto della sola acqua permanente, senza considerare la presenza di eventuali territori su cui, per ragioni fisiche, strutturali, geologiche o altre, non è possibile costruire. Dunque, la reale superficie disponibile alla popolazione potrebbe essere inferiore di quella considerata in questa sede, e ciò comporterebbe un aumento della sua quota occupata dagli insediamenti, ma anche questo sarebbe un fatto da indagare nel dettaglio e confermare tramite analisi più accurate supportate da una maggiore disponibilità di dati.

In conclusione a questo capitolo, oltre alle discussioni relative al Paese qui considerato, in un’ottica di futuro sviluppo dello studio, sarebbe interessante analizzare alla stessa maniera altri Paesi del mondo, analogamente esposti a frequenti e intensi eventi di inondazione, e caratterizzati dalle stesse, o migliori o peggiori condizioni socio-economiche, al fine di verificare se le logiche di espansione delle popolazioni di fronte ai rischi esacerbati dal cambiamento climatico sono influenzati dalle condizioni di vita delle persone e/o dalla capacità delle autorità locali nell’intraprendere misure di mitigazione del rischio. Tale approfondimento risulterebbe particolarmente interessante, in quanto altri studi, ed in particolare quello di Rentschler et al., che fornisce stime globali del numero di persone esposte ed elevati rischi di allagamento in relazione alla povertà, e dimostra che le inondazioni sono tra i rischi naturali più diffusi, con impatti particolarmente disastrosi nei Paesi a basso reddito. Questi studiosi hanno infatti stimato che 1.81 miliardi di persone (il 23% della popolazione mondiale) sono direttamente esposte alle inondazioni con tempo di ritorno di 100 anni, e che i paesi a basso e medio reddito ospitano l’89% delle persone a livello mondiale esposte alle inondazioni (Rentschler, Salhab, & Jafino, Flood exposure and poverty in 188 countries, 2022).



## 6. Conclusioni

Il presente studio si colloca all'interno di un contesto di crescente preoccupazione riguardante l'impatto del cambiamento climatico, con particolare attenzione alle conseguenze derivanti dagli eventi alluvionali. La crisi climatica ha portato ad un aumento dei fenomeni meteorologici estremi, tra cui precipitazioni e innalzamento del livello del mare, che mettono a rischio le comunità costiere in tutto il mondo (IPCC, The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023). L'area di studio selezionata per questo lavoro è l'isola di Giava, con attenzione riservata alla città di Surabaya, in Indonesia, una delle nazioni più vulnerabili agli effetti del cambiamento climatico. Infatti, l'Indonesia, con la sua densa popolazione e la rapida urbanizzazione, è particolarmente esposta ai rischi derivanti dalle inondazioni (IDCM, 2023).

L'obiettivo principale dello studio è quello di analizzare l'occupazione del territorio, in termini di area insediata, e la densità di popolazione facendo un confronto tra aree più o meno soggette ad eventi alluvionali, al fine di (i) comprendere meglio le logiche di sviluppo urbano e le dinamiche di crescita della popolazione in contesti a rischio, (ii) fornire una base solida per la pianificazione di mirate strategie di mitigazione del rischio e (iii) affrontare al meglio le sfide legate ai cambiamenti climatici in Indonesia e altrove.

Per raggiungere questo obiettivo, sono stati utilizzati dati satellitari ad alta risoluzione, tra cui quelli del database World Settlement Footprint Evolution (WSFEvolution, 2015) per valutare l'occupazione del territorio, quelli del Global Human Settlement Layer (GHSL, 2023) per analizzare la densità di popolazione e mappe di aree allagate di eventi alluvionali registrati sull'isola ricavate dal Global Flood Database (GFD, 2022). Questi dati consentono di tracciare e confrontare le tendenze di sviluppo urbano e demografico nelle aree a rischio, offrendo così importanti informazioni per la pianificazione del territorio e la gestione del rischio stesso in contesti vulnerabili come l'isola di Giava e la città di Surabaya.

Durante il corso di questa ricerca, sono emersi diversi risultati significativi che forniscono un'importante comprensione delle dinamiche di sviluppo della popolazione e degli insediamenti in relazione agli eventi di inondazione e al cambiamento climatico in Indonesia, con particolare attenzione all'isola di Giava e alla città di Surabaya. Si riportano dunque di seguito i punti focali dello studio e i principali risultati ottenuti, nonché i più rilevanti elementi di discussione dell'analisi.

- Frequenza e impatto degli eventi alluvionali nel contesto di cambiamento climatico: Analizzando i dati dei trascorsi eventi alluvionali nell'area di studio, ed esaminando la letteratura scientifica, è parso evidente che la crisi climatica degli ultimi decenni stia modificando la frequenza e l'intensità degli eventi idrologici estremi, che sempre più rappresentano un grave problema globale.
- Utilità dei dati satellitari: L'utilizzo di dati satellitari ad alta risoluzione si è dimostrato cruciale per la comprensione dei modelli di sviluppo della popolazione e degli insediamenti, nonché per l'analisi dei rischi naturali. Questi dati hanno permesso una valutazione dettagliata delle dinamiche urbane e una migliore identificazione delle aree a rischio. Alcune limitazioni nell'accesso ai dati geospaziali hanno rappresentato una sfida significativa per lo studio. La disponibilità limitata di dati ha reso difficile una valutazione completa del rischio da eventi alluvionali e delle conseguenze sullo sviluppo della popolazione. Tuttavia, l'analisi ha evidenziato l'importanza di una migliore integrazione tra diverse fonti di informazione e la necessità di una maggiore accessibilità dei dati.
- Distribuzione degli insediamenti e della popolazione: Si evidenzia un aumento degli insediamenti e della popolazione nelle zone alluvionate, specialmente negli ultimi anni, nonostante l'elevato rischio associato agli eventi alluvionali. Si nota un aumento significativo degli insediamenti nelle zone alluvionate da più della metà degli eventi considerati, indicando una tendenza preoccupante di urbanizzazione in queste aree ad alto rischio e una sorta di accettazione del rischio da parte della popolazione. Questo ha evidenziato la sfida della rapida urbanizzazione e la necessità di considerare i rischi naturali nella pianificazione urbana. In particolare, si è osservata una crescita più rapida dell'occupazione delle aree insediabili e della densità di popolazione nelle zone a rischio di allagamento come definite nell'analisi. Questo suggerisce una tendenza a non evitare le zone a rischio da parte della popolazione, forse per ragioni di accessibilità e confort economico-sociale.
- Le conclusioni dello studio suggeriscono la necessità di ulteriori ricerche per comprendere appieno le complesse interazioni tra cambiamento climatico, eventi alluvionali e sviluppo della popolazione. In particolare, l'espansione dell'analisi ad altre regioni colpite da inondazioni e la considerazione di fattori socioeconomici potrebbero fornire una visione più completa delle sfide e delle opportunità legate alla gestione del rischio da inondazioni, nonché alla formulazione di strategie di adattamento e mitigazione dello stesso.





## Riferimenti

- Bambang, D., Heri, A., & Hasanuddin, Z. (2021). Assessing the Impact of Flood Induced by Sea Level Rise and Land Subsidence in Semarang City. *Conference paper, FIG e-Working Week 2021, Smart Surveyors for Land and Water Management - Challenges in a New Reality, Virtual, 21–25 June 2021*.
- BPS. (2020). *Results of Long Form Population Census*. Jakarta: Badan Pusat Statistik - Statistics Indonesia.
- BPS. (2020). *Statistical Year Book of Indonesia*. Badan Pusat Statistik - Statistics Indonesia.
- Briguglio, L. (2013). *Resilience Building In Vulnerable Small States*. University of Malta: Comsec Yearboo.
- CloudToStreet. (2023). *FLOODBASE*. Retrieved from <https://www.floodbase.com/>
- Copernicus. (2023). *GHS POP*. Retrieved from <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/download.php>
- Deng, X., & Xu, Y. (20118). Degrading flood regulation function of river systems in the urbanization process. *Sci. Total Environ. Vol 622*, 1379-1390.
- DFO. (2023). *The Flood Observatory*. Retrieved from <https://floodobservatory.colorado.edu/>
- DLR. (2021). *German Aerospace Center*. Retrieved from <https://geoservice.dlr.de/web/>
- EOCGeoservice. (2021). *German Aerospace Center*. Retrieved from <https://geoservice.dlr.de/web/maps>
- EuropeanCommission. (2023). *Copernicus*. Retrieved from <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/copernicus.php>
- EuropeanCommission. (2023). *JRC Scientific Information Systems and Databases Report: GHSL Data Package*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Few, R., & Matthies, F. (2006). *Flood Hazards and Health*. London.
- GADM. (2022). *Database of Global Administrative Areas*. Retrieved from <https://gadm.org/data.html>
- GFD. (2022). *The Global Flood Database*. Retrieved from <https://global-flood-database.cloudtostreet.ai/#>
- GHSL. (2023). *Global Human Settlement Layer*. Retrieved from <https://ghsl.jrc.ec.europa.eu/datasets.php>

- GlobalGeografia. (2024). *Indoensia*. Retrieved from GlobalGeografia: <https://www.globalgeografia.com/asia/indonesia.htm#>
- GoogleEarthOutreach. (2023). *Google Earth per il Sociale*. Retrieved from <https://www.google.com/earth/outreach/>
- Hapsari, R. I., & Zenurianto, M. (2016). View of Flood Disaster Management in Indonesia and the Key Solution. *American Journal of Engineering Research, Vol 5 Iss 3*, 140-151.
- HydroSHEDS. (2023). *HydroLAKES*. Retrieved from <https://www.hydrosheds.org/products/hydrolakes>
- IDCM. (2023). *Disaster Displacement: Indonesia Country Briefing*. Internal Displacement Monitoring Centre.
- InternationalMonetaryFund. (2022). *WORLD ECONOMIC OUTLOOK DATABASES*. Retrieved from INTERNATIONAL MONETARY FUND: <https://www.imf.org/en/Publications/SPROLLS/world-economic-outlook-databases#sort=%40imfdate%20descending>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis: How is Precipitation Changing?* Intergovernmental Panel On Climate Change.
- IPCC. (2021). The physical science basis, contribution of working group I to the sixth assessment. *Climate Change 2021*.
- IPCC. (2022). *Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*.
- IPCC. (2023). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/>
- Lehner, B., & Messenger, M. (2016). *HydroLAKES, Technical Documentation Version 1.0*. Montreal, Quebec, Canada: McGill University.
- M.I. (2022). Giacarta e il Problema della Land Subsidence: Cause, Previsioni e Manovre di Prevenzione. *MI G.E.O.*
- Marconcini, M. M.-M., Esch, T., & Gorelick, N. (2021, Giugno 29). Understanding Current Trends in Global Urbanisation - The World Settlement Footprint Suite. *GI\_Forum 2021, Volume 9, Issue 1*, pp. 33-38.



- McGill-University, D. (2023). *Global HydroLAB*. Retrieved from <https://wp.geog.mcgill.ca/hydrolab/>
- Microsoft365. (2023). *Microsoft Excel*. Retrieved from <https://www.microsoft.com/it-it/microsoft-365/excel>
- NASA. (2023). *MODIS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- Nurwatik, A., Cahyono, B., & Rachmandafitri, a. (2021). Integrating GIS and Analytical Hierarchy Process to Determine Flood Vulnerability Level in Surabaya, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 936.
- Permana, Y. S. (2023). Politics drain into Indonesia's flood management. *EastAsiaForum*.
- Philip, S. (2020). A protocol for probabilistic extreme event attribution analyses. *Adv. Stat. Climatol. Meteorol. Oceanogr., Vol 6*, 177-203.
- Pramono, S., Roekminiati, S., Vitianingsih, A. V., Ferriswara, D. H., & Rian, A. U. (2023). Effectiveness of Flood Management through Pump Houses Based on Geographic Information Systems in the City of Surabaya. *International Journal of Multicultural and Multireligious Understanding, Vol 10 Iss 1*, 431-451.
- QGIS. (2022). *Sistema di Informazione Geografica Libero e Open Source*. Tratto da <https://www.qgis.org/it/site/>
- Rentschler, J., Avner, P., Marconcini, M., Su, R., Strano, E., Vousdoukas, M., & Hallegatte, S. (2023). Global evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature, vol 622*, 87-92.
- Rentschler, J., Avner, P., Marconcini, M., Su, R., Strano, E., Vousdoukas, M., & Hallegatte, S. (2023, Ottobre 5). Global Evidence of rapid urban growth in flood zones since 1985. *Nature, vol 622*, pp. 87-92.
- Rentschler, J., Salhab, M., & Jafino, B. A. (2022). Flood exposure and poverty in 188 countries. *Nature Communications* 13:3527, 1-11.
- Safitri, N. A., Adam, S., & Pandin, M. (2020). Analysis of Hydro Climatological Disaster Management for Resilient City in Surabaya. *Journal of Sustainability Science and Management, 125*, 1-12.

- Santosa, H. (2005). *The structural forms and construction of informal housing: a casa study of east Java*. Surabaya, Indonesia.
- Sanyal, J., & Lu, X. X. (2006). GIS-based flood hazard mapping at different administrative scales: A case study in Gangetic West Bengal, India. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 27:2, 207-220.
- Saputra, S. Y. (2023). Flooding in Jakarta: A Call to Increase Climate Change Awareness. *State of the Planet, Columbia Climate School*.
- Savitri, Y. R., Begum, R. A., Anwar, N., & Wardoyo, W. S. (2022). The Application of AHP to Determine the Priority Drainage System on Flood Mitigation in Surabaya – Indonesia. *Journal of Disaster Research Vol.17 No.3*, 431-443.
- Schiavina, M., Freire, S., Carioli, A., & MacManus, K. (2023). *European Commission, Joint Research Centre*. Retrieved from GHS-POP R2023A - GHS population grid multitemporal (1975-2030): <http://data.europa.eu/89h/2ff68a52-5b5b-4a22-8f40-c41da8332cfe>
- Schiermeier, Q. (2018). Droughts, heatwaves and floods: how to tell when climate change is to blame. *Nature*, vol 560, 20-22.
- Seneviratne, S., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., Luca, A. D., . . . Zhou, B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Tellman, B., Sullivan, J., Kuhn, C., Kettner, A., Doyle, C., Brakenridge, G., . . . Slayback, D. (2021, Agosto 5). Satellite imaging reveals increased proportion. *Nature*, Vol 596, pp. 80-86.
- Theilen-Willige, B., & Budiyanto, E. (2021). Flooding Hazard Assessment Considering Climate Change in the Coastal Areas of Java/Indonesia Based on Remote Sensing and GIS Data. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research, Vol 618*, 682-690.
- TheWorldBank. (2022, Aprile). *TWB-Indonesia-Overview*. Retrieved from The World Bank: <https://www.worldbank.org/en/country/indonesia/overview>
- UNDRR. (2019). *Rapporto sul rischio di disastri in Indonesia*. United Nation Office for Disaster Risk Reduction.

WFB. (2024). *Explore Countries - Indonesia*. Retrieved from THE WORLD FACTBOOK:  
<https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/indonesia/#geography>

WorldBank. (2023). *Social Dimensions of Climate Change in Indonesia: Executive Summary*.

WSFEvolution. (2015). *EOCGeoservice*. Retrieved from  
<https://geoservice.dlr.de/web/maps/eoc:wsfevolution>