



**POLITECNICO
DI TORINO**

Collegio di
Pianificazione e
Progettazione

Corso di Laurea Magistrale in
**Pianificazione Territoriale, Urbanistica e Paesaggistico-
Ambientale**

Curriculum: Planning for the Global Urban Agenda

Tesi di Laurea Magistrale

**ANALISI DELLE DINAMICHE INSEDIATIVE
NELLE ZONE INONDABILI DEL DALLOL
MAOURI, COMUNE RURALE DI GUÉCHÉMÉ,
NIGER, 2009-2019**

Relatore

Prof. Arch. Maurizio Tiepolo

Candidato

Galligari Andrea

Correlatori

Prof. Ing. Fabio Giulio Tonolo

Ing. Giovanni Massazza

Anno accademico: 2019/2020

INDICE

Ringraziamenti	5
Abbreviazioni	7
Glossario	9
1. Introduzione.....	13
2. Area di studio	15
2.1. Caratteristiche geografiche	16
2.2. Caratteristiche insediative.....	16
3. Metodologia	19
3.1. Determinazione delle aree inondabili	20
3.1.1. Inquadramento dell'area di bacino.....	20
3.1.2. Tempo di corrivazione.....	22
3.1.3. Massimi di precipitazione	22
3.1.4. Analisi statistica dei massimi pluviometrici.....	24
3.1.5. Determinazione delle portate di piena.....	25
3.1.6. Costruzione del modello idraulico	25
3.1.7. Rappresentazione cartografica dei perimetri d'inondazione ed interpretazione del modello.....	27
3.2. Definizione di un metodo semi-automatico di classificazione di aree edificate basato su immagini satellitari.....	29
3.2.1. Introduzione.....	29
3.2.2. Algoritmi di classificazione.....	29
3.2.3. Test preliminari di classificazione.....	30
3.2.3.1. Pre-processamento delle immagini satellitari	30
3.2.3.2. Test di classificazione.....	32
3.2.3.3. Risultati ed osservazioni.....	33
3.2.4. Test di classificazione su area di studio	34
3.2.4.1. Premessa e descrizione delle immagini satellitari	34
3.2.4.2. Test di classificazione.....	37
4. Dinamica insediativa	41
4.1. Individuazione delle località inondabili	41
4.2. Riconoscimento dell'ambiente costruito	44
4.2.1. Estrazione semi-automatica dell'edificato tramite algoritmi di classificazione	45

4.2.2.	Ricostruzione manuale dell'edificato tramite fotointerpretazione.....	48
4.3.	Individuazione degli edifici esposti ad inondazione	50
4.3.1.	Individuazione delle coperture in lamiera nelle zone inondabili	51
4.4.	Analisi di tre località emblematiche	52
4.4.1.	Angoual Chekaraou	52
4.4.2.	Toullou: espansione e consolidamento	55
4.4.3.	Lokoko: consolidamento	57
5.	Discussione.....	61
6.	Conclusioni.....	63
7.	Bibliografia e sitografia.....	65
	Lista figure.....	69
	Lista tabelle	71

Ringraziamenti

Ringrazio in primis i miei genitori che mi hanno supportato e permesso di intraprendere questo percorso in un'altra città e anche i miei familiari per il supporto che mi hanno sempre dato anche da lontano.

Ringrazio i miei amici, in particolare Edoardo, Simone, Libero, Ginevra, Niusha, Eleonora che sono stati sempre presenti anche se ci siamo potuti vedere di meno e Claudia, che ha maggiormente assistito e sopportato gli scleri, ma anche le soddisfazioni di questi due anni di percorso formativo.

Ringrazio i miei compagni di corso, in particolare Michela, Sofia e Federica, per aver condiviso alcuni passi importanti di questo percorso.

Ringrazio infine i miei professori che con pazienza mi hanno seguito passo passo nella costruzione di questo lavoro, non privo di difficoltà.

Abbreviazioni

CILSS:	Comité Permanent Inter-états de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel;
DMN:	Direction de la Météorologie Nationale du Niger;
DN:	Digital Number;
DTM:	Modello digitale del terreno;
ENVI:	ENvironment for Visualizing Images;
ESRI:	Environmental Systems Research Institute;
GIS:	Geografic Information System;
GMT:	Greenwich Mean Time;
HEC-RAS:	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System;
HydroSHEDS:	Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales;
INS:	Institut National de la Statistique du Niger;
IPCC:	Intergovernmental Panel on Climate Change;
LDEO:	Lamont-Doherty Earth Observatory;
NASA:	National Aeronautics and Space Administration;
NDBI:	Normalized Difference Built-up Index;
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index;
NIR:	Infrarosso vicino;
NRCan:	Natural Resources Canada;
PCA:	Principal Component Analysis;
RENALOC:	Répertoire National des Localités;
ROI:	Region of Interest;
RPC:	Rational Polynomial Coefficients;
SAM:	Spectral Angle Mapper;
SDSTATE:	South Dakota State University;
SMHI:	Swedish Meteorological and Hydrological Institute;
SRTM:	Shuttle Radar Topography Mission;
SWIR:	Infrarosso onda corta;
UNESCO:	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization;
USDA:	United States Department of Agriculture;
USGS:	United States Geological Survey;
WMO:	World Meteorological Organization;
WWF:	World Wide Fund for Nature.

Glossario

Adattamento: capacità dei sistemi, delle istituzioni, degli esseri umani e di altri organismi di adattarsi ai potenziali danni, di sfruttare le opportunità o di rispondere alle conseguenze (IPCC, 2018: 542).

Algoritmi di classificazione semi-automatica: processo di assegnazione dei singoli pixel di un'immagine in classi, generalmente sulla base delle caratteristiche radiometriche (LDEO, 1998).

Alveo fluviale (letto fluviale): terreno lungo un corso d'acqua che viene allagato quando il flusso del torrente supera la capacità di carico del canale (WMO, 2012: 127).

Angolo di off-nadir: angolo (in gradi) tra il vettore nadir e il vettore di ripresa. Ogni pixel dell'immagine risulterà in un diverso angolo off nadir (USGS Astrogeology Science Center).

Azimuth: angolo orizzontale, misurato in gradi, tra una linea di base tracciata da un punto centrale e un'altra linea tracciata dallo stesso punto. Normalmente, la linea di base punta al nord e l'angolo è misurato in senso orario dalla linea di base (ESRI, 2000: 7).

Bacino endoreico: drenaggio delle acque meteoriche in un bacino idrografico privo di sbocco sul mare o sull'oceano (WMO, 2012: 108).

Buffer: poligono che racchiude un punto, una linea o un poligono ad una distanza specifica (ESRI, 2000: 12).

Calibrazione radiometrica: conversione dei DN registrati dai sensori satellitari in unità fisiche. Queste unità sono la radianza o la riflettanza (SDSTATE).

Coefficiente di ruscellamento: porzione delle precipitazioni che defluisce in superficie, in funzione della composizione del suolo, della pendenza e dell'intensità di precipitazione (Goel, 2011: 952).

Consolidamento edilizio: miglioramento delle strutture edilizie tramite l'utilizzo di materiali più resistenti agli agenti atmosferici, prevenendone il crollo.

Dalol: valli fossilizzate (in lingua Fulani), di solito molto fertili, anticamente grandi affluenti del fiume Niger (Idrissa, 2020: 163).

Dark subtraction: procedura di elaborazione dell'immagine che compensa gli effetti della selettività della luce diffusa nelle immagini multispettrali (LDEO, 1998).

Dati pluviometrici: quantità giornaliera di pioggia, espressa come profondità dell'acqua su una superficie orizzontale, per un periodo di rilevamento esteso (WMO, 2012: 258).

Deep learning: tipologia di algoritmi di apprendimento automatico che utilizza più livelli per estrarre progressivamente le caratteristiche di livello superiore dall'input di base (Deng, 2013: 199).

Deflusso superficiale: quella parte della precipitazione che scorre verso un fiume sulla superficie del terreno (WMO, 2012: 292).

Diffusione atmosferica: riflessioni multiple delle onde elettromagnetiche dovute a particelle o superfici (LDEO, 1998).

Digitalizzazione: conversione delle forme degli elementi geografici da supporti come le mappe cartacee o immagini raster in coordinate vettoriali x,y (ESRI, 2000: 28).

Firma spettrale: profilo della radiazione elettromagnetica (linee spettrali) che identifica una sostanza chimica o un materiale composto (ESRI, 2000: 94).

Fotointerpretazione: metodologia per acquisire informazioni da fotogrammi o immagini stereoscopiche (NTUA).

Immagini bundle: immagine satellitare fornita come combinazione pancromatica/multispettrale (Geoimage: 1).

Indice spettrale: combinazione di riflettanza tra due o più bande che hanno l'obiettivo di esprimere attraverso un'indice adimensionale la possibile appartenenza di una cella ad una determinata classe tematica (Harris Geospatial Solutions).

Interpolazione: stima di un valore sconosciuto che rientra tra i valori noti (ESRI, 2000: 53).

Massimo di precipitazione: massimo deflusso annuale di acqua piovana raggiunto durante il periodo di riferimento, equivalente al tempo di corruzione (WMO, 2012: 212).

Matrice di confusione: matrice che mostra le accuratezze di classificazione previste ed effettive (Kohavi, 1998: 272).

Modello idraulico: modello matematico di un sistema idrico utilizzato per analizzare il comportamento idraulico del sistema (GeoAdvice).

Ortorettifica: correzione della distorsione delle immagini satellitari causata da terreno irregolare (ESRI, 2000: 73).

Pansharpening: combinazione dell'alta risoluzione di un'immagine pancromatica con un dataset multispettrale a bassa risoluzione per aumentare la risoluzione spaziale dell'immagine multispettrale (ESRI).

Pre-processamento immagini satellitari: correzione delle distorsioni radiometriche e geometriche dei dati specifici del sensore e della piattaforma (NRCan, 2015).

Query: espressione logica utilizzata per selezionare caratteristiche o elementi da un database (ESRI, 2000: 82).

Radianza: valore del flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido secondo una certa direzione e misurata su un piano ortogonale a tale direzione (Boccardo, 2019: 10).

Reticolo idrografico: configurazione dei canali di drenaggio naturale e/o artificiale all'interno di un'area (WMO, 2012: 96).

Rischio inondazione: probabilità e le conseguenze che possono derivare da fenomeni di inondazione (US Army Corps of Engineers, 2015: 12).

Ruscellamento: vedi *deflusso superficiale*.

Segmentazione di immagini: partizionamento in regioni omogenee sulla base di un certo criterio di appartenenza dei pixel ad una regione (Battiato, 2011: 2).

Sezione di chiusura: punto di apertura attraverso la quale l'acqua esce o è estratto da un bacino idrografico o da un torrente (WMO, 2012: 240).

Telerilevamento: misurazione o l'acquisizione di informazioni su alcune proprietà di un oggetto o di un fenomeno, da parte di un dispositivo di registrazione che non è in contatto fisico con l'oggetto o il fenomeno in studio (USGS Landsat Glossary).

Tempo di corrvioazione: tempo (in ore) necessario per una goccia che cade nel punto del bacino più lontano a raggiungere la sezione di chiusura (USDA, 2010: 15-3).

Tempo di ritorno: Intervallo di tempo medio in anni tra il verificarsi di precipitazioni di una determinata intensità e quella di intensità uguale o superiore (WMO, 2012: 269).

Terrazza fluviale: piano rialzato composto da depositi alluvionali non consolidati (compresa la ghiaia), prodotta da un nuovo taglio della pianura alluvionale o del fondovalle (USGS).

Vulnerabilità: propensione o predisposizione a subire effetti negativi. La vulnerabilità comprende una varietà di concetti ed elementi, tra cui la sensibilità o la predisposizione al danno e la mancanza di capacità di adattarsi (IPCC, 2018: 560).

Verità al suolo: sistema di punti o celle, con posizioni, elevazioni o entrambi stabiliti, utilizzati come riferimenti definiti nelle relative caratteristiche della mappa, nelle fotografie aeree o nelle immagini rilevate a distanza (ESRI, 2000: 47).

1. Introduzione

Il rischio inondazione, sia fluviale che costiero, è da sempre un tema rilevante per le attività antropiche. Ciò risiede nel ruolo fondamentale che l'acqua ricopre per la società costruita dall'essere umano: dalla produzione di alimenti per la propria sussistenza, alla possibilità di utilizzare l'acqua come canali per il trasporto e il commercio. Per questi motivi le attività antropiche si sono storicamente sviluppate e si sviluppano ancora oggi, in prossimità di corpi idrici come fiumi, laghi e oceani. Queste scelte si scontrano tuttavia con la dinamicità dei corpi idrici stessi, i quali, in condizioni atmosferiche particolari, possono produrre delle perdite, sia materiali che umane, quando non sono opportunamente gestiti. Tale problematica è particolarmente sentita oggi, in un'epoca caratterizzata dal cambiamento climatico che sta plasmando il "comportamento" dei corpi idrici, rendendoli più imprevedibili e potenzialmente più pericolosi per le aree edificate situate lungo di essi (Praskievicz & Chang, 2009).

L'aumento del rischio non è dovuto soltanto agli effetti del cambiamento climatico, ma anche all'aumento della pressione antropica nelle zone inondabili. Tale aumento consiste in beni materiali e popolazione. Il rischio inondazione riguarda dunque tutte le attività antropiche che si sviluppano lungo i corpi idrici, sia in contesti urbani, che rurali, con caratteristiche, dinamiche e conseguenze diverse per ogni contesto geografico e antropico.

I motivi che incentivano l'espansione edilizia nelle zone inondabili non sono di facile individuazione, ma si possono avanzare alcune ipotesi. Tra esse può rientrare la mancanza di spazio, che incentiva l'espansione edilizia in prossimità delle zone coltivabili. Un'altra ipotesi può essere legato al difficile accesso alla proprietà della terra.

Nelle aree rurali dell'Africa Tropicale le inondazioni sono aumentate (Tiepolo, 2019), così come la pressione antropica, la coltivazione estensiva e, conseguentemente, i cambiamenti di uso del suolo. Questi cambiamenti hanno aumentato il deflusso superficiale delle acque meteoriche (Praskievicz & Chang, 2009; Früh-Müller, 2014). La persistente povertà e le scarse infrastrutture, unite ai cambiamenti dell'ambiente fisico hanno aumentato la vulnerabilità della popolazione alle inondazioni (Huong & Pathirana, 2011; Mbow, 2008; IPCC, 2018).

La letteratura sulle dinamiche insediative nelle zone inondabili in Africa è concentrata più sulle zone urbane che su quelle rurali. Tuttavia, queste ultime hanno un ruolo importante non solo nei movimenti migratori che ingrossano le città, ma nell'economia, essendo il settore che meglio può ridurre la povertà, l'insicurezza alimentare e le disegualianze nel Continente (Tiepolo, 2020). Fattori che dovrebbero rimediare alla marginale attenzione posta anche dai rapporti sui cambiamenti climatici (IPCC, 2018). In molti paesi i centri secondari e minori presentano una rapida espansione dell'abitato dovuta ad un rapido aumento della popolazione (Sliuzas, 2013). Quanto alle metodologie, vengono impiegate tecniche di telerilevamento, come le analisi di evoluzione dell'edificato tramite fotointerpretazione (Mbow, 2008), talvolta attraverso metodi di classificazione semi-automatica (Taubenböck, 2011). Altri studi analizzano l'evoluzione dell'uso del suolo o dell'edificato, anche in ottica di previsione, utilizzano modelli sofisticati di simulazione dell'espansione urbana (Sliuzas, 2013; Huong & Pathirana, 2011). L'individuazione delle zone inondabili viene fatta incrociando i livelli di piena storici con modelli digitali del terreno (Mbow, 2008; Taubenböck, 2011), oppure attraverso modelli idraulici mono/bidimensionali (Sliuzas, 2013; Huong & Pathirana, 2011).

L'aumento della pressione antropica in aree inondabili è la principale causa dell'aumento dei danni da inondazione. A livello globale infatti, le perdite economiche dovute a eventi idrici calamitosi sono aumentate di oltre cinque volte rispetto ai primi anni '80, principalmente dovuti all'urbanizzazione di aree inondabili (Güneralp, 2015). Le perdite economiche, sono il principale fattore che determina un aumento della povertà.

Fra le cause delle perdite materiali e umane vi è anche la scarsa prevenzione e preparazione: in primo luogo l'individuazione delle zone inondabili, il divieto di insediarsi al loro interno e il controllo che tale divieto venga rispettato. Conoscere le zone inondabili e le dinamiche degli insediamenti al loro interno può essere quindi molto utile per le amministrazioni locali che non hanno strumenti per accertarle (Eakin, 2010).

L'obiettivo di questa tesi è dunque l'accertamento della dinamica insediativa in zona inondabile. I risultati sono d'interesse per la gestione locale del rischio d'inondazione. La tesi attira l'attenzione sulle aree rurali remote come ambiti cruciali, che necessitano ricerca e strumenti per implementare politiche di sviluppo rurale sostenibile.

Il rischio inondazione è osservato in un contesto rurale caratterizzato da un'alta dinamica insediativa e da una forte variabilità delle precipitazioni: il comune di Guéchémé, in Niger (109.000 ab. nel 2012). In particolare viene considerata la parte del territorio comunale attraversata dal dallol Maouri, un corso d'acqua fossile che in seguito a precipitazioni intense può conoscere piene stagionali e inondare gli insediamenti circostanti. Questa particolare esposizione fa del dallol una delle poche zone umide in un paese semi-arido. E vi rende possibile un'agricoltura commerciale.

Lo studio analizza le caratteristiche idriche del corso d'acqua attraverso la modellazione idraulica, la dinamica insediativa nelle aree inondabili, in un arco di 10 anni, attraverso l'estrazione semi-automatica degli edifici da immagini satellitari ad alta risoluzione riprese nel 2009 e nel 2019.

La tesi presenta anzitutto la zona studio (capitolo 2). Quindi descrive la metodologia, seguita nella modellazione idraulica (analisi dei dati pluviometrici, analisi statistica), nell'estrazione semi-automatica degli edifici da immagini satellitari (sperimentazione e verifica di accuratezza degli algoritmi di classificazione) (capitolo 3). Quindi individua le dinamiche delle 36 località in area inondabile presenti tra il 2009 e il 2019 nel dallol Maouri, che presentano un'espansione rilevante nel periodo considerato: in particolare, individua le dinamiche di tre località rappresentative per dimensione di quelli presenti in zona inondabile e nella zona immediatamente circostante, non esposta ad inondazione. L'intento è di accertare se le dinamiche riscontrate sul fondo del dallol sono comuni a quelle riscontrabili all'esterno (capitolo 4). La discussione dei risultati (risultati attesi o inattesi, loro ricadute sulla pianificazione locale) (capitolo 5) e le conclusioni (capitolo 6) completano la tesi.

L'applicazione delle metodologie e l'analisi della dinamica insediativa ha prodotto risultati significativi, in buona parte in linea con le aspettative e per i quali sono necessarie alcune riflessioni nell'ottica di definizione delle politiche di gestione locale.

2. Area di studio

Il caso studio si trova nel comune di Guéchémé, a circa 200 chilometri ad est della città di Niamey, capitale del Niger. Guéchémé è uno dei più grandi e popolati comuni rurali del Niger (108.000 abitanti, oltre 1.184 km²), caratterizzato da un aumento demografico (+23% tra 2001 e 2012). L'area studiata è una porzione del comune di circa 210 km² dei quali 50 km² corrispondono all'alveo di un antico corso d'acqua denominato dallol Maouri (Figura 1) che origina nel nord del Paese, attraversa il comune di Guéchémé e più a valle confluisce nel fiume Niger.

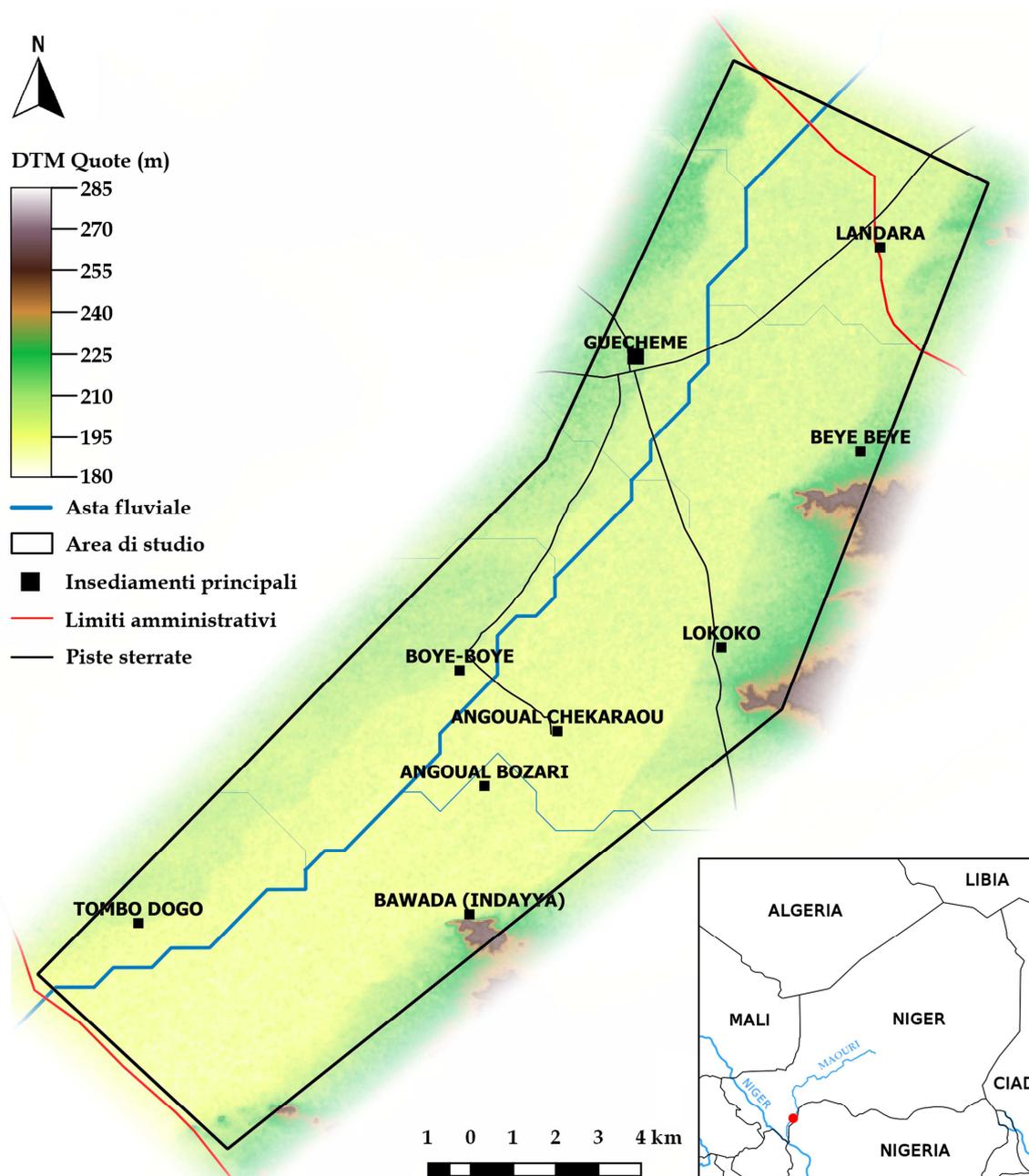


Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio e principali località nel dallol Maouri a Guéchémé

2.1. Caratteristiche geografiche

L'area di studio appartiene a una regione semi-arida: 560mm di precipitazione media annua tra 1980 e 2018 (DMN, 2019), distribuite tra aprile e ottobre. Ma in questo contesto il dallol Maouri a Guéchémé raccoglie le acque di ruscellamento circostanti e quelle provenienti dal suo lunghissimo corso a monte per configurarsi come una zona delle più fertili e più densamente coltivate del Niger. Questa condizione è condivisa da tutti i comuni attraversati dal dallol e si riflette in una dinamica demografica positiva, a differenza di altri contesti rurali dell'Africa occidentale in calo demografico a causa dell'esodo rurale-urbano. L'aumento demografico accresce la pressione antropica su un territorio limitato. In un'economia agro-pastorale a carattere familiare, le popolazioni rurali hanno bisogno di vivere vicino ai campi e alle fonti d'acqua. Nel corso del tempo ciò ha portato un aumento notevole di abitanti all'interno del dallol Maouri, zona umida e inondabile per eccellenza.

Il comune di Guéchémé è sostanzialmente piatto (185 a 270 m slm), inciso nella parte verso la Nigeria e per una lunghezza di circa 43 km e una larghezza che raggiunge fino gli 8 km dal dallol Maouri che apre un solco largo attorno ai quattro chilometri, e da lievi formazioni collinari (assimilabili a dei terrazzi alluvionali¹), situati in gran parte sulla riva sinistra, di altezza variabile tra i 20 e i 50 metri.

2.2. Caratteristiche insediative

All'interno dell'area di studio sono situate 110 località, suddivisi in quelli localizzati ai limiti dell'alveo (53), tra cui il capoluogo Guéchémé, e quelli localizzati nell'alveo (57), di cui molti situati in area inondabile (36), con una popolazione totale di circa 38000 abitanti al 2012, pari a un terzo della popolazione comunale (INS, 2014)². Il territorio è caratterizzato da una scarsa rete infrastrutturale: la strada principale attraversa il dallol da ovest a est, passando per Guéchémé e Landara e collega il capoluogo con la città di Dosso. Da Guéchémé si diramano in modo radiale alcune strade minori che collegano alcuni centri importanti come Angoual Chekaraou, Lokoko e Boye-Boye. Il resto della viabilità è caratterizzata da una fitta rete di piste che collegano le località minori attraverso il dallol.

L'interesse per questo territorio è data dall'importanza del dallol come area umida fertile che sta favorendo la crescita demografica e le attività agro-pastorali in una zona esposta ad inondazioni, talvolta catastrofiche. Il dallol presenta una densità abitativa, tra le più alte del paese: 181 ab/km² (Figura 2, Tabella 1)³.

¹ Merriam-Webster, Alluvial terrace, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/alluvial%20terrace>.

² Tale valore rappresenta tuttavia una sottostima del valore reale per la mancanza di dati su alcuni nuclei abitati minori.

³ Dataset scaricato da: UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) country office in Niger, (2006). Niger administrative level 0, 1, 2, and 3 boundary polygons (2019 Update)

Tabella 1 - Densità di popolazione del dallol di Guéchémé in confronto con altri contesti rurali in Niger (Censimento 2012)

Ambito	Popolazione	Superficie	Densità	Posizione
	abitanti	km ²	ab/km ²	
Minimo rurale (Djado)	876	168724	0.01	251
Nazione	17138707	1248802	13.72	218-219
Guéchémé comune	108778	1184	91.85	91
Guéchémé (dallol)	38000	210	180.95	15-16
Massimo rurale (Koona)	14888	52	284.18	1

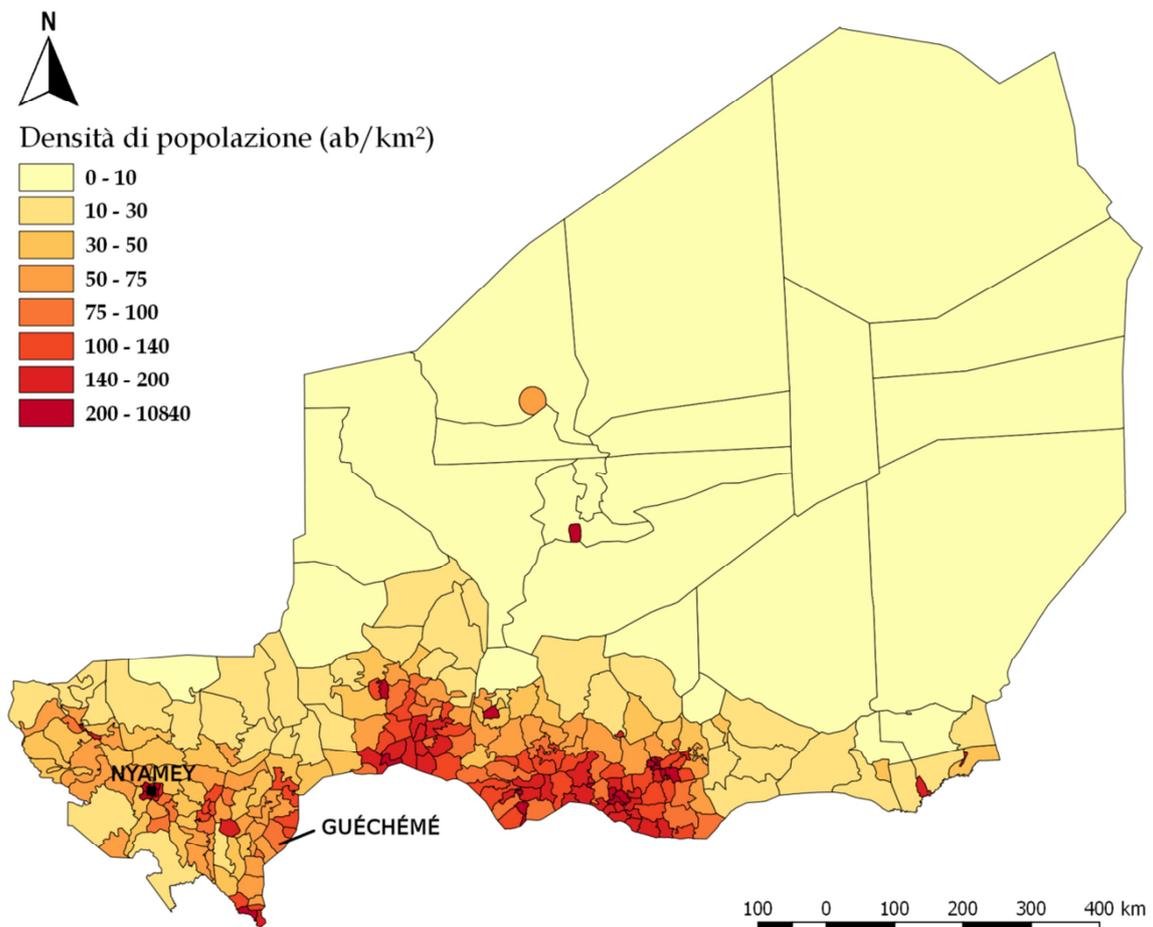


Figura 2 - Densità di popolazione per comune in Niger (Censimento 2012)

3. Metodologia

L'analisi della dinamica insediativa, poggia la base metodologica su due discipline distinte: l'idraulica e il telerilevamento. Mentre la parte di idraulica fornisce gli elementi necessari per condurre un'analisi del rischio inondazione, la parte di telerilevamento costituisce un approccio sperimentale volto ad estrarre dati in modo semi-automatico, in sostituzione a metodi tradizionali di digitalizzazione. Per avere un quadro d'insieme delle operazioni svolte, è stato definito un diagramma di flusso dei passaggi più significativi (Figura 3).

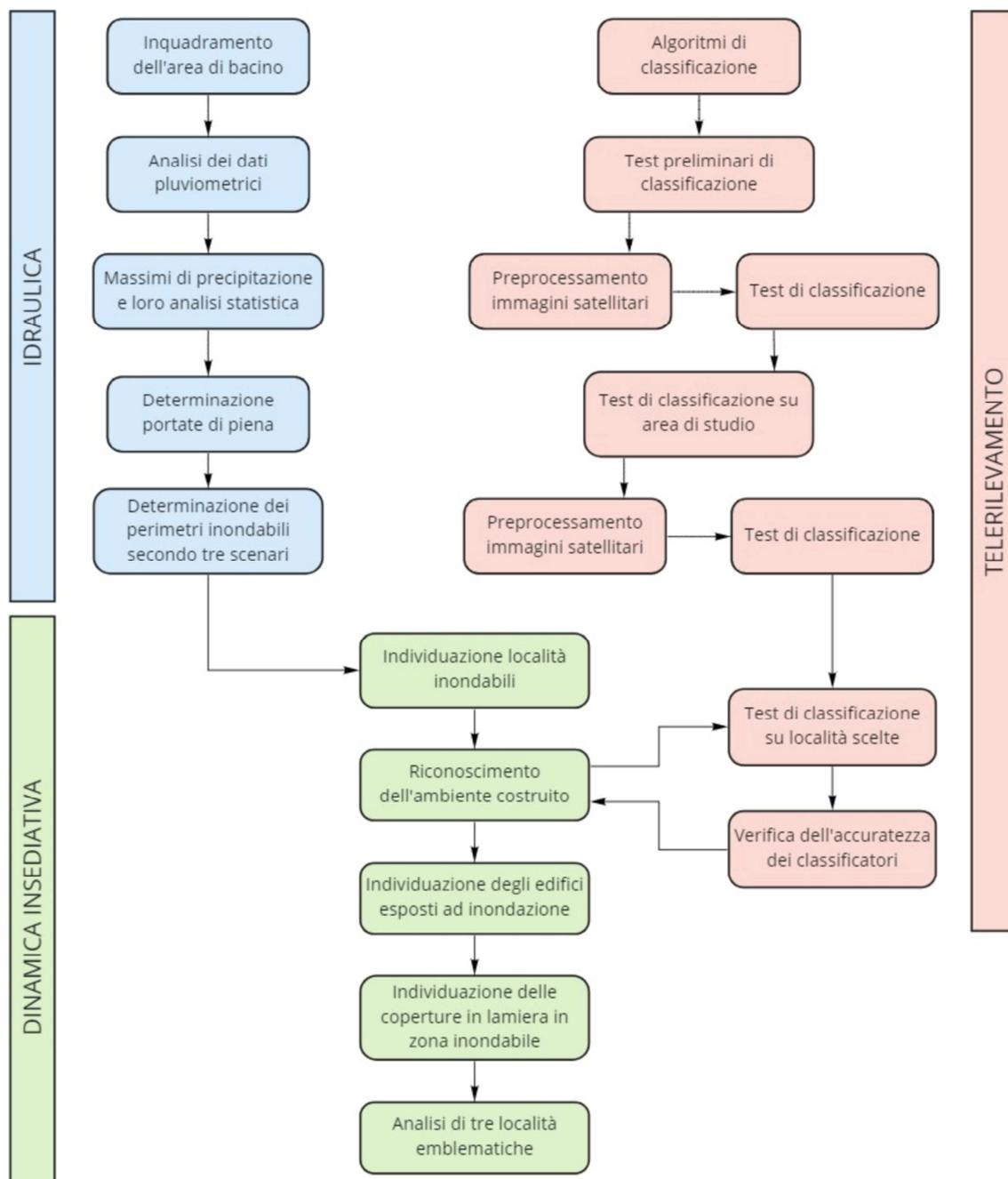


Figura 3 - Diagramma di flusso della metodologia utilizzata

3.1. Determinazione delle aree inondabili

Il seguente capitolo è dedicato alla metodologia adottata per la definizione delle aree inondabili tramite l'analisi idrologica del bacino idrografico del dallol Maouri e la costruzione di un modello idraulico numerico per l'area di studio.

Questa fase ricopre particolare importanza in quanto, come già detto, le aree edificate sono localizzate lungo tale corso d'acqua, ripartite tra quelle localizzate ai limiti dell'alveo e quelle localizzate sull'alveo stesso. Tali località sono soggette a fenomeni alluvionali più o meno intensi, ma tendenzialmente in aumento negli ultimi decenni.

I risultati del modello idraulico vengono restituiti cartograficamente come aree inondabili, in funzione dei diversi tempi di ritorno considerati. Suddette aree verranno incrociate con i dati relativi agli insediamenti, al fine di identificare le aree edificate ricadenti nelle zone inondabili.

Questo processo presenta tuttavia dei limiti, principalmente dovuti alla scarsità di informazioni geospaziali disponibili per quel bacino idrografico. In particolare:

- Relativamente ai dati geografici di base, sono disponibili i limiti di bacino e le aste fluviali. Sono disponibili anche modelli digitali del terreno (DTM), ma facenti parte di dataset globali con risoluzione modesta, come l'SRTM (NASA, 2000), prodotto da una partnership tra diverse agenzie spaziali, con risoluzioni di 90 o 30 metri e percentuali di errore piuttosto elevati (che aumentano con il modello a 30m). L'unico modello DTM ad alta risoluzione, con passo 10 metri, è disponibile soltanto per una frazione dell'area di studio, risultando quindi non utilizzabile ai fini del modello;
- In merito ai dati pluviometrici, l'unica serie storica utilizzabile ai fini dell'analisi idrologica (durata almeno trentennale per permettere l'analisi statistica dei massimi) è relativa al comune di Guéchémé, ricadente nell'area di studio (che copre il periodo 1981-2018), mentre esistono serie di durata minore e quindi non utilizzabili, di alcune altre località più a monte;
- In merito a dati pedologici e di uso del suolo, non si hanno a disposizione dati, con una risoluzione accettabile, per le analisi idrologiche. L'unico dato disponibile è un progetto, curato dalla US Aid in collaborazione con l'USGS, intitolato Landscapes of West Africa: A Window on a Changing World (CILSS, 2016), per la mappatura e la costruzione di un'evoluzione cronologica dell'uso del suolo nell'Africa Tropicale, ma con risoluzioni non idonee per l'elaborazione del modello.

Questi limiti richiedono di operare per significative approssimazioni dei parametri da utilizzare. Ciò richiederebbe una successiva valutazione della verosimiglianza dei risultati ottenuti, ma per limiti temporali e disponibilità di dati di terreno non risulta possibile. Inoltre, la modesta risoluzione del DTM, comporterà una minor risoluzione e precisione dei perimetri delle aree identificate come aree inondabili.

3.1.1. Inquadramento dell'area di bacino

Il primo passo è la definizione geografica del bacino di studio a monte dell'area rilevata (Figura 1) dalle immagini satellitari e, nello specifico, a monte del punto con la quota più bassa del bacino, situato lungo la sezione di chiusura del sistema. Questa

fase è stata sviluppata attraverso QGIS (versione 2.14.19), software GIS open-source di visualizzazione, analisi ed editing di dati geospaziali (QGIS, 2016). I limiti del bacino idrografico sono stati definiti attraverso un dataset spaziale dei sub-bacini del fiume Niger (SMHI Hypeweb, 2012), da cui sono stati selezionati solo gli elementi relativi al dallol Maouri, permettendo il calcolo dell'area totale.

Il dato utile relativo al reticolo idrografico deriva dal dataset HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) sviluppato dal WWF in collaborazione con l'USGS (Lehner, 2008; USGS, 2008), che contiene le informazioni sul reticolo idrografico ricavata dall'analisi del modello digitale del terreno. Tale dato presenta un elevato grado di approssimazione delle aste fluviali, tuttavia, l'impossibilità di tracciare un percorso univoco del corso d'acqua per via del suo carattere stagionale, rende il dato HydroSHEDS l'unico utile ai fini della costruzione del modello.

Il modello digitale del terreno disponibile è l'SRTM con passo 30 metri, che rappresenta l'evoluzione del modello a 90 metri, ma con percentuali di errori maggiori dovute a rumore più alto.

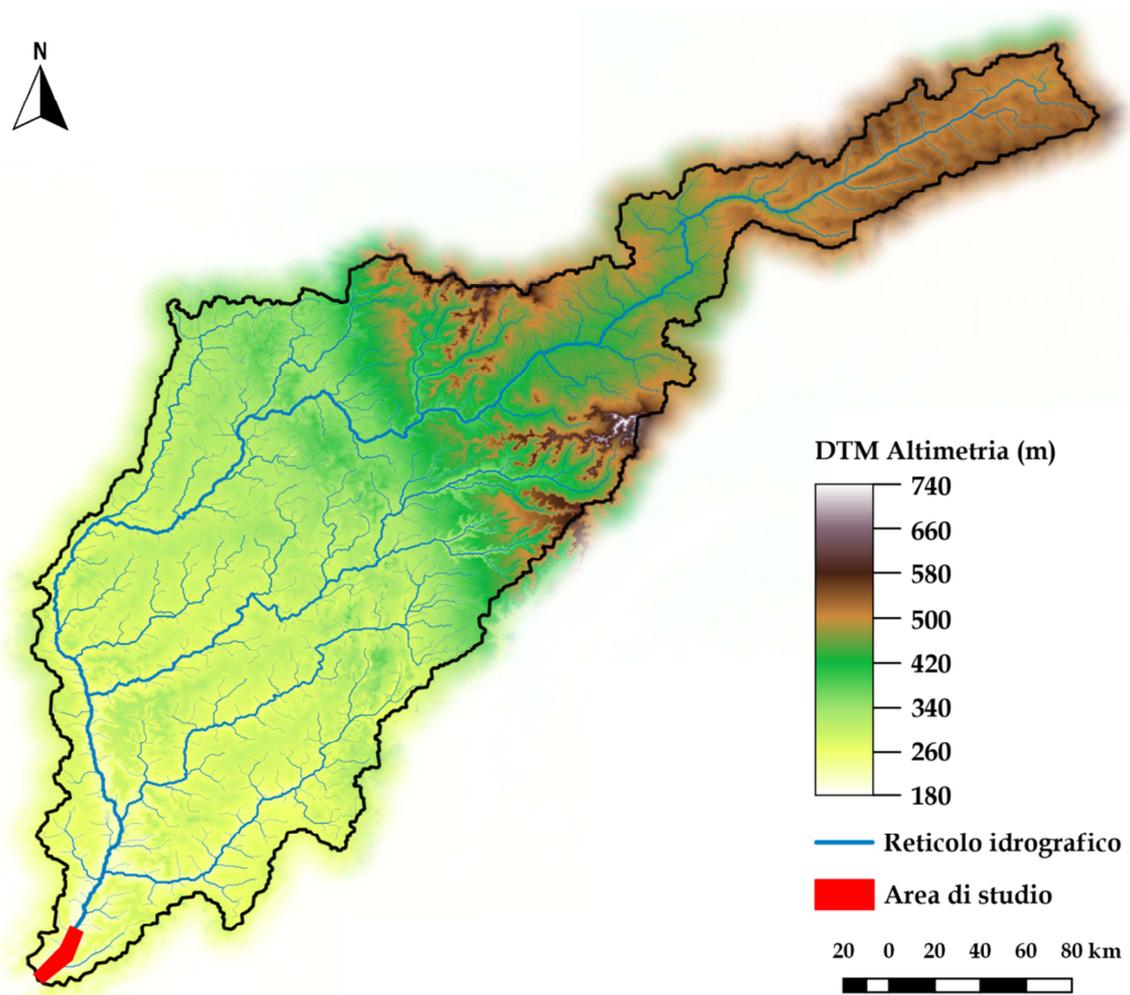


Figura 4 - Inquadramento del bacino del dallol ed il suo reticolo idrografico

3.1.2. Tempo di corrivazione

Il primo indice utile alla definizione del modello idraulico è il tempo di corrivazione (t_c), definito come il tempo (in ore) necessario per una goccia che cade nel punto del bacino più lontano a raggiungere la sezione di chiusura (USDA, 2010). Esistono numerose formule per il calcolo di tale indice: nella presente tesi, è stata adottata la formula di Giandotti (Giandotti, 1934), definita come segue:

$$t_c = \frac{4 * \sqrt{S} + 1,5L}{0.8 * \sqrt{H_m - h_0}}$$

Dove:

- S = Superficie totale del bacino [km²];
- L = Lunghezza dell'asta fluviale principale [km];
- H_m = Quota media del bacino idrografico [m];
- h₀ = Quota della sezione di chiusura [m].

Tabella 2 - Calcolo del tempo di corrivazione

Bacino	Area [km ²]	L _{channel} [km]	Quota media [m]	Quota di chiusura [m]	Giandotti Formula (h)
MAOURI	61283	909.81	362	193	226.44
				giorni	9.43

Il tempo di corrivazione ottenuto con tale formula risulta essere di circa 9 giorni (Tabella 2).

3.1.3. Massimi di precipitazione

Il passo successivo è l'analisi dei dati pluviometrici a disposizione per la determinazione dei massimi di precipitazione annuali relativi al bacino idrografico. I dati disponibili sono relativi a due stazioni pluviometriche nel comune di Guéchémé (Guéchémé e Guéchémé Centre de Santé). Data la relativa vicinanza tra le due stazioni, le seguenti operazioni sono state eseguite incrociando le serie di dati per colmare i rispettivi buchi nelle serie di misura.

Un prima analisi dei dati pluviometrici ci mostra come il regime pluviometrico del comune di Guéchémé presenti un andamento unimodale⁴ (Figura 5), con una stagione secca che si estende da novembre a marzo e una stagione più umida da aprile a ottobre, con un picco di precipitazioni nel mese di agosto. I dati rilevati rientrano in linea con le medie regionali⁵.

⁴ Ossia con una sola stagione secca e una sola stagione umida.

⁵ Per approfondimenti: Dosso climate, <https://en.climate-data.org/africa/niger/dosso/dosso-26232/#temperature-graph>

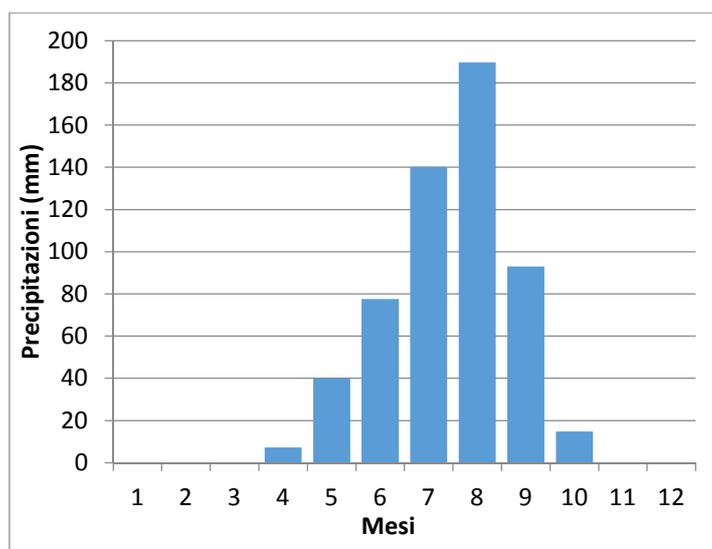


Figura 5 - Precipitazioni medie mensili 1981-2018

Considerando l'intera serie pluviometrica, la media delle precipitazioni annuali mostra una lieve tendenza negativa (Figura 6).

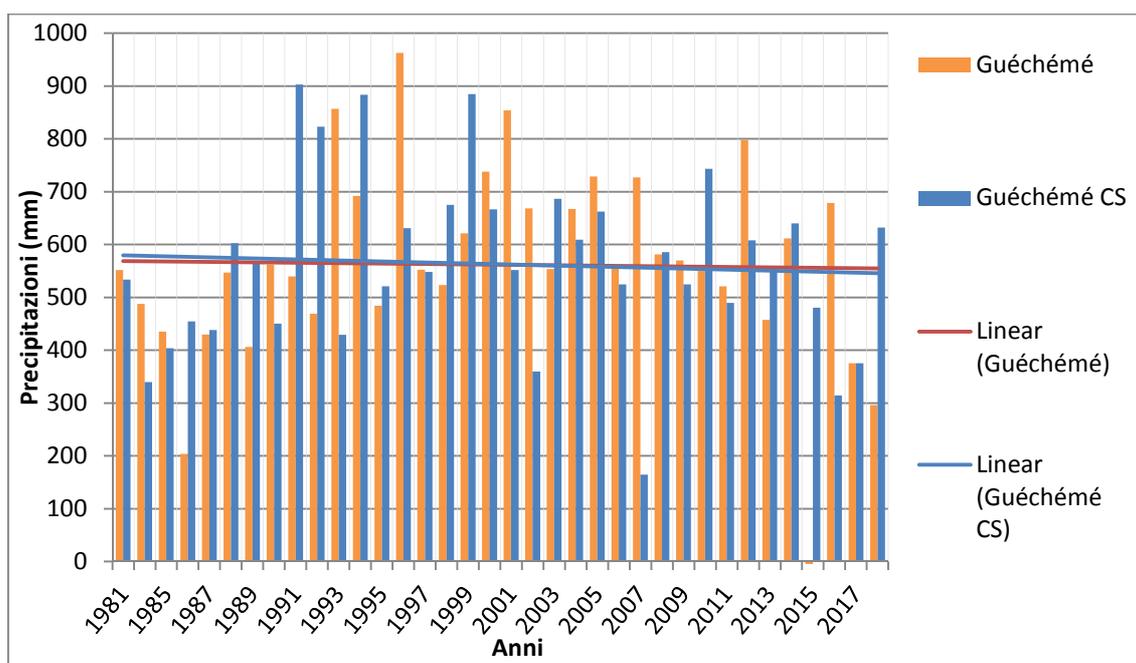


Figura 6 - Precipitazioni annue 1981-2018

Successivamente, si è proceduti al calcolo dei massimi annuali di precipitazione, definiti dal massimo valore risultato dalla somma delle precipitazioni nell'arco di tempo equivalente al tempo di corrivazione, ossia di 9 giorni. Tale operazione è stata effettuata per entrambe le serie di dati, e i risultati sono stati incrociati selezionando il valore più alto per ogni anno corrispondente.

Analizzando l'andamento negli anni dei massimi di precipitazione, si osserva come ci sia una tendenza più marcata rispetto alle medie annue. Si nota quindi come l'area sia caratterizzata da una lieve diminuzione delle precipitazioni medie, mentre aumenta l'intensità dei fenomeni estremi, e nello specifico, delle precipitazioni massime (Figura 7).

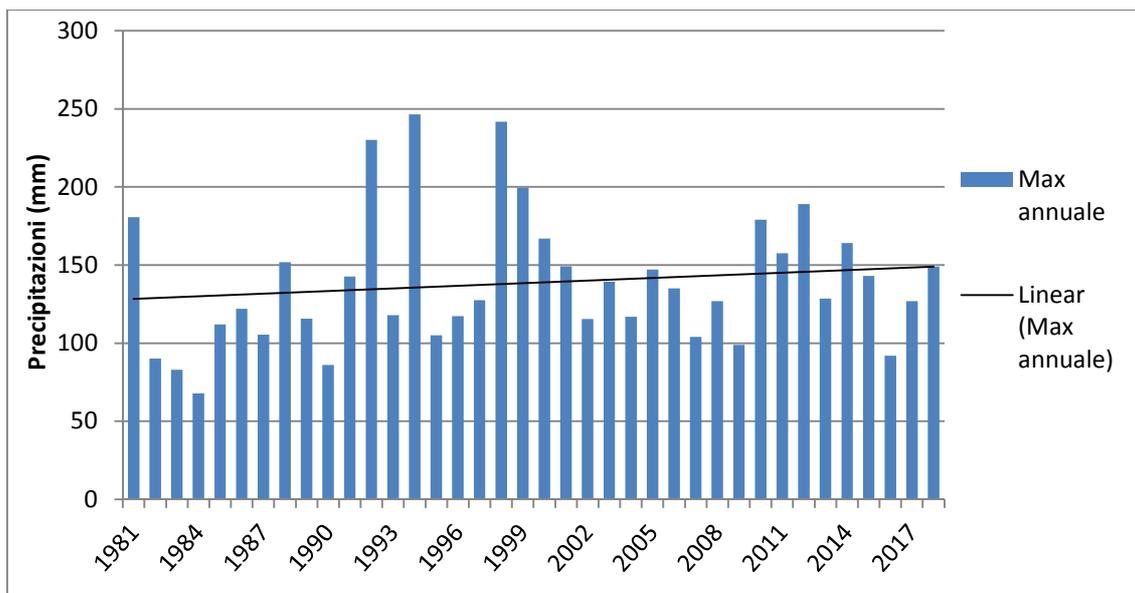


Figura 7 - Massimi di precipitazione annuali su un periodo di 9 giorni consecutivi (stazioni di Guéchémé e Guéchémé Centre de Santé)

3.1.4. Analisi statistica dei massimi pluviometrici

I valori di massimi di precipitazione analizzati corrispondono alla precipitazione cumulata su una finestra temporale pari al tempo di corruzione (9 giorni). Al fine di valutare la probabilità d'occorrenza di un evento di intensità 'x' nel tempo (o in altri termini il tempo di ritorno), è necessario effettuare un'analisi statistica dei massimi ottenuti.

L'analisi ha per prima fase l'applicazione di diverse distribuzioni di probabilità statistica applicate all'idrologia (Anonimo, 2011), nel caso specifico sono state testate le distribuzioni X, Y, Z. I test di adattamento (test di XX e test di YY) costituiscono la seconda fase di analisi idrologica e servono a definire quali distribuzioni risultano applicabili nel caso specifico. I risultati di tale test hanno portato a scegliere la distribuzione lognormale a 2 parametri (Anonimo, 2011) poiché presenta dei valori di precipitazione più alti e risulta dunque più cautelativa. Grazie alle precedenti operazioni è dunque possibile la determinazione dei tempi di ritorno (T_R), definita come l'inverso della probabilità annuale (P) di occorrenza di un evento:

$$T_R = \frac{1}{P}$$

Ai valori di tempo di ritorno definiti corrispondono i rispettivi valori massimi di precipitazione (Tabella 3).

Tabella 3 - Analisi dei tempi di ritorno delle precipitazioni

TR [anni]	2	5	10	20	50	100	200	500
P [mm]	133	171	195	217	245	266	287	314

La scelta dei tempi di ritorno da considerare è in genere arbitraria a seconda dell'obiettivo dell'analisi, ma può essere influenzata da alcuni fattori legati alle caratteristiche dell'area di studio, come ad esempio la morfologia, caratterizzata in

questo caso da bassissime pendenze dell'alveo. E' inoltre rilevante considerare che la scelta di tempi di ritorno troppo ravvicinati genererebbe, nella fase di restituzione cartografica dei risultati della modellazione idraulica, aree troppo ravvicinate per permettere un'analisi apprezzabile delle stesse.

Alla luce di queste considerazioni sono stati scelti i seguenti tempi di ritorno: 2, 20, e 200 anni, i quali si possono leggere rispettivamente come eventi: ad alta probabilità, a media probabilità e a bassa probabilità.

3.1.5. Determinazione delle portate di piena

Il calcolo delle portate di piena in funzione dei tempi di ritorno ha come prima fase la definizione del coefficiente di ruscellamento, un parametro che indica la porzione delle precipitazioni che defluisce in superficie, in funzione della composizione del suolo, della pendenza e dell'intensità di precipitazione (Goel, 2011).

In mancanza di dati relativi al suolo, necessari per una determinazione empirica del coefficiente, è stata svolta un'analisi bibliografica relativa ad aree limitrofe o con caratteristiche simili a quelle di studio, attraverso la quale sono stati estratti alcuni valori attribuiti a specifiche classi di suolo (nello specifico di uso del suolo). Secondo i valori di letteratura (Amogu, 2010; Descroix, 2018), il coefficiente di ruscellamento varia dunque tra 0.038 e 0.6. Per questo studio è stato scelto un valore di 0.075 poiché è confacente all'area di analisi che risulta parzialmente endoreica (Mamadou, 2009) ed è al limite inferiore poiché le precipitazioni di guecheme sono un po' maggiori di quelle del bacino del dallol Maouri a monte.

Il calcolo delle portate di piena (Q)(Tabella 4) è stato quindi eseguito con la formula razionale⁶ così come segue:

$$Q = C * i * A$$

Dove:

C = Coefficiente di ruscellamento;

i = Massimi di precipitazione [mm];

A = Superficie del bacino [km²].

Tabella 4 - Calcolo delle portate di piena

TR [anni]	Q [m ³ /s]
2	812
20	1328
200	1754

3.1.6. Costruzione del modello idraulico

La fase finale della costruzione del modello idraulico e dunque della sua restituzione cartografica è stata eseguita attraverso il software HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), versione 5.0.6, software prodotto dalla U.S. Army Corps of Engineers, dedicato alla realizzazione di modelli idraulici mono-dimensionali o bi-dimensionali (US Army Corps of Engineers, 2016).

⁶ Per approfondimenti: HydroCAD Stormwater Modeling, Rational Method.
<https://www.hydrocad.net/rational.htm>.

Il modello costruito per questo caso studio è di tipo mono-dimensionale, ossia basato sulla definizione di sezioni idrauliche trasversali alla direzione del letto fluviale (o dell'alveo). Data la morfologia della valle del dallol e l'assenza di un letto stabile, le sezioni sono state tracciate trasversalmente alla direzione dell'intera valle del dallol, considerata come alveo di piena. Le sezioni di inizio e di fine sono state tracciate ben oltre i limiti dell'area di studio, per minimizzare gli errori che si presentano ai limiti del modello, inoltre, per fornire maggior dettaglio ed accuratezza, le sezioni di base sono state infittite per interpolazione (Massazza, 2019).

Il modello viene quindi calcolato attraverso l'incrocio dei dati altimetrici delle sezioni, dei dati planimetrici dell'alveo, della rugosità dell'alveo e dei i valori di portata ottenuti in precedenza per ciascun tempo di ritorno.

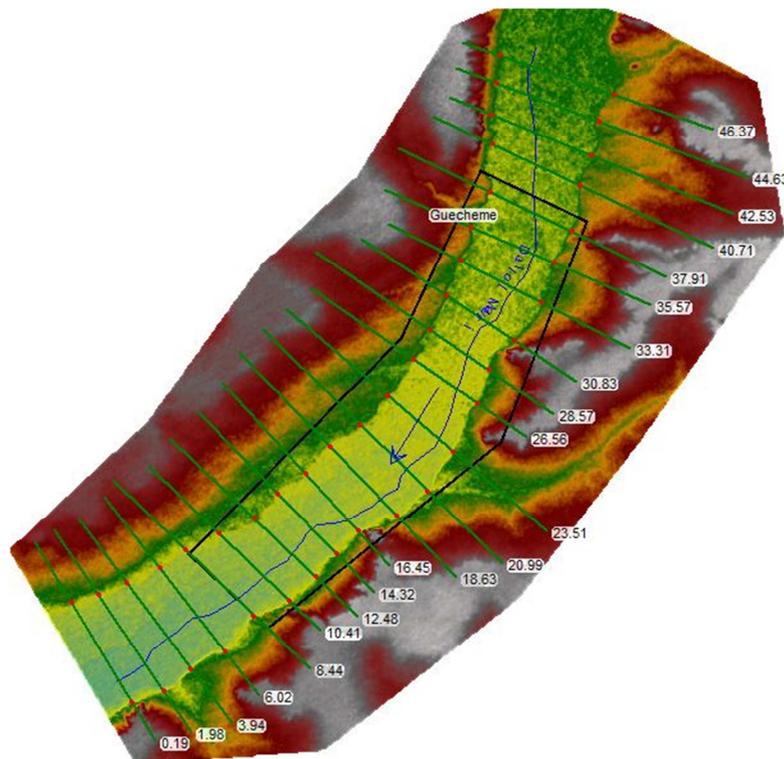


Figura 8 - Sezioni trasversali del letto fluviale del dallol per il modello idraulico numerico

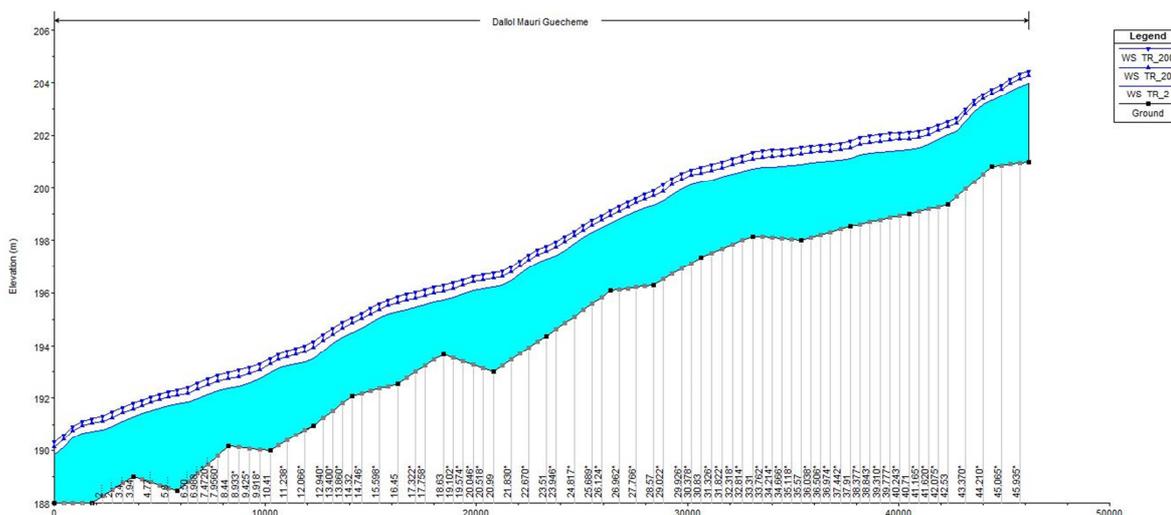


Figura 9 - Profilo della profondità delle portate di piena per ogni tempo di ritorno lungo il letto fluviale del datto

3.1.7. Rappresentazione cartografica dei perimetri d'inondazione ed interpretazione del modello

I risultati del modello idraulico prodotto tramite il software HEC-RAS è stato esportato in formato ESRI Shapefile e caricato su QGIS. La restituzione cartografica tiene conto dell'aspetto legato alla probabilità di un evento alluvionale, corrispondente ad uno specifico tempo di ritorno, di verificarsi. La scelta dei colori è quindi legata all'aspetto del rischio, con un colore più scuro per eventi altamente probabili ed un colore più chiaro per eventi scarsamente probabili (seppur di portata maggiore e con danni ipoteticamente più ingenti) (Figura 10). Questa chiave di lettura è utile per identificare le aree edificate che presentano quindi un'alta probabilità di essere colpite da un evento alluvionale e fornisce inoltre elementi per comprendere se le dinamiche insediative nel tempo siano legate al rischio alluvionale.

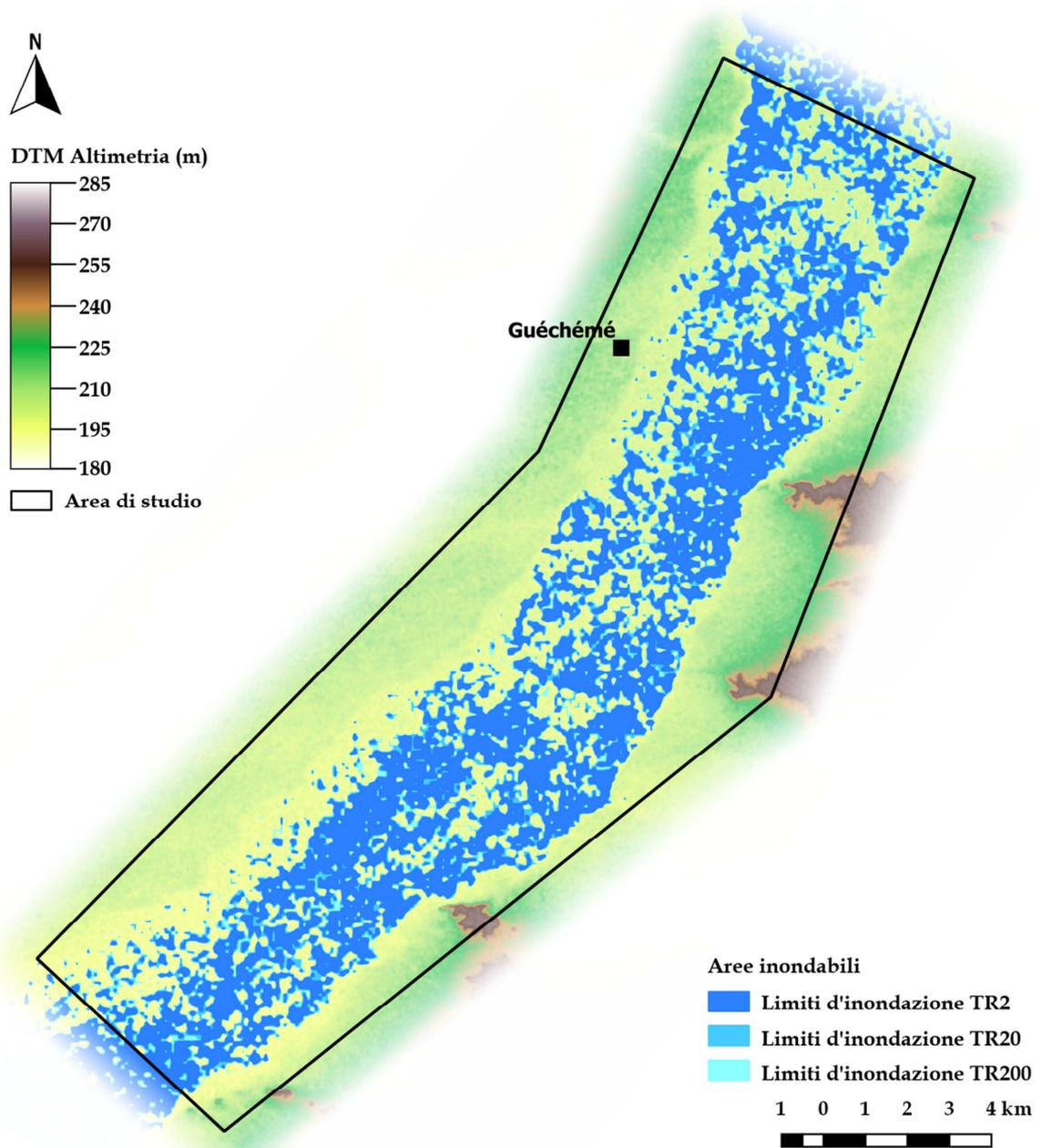


Figura 10 - Aree inondabili nel dallol di Guéchémé secondo tre scenari di probabilità

3.2. Definizione di un metodo semi-automatico di classificazione di aree edificate basato su immagini satellitari

3.2.1. Introduzione

Il presente capitolo è dedicato all'analisi e all'interpretazione di immagini satellitari ad altissima risoluzione dell'area di studio. L'obiettivo di tale analisi è la definizione e successiva sperimentazione di un metodo semi-automatico con il quale classificare l'immagine al fine di estrarre informazioni a valore aggiunto, in particolare l'estensione delle aree edificate. Grazie alla disponibilità di immagini con una risoluzione geometrica di circa 0,5 m, è possibile infatti estrarre informazioni geometriche e tematiche su oggetti come edifici e piccoli manufatti (caratteristica tipica dell'area di studio, dove le aree edificate sono composte per lo più da edifici di piccole dimensioni e altri manufatti minori come capanne, tettoie e pozzi) attraverso algoritmi di classificazione tematica dell'immagine. Data la natura sperimentale di questa fase, essa rappresenta un processo di apprendimento con cui identificare e validare un metodo efficace per ridurre al minimo le operazioni di post-classificazione.

3.2.2. Algoritmi di classificazione

Esistono varie metodologie di classificazione di immagini. Analizzando la letteratura a riguardo, sono generalmente due le metodologie di classificazione: la prima si basa su algoritmi di tipo pixel-based; la seconda si basa su algoritmi di tipo object-oriented (Yan, 2006).

La prima categoria include algoritmi di classificazione (suddivisi in supervised e unsupervised) che agiscono direttamente su ogni cella dell'immagine per ottenere una rappresentazione tematica per classi definite, le quali rappresentano in genere classi di uso o copertura del suolo con caratteristiche radiometriche (ossia dei valori di radianza rilevati dal sensore nelle diverse lunghezze d'onda spettrali) omogenee. Alcuni campioni rappresentativi di ogni classe sono utilizzati come dato di input dell'algoritmo di classificazione, che assegna ogni cella dell'immagine ad una delle classi in funzione delle sue caratteristiche spettrali o, alternativamente, alla classe "non classificato".

La seconda categoria include algoritmi di classificazione che tengono conto anche delle relazioni tra celle adiacenti (relazioni di tipo geometrico o radiometrico). Un esempio è l'algoritmo di segmentazione dell'immagine, ovvero il partizionamento in regioni omogenee sulla base di un certo criterio di appartenenza dei pixel ad una regione (Battiato, 2011).

L'efficacia di un'operazione di classificazione, è influenzata da numerosi fattori relativi all'immagine su cui la si applica ed anche dal tipo di superficie oggetto della classificazione:

- Innanzitutto la presenza di copertura nuvolosa o di diffusione atmosferica, che impedisce il rilevamento delle superfici o ne riduce drasticamente la visibilità, introducendo rumore nelle firme spettrali delle superfici indagate;
- La direzione del sole nel momento di acquisizione (in termini di azimuth), la sua elevazione rispetto alla linea di orizzonte che determina l'estensione delle ombre proiettate sul suolo e la posizione del sole rispetto alla direzione cui il sensore sta rilevando, che può determinare alta riflettività su particolari superfici, con

conseguente saturazione del sensore. Tuttavia la proiezione dell'ombra sul suolo può rappresentare anche un vantaggio (Ok, 2016);

- L'angolo di off-nadir, determinato dall'angolo tra la direzione di acquisizione e la verticale dell'asse ottico del sensore che, oltre a generare distorsioni prospettiche, induce una perdita di informazioni in quanto gli oggetti che si elevano dal suolo oscurano le aree dietro ad esse;
- La composizione del materiale delle superfici, le quali determinano le differenti risposte radiometriche rilevate dal sensore, note come firme spettrali. Maggiore la differenza di tali firme, maggiore la possibilità di distinguere le superfici in classi differenti.

3.2.3. Test preliminari di classificazione

Al fine di ottenere la delineazione delle aree edificate, e quindi delle aree abitate, il più possibile accurata (dato l'impiego di metodi semi-automatici), sono stati eseguiti test preliminari finalizzati alla sperimentazione e validazione di diversi algoritmi di classificazione disponibili nei software utilizzati.

Tali test sono stati eseguiti su due immagini satellitari già disponibili al gruppo di ricerca e relative a diverse zone geografiche:

- La prima⁷, acquisita con il sensore GeoEye-1, ricopre un'area di 130 km² lungo il corso d'acqua Dargol, in corrispondenza dell'abitato di Tera, situato a circa 200 chilometri a nord-ovest di Niamey, la capitale del Niger; L'immagine è stata acquisita il 17 settembre 2010, ore 10:31 GMT, con un angolo off-nadir di 14,2 gradi. L'immagine è caratterizzata da 4 bande multispettrali (tre nel visibile e una nell'infrarosso vicino) con risoluzione nominale di 2 m, e una banda pancromatica con risoluzione nominale di 0.5 m. L'area rilevata presenta una copertura nuvolosa del 7%, oltre che un'elevata diffusione atmosferica nella zona più orientale.
- La seconda⁸, acquisita con il sensore WorldView-2, ricopre un'area differente di 100 km² lungo il corso d'acqua Dargol, ma più a valle, in corrispondenza dell'abitato di Gothèye e in prossimità della confluenza con il fiume Niger. L'immagine è stata acquisita il 28 agosto 2014, ore 10:57 GMT, con un angolo off-nadir di 27.9 gradi. L'immagine è anch'essa caratterizzata da 4 bande multispettrali (tre nel visibile e una nell'infrarosso vicino) con risoluzione nominale di 2 m, e una banda pancromatica con risoluzione nominale di 0.5 m. L'area rilevata presenta una copertura nuvolosa dello 0,1%.

3.2.3.1. Pre-processamento delle immagini satellitari

Prima di procedere con i test, è necessario descrivere alcune operazioni di pre-processamento dei dati satellitari fondamentali per il corretto utilizzo dei prodotti derivati da esse.

Durante i test eseguiti per il lavoro di tesi, sono state effettuate le seguenti operazioni di pre-processamento: calibrazione radiometrica, dark subtraction, ortorettifica ed infine pansharpening. Queste operazioni sono state eseguite attraverso

⁷ GeoEye, GeoEye-1 scene 2010091710314181603031607224, 10 September 2009.

⁸ WorldView, WorldView -II scene 053799140010, 28 August 2014.

il software ENVI, versione 5.1, acronimo di Environment for Visualizing Images, nelle due varianti ENVI e ENVI Classic (Exelis Visual Information Solutions, 2013). Si tratta di un software di analisi di immagini geospaziali prodotto dalla Harris Geospatial Solutions, ampiamente utilizzato nel campo del telerilevamento.

Nello specifico, le operazioni eseguite sono:

- La calibrazione radiometrica è un'operazione di correzione radiometrica dei sensori che converte il segnale registrato dal sensore in valori di radianza o di riflettanza (in funzione dei dati ancillari disponibili). La radianza esprime il valore di flusso radiante per unità di superficie e di angolo solido secondo una certa direzione e misurata su un piano ortogonale a tale direzione;
- La dark subtraction è un'operazione di correzione atmosferica di errori imputabili principalmente alla diffusione atmosferica, con il quale si sottraggono ad ogni banda, i relativi valori minimi registrati dal sensore.
- L'ortorettifica è un'operazione di correzione geometrica di errori di posizionamento dovuti alla morfologia della superficie rilevata, per cui in presenza di rilievi i punti rilevati sull'immagine risultano spostati rispetto alla loro posizione teorica sul piano cartografico, proporzionalmente all'inclinazione del sensore (angolo di off-nadir) e alla quota del punto rispetto al piano cartografico. Nella fase di test tale operazione è stata omessa, in quanto non rilevante ai fini dell'individuazione del metodo di classificazione più appropriato.
- Il pansharpening è un algoritmo applicabile ad immagini satellitari di tipo bundle: entrambi i sensori di acquisizione delle immagini utilizzate acquisiscono n bande multispettrali con una risoluzione geometrica nominale di 2 metri e una banda pancromatica con una risoluzione geometrica nominale di 0,5 metri.. L'operazione di pansharpening è utile per integrare le informazioni radiometriche del dato multispettrale e la risoluzione geometrica del dato pancromatico. Avendo a disposizione più metodi di pansharpening, con risultati molto diversi tra loro, si è ritenuto utile sperimentarli tutti per valutare qualitativamente il metodo più idoneo ai sensori in oggetto. Da questo test è stato individuato come metodo più efficace l'algoritmo "Gram-Schmidt" (Maurer, 2013).

Relativamente alla calibrazione radiometrica di entrambi i dati a disposizione (multispettrale e pancromatico) è stato necessario reperire i valori di gain e offset, ottenuti sperimentalmente in fase di calibrazione dei sensori sia prima della messa in orbita sia durante la vita operativa del satellite. Tali valori non sempre sono presenti di default nei metadata delle immagini, pertanto è stato necessario recuperarli dai documenti tecnici dei sensori di acquisizione. E' stato quindi consultato un documento reso disponibile dalla società Digital Globe (Kuester, 2017) (società proprietaria dei satelliti GeoEye-1 e Worldview-2) il quale contiene i valori di gain e offset per ogni banda e la formula per la conversione dei Digital Number (DN) in valori di radianza, qui di seguito riportata:

$$Radianza L = GAIN * DN \left(\frac{abscalfactor}{effectivebandwidth} \right) + OFFSET$$

Dove DN rappresenta il digital number, ovvero il valore digitale attribuito ad una cella dell'immagine dal convertitore analogico/digitale, mentre gli altri valori sono parametri di calibrazione radiometrica di ogni sensore ricavati pre-volo e aggiornati

con operazioni di calibrazione durante il volo, in particolare Gain, Abscal factor, Effective bandwidth, Offset.

Si è ottenuto quindi il dato conclusivo della fase di preprocessamento dei dati a disposizione. Essendo questi file di dimensioni molto grandi, si è deciso, per limitare i tempi di elaborazione del software, di lavorare solo su una porzione dell'immagine (subset) che contenesse almeno un centro abitato di dimensioni sufficienti per i test di classificazione.

3.2.3.2. Test di classificazione

Gli algoritmi di classificazione testati, in questa prima fase, sono tutti di tipo supervised (che richiedono quindi un input fornito dall'operatore): questo perché forniscono, in genere, risultati migliori degli algoritmi unsupervised (i quali invece identificano autonomamente le classi che caratterizzano un'immagine, come ad esempio l'ISODATA).

Essendo questa tipologia di classificatori il risultato di algoritmi basati sulla firma spettrale dei campioni delle superfici scelte, presentano un certo grado di errore, sia in termini di celle omesse dalla classificazione (ovvero quelle celle che rappresentano l'oggetto, ma che risultano non classificate o classificate diversamente) sia di celle classificate erroneamente, definiti come falsi positivi ed appartenenti in realtà ad altre classi. Maggiore è la variabilità radiometrica del campione selezionato (proporzionale alla deviazione standard della radianza), maggiore sarà la probabilità di errori di commistione.

Questi tipi di errori si presentano anche negli algoritmi object-oriented, in questo caso influenzati non solo dalla componente radiometrica di una cella, ma anche dalle relazioni spaziali tra celle adiacenti.

Per le prime due immagini di test sono stati quindi condotti dei test di classificazioni basati sul seguente flusso di lavoro:

- Sono stati dapprima individuati i campioni di addestramento (noti come Region of Interest o ROI) di superfici appartenenti alle classi scelte (di particolare importanza gli edifici e il terreno battuto degli spazi aperti). Per ogni classe individuata è stato necessario selezionare più poligoni per migliorare la caratterizzazione e significatività statistica del campione della classe in esame.
- Sono stati quindi testati cinque diversi algoritmi di classificazione supervised: Minimum Distance, Parallelepiped, Mahalanobis Distance, Maximum Likelihood e Spectral Angle Mapper (SAM). Per ognuno di essi sono stati eseguiti diversi test modificando il valore del parametro discriminante, al fine di trovare il giusto compromesso tra celle omesse e falsi positivi. Ogni algoritmo possiede infatti un parametro (in genere un valore di soglia) secondo cui determinare quali celle considerare come appartenenti alle categorie definite. Per i primi tre algoritmi citati, tale parametro rappresenta la massima standard deviation rispetto alla media: per il Maximum likelihood tale parametro rappresenta una soglia di probabilità mentre per lo Spectral Angle Mapper è l'ampiezza dell'angolo in radianti.
- Per valutare l'accuratezza di ogni classificatore è stata calcolata la matrice di confusione per ogni test effettuato, al fine di verificare l'accuratezza mettendo a confronto le ROI usate per la classificazione con campioni di "verità al suolo" (ground truth). I risultati di ogni matrice di confusione sono stati raccolti e messi

a confronto per poter valutare la performance di ogni classificatore attraverso opportune metriche di accuratezza tematica.

3.2.3.3. Risultati ed osservazioni

Il confronto delle metriche di accuratezza degli algoritmi permette di identificare un numero limitato di algoritmi da testare nelle fasi successive. Infatti, algoritmi come il Minimum Distance e il Parallelepiped hanno registrato le performance più basse, seguiti dal Mahalanobis Distance, con buone performance, ma a scapito di un'elevata percentuale di falsi positivi; il Maximum Likelihood ha registrato basse percentuali di falsi positivi, ma allo stesso tempo basse accuratezze dovute ad un'alta percentuale di errori di omissione; le migliori performance si sono quindi ottenute attraverso lo Spectral Angle Mapper, seppure con percentuali di falsi positivi più elevati rispetto al Maximum Likelihood. Per questo motivo, i dati riportati nel seguito sono riferiti al solo SAM.

Le modeste percentuali di accuratezza finora riscontrate, fanno emergere tuttavia dei limiti nell'utilizzo di questo metodo, tra cui:

- Il primo limite è relativo alla natura stessa degli algoritmi pixel-based, quando applicati in contesti complessi come quello in esame. L'ipotesi a priori è che una buona classificazione tra diverse superfici dipenda da quanto tali superfici differiscano nella loro firma spettrale. Nel caso specifico gran parte dell'edificio presente nell'area di studio è costituito dallo stesso materiale del suolo battuto (generalmente quindi terra lavorata). Tale ipotesi è stata verificata, riscontrando un elevato grado di sovrapposizione delle firme spettrali di queste due superfici per cui i classificatori riconoscono gran parte delle celle di tali superfici come appartenenti alla stessa classe.
- Il secondo limite è relativo al metodo di verifica dell'accuratezza delle matrici di confusione in quanto, limitando la verità al suolo a campioni estratti analogamente a quanto fatto per i campioni utilizzati nei classificatori, si ottengono accuratezze maggiori di quelle reali (relative cioè all'intera immagine). Questo limite risulta evidente dall'analisi delle matrici di confusione. Se da un lato abbiamo ordini di accuratezza modeste o appena sufficienti (per l'immagine di Tera, attraverso il SAM, con un'ampiezza dell'angolo in radianti di 0.08, è stata ottenuta un'accuratezza del 67%; per l'immagine di Gothèye, attraverso lo stesso algoritmo e con un'ampiezza dell'angolo di 0.05, è stata ottenuta un'accuratezza del 56%), dall'altro lato vengono omessi tutti quei falsi positivi non inclusi nel dato di ground truth che diminuirebbero ulteriormente le accuratezze ottenute.

Di seguito sono riportati gli estratti su Tera e Gothèye di classificazione degli edifici, evidenziando soltanto la classe appartenente ad essi (Figura 11).

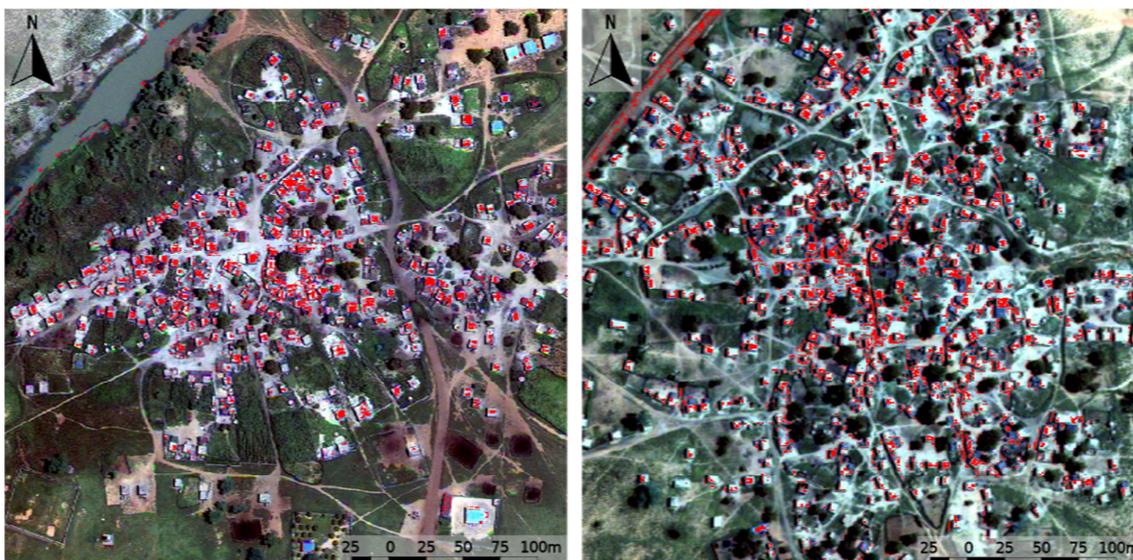


Figura 4 - Sinistra, Classificazione SAM degli edifici (in rosso) a Sékome; Destra, Classificazione SAM degli edifici (in rosso) a Gothèye

3.2.4. Test di classificazione su area di studio

3.2.4.1. Premessa e descrizione delle immagini satellitari

I risultati della fase di test hanno consentito di impostare l'analisi delle immagini acquisite sull'area di studio nei dintorni dell'abitato di Guéchémé. Un'analisi dell'evoluzione della dinamica insediativa richiede un arco temporale sufficiente per osservare dei cambiamenti apprezzabili del tessuto edilizio. Alla scarsità di dati satellitari di archivio a risoluzione idonea (i primi satelliti con sensori idonei sono stati messi in orbita a partire dagli anni 2000), viene incontro l'alto incremento demografico locale per cui i centri abitati si modificano ed evolvono a ritmi molto elevati e in un lasso di tempo ristretto. Alla luce di questo, si è riusciti ad individuare un dataset utile ai fini della fotointerpretazione, risalente al 2009. Tramite la richiesta di acquisizione di un nuovo dataset della stessa area nel 2019 è stato possibile un confronto multi-temporale su un periodo di 10 anni.

Le specifiche delle due immagini sono dunque:

La prima⁹ (Figura 12), acquisita con il sensore GeoEye-1, ricopre un'area di 210 km² lungo il dallo Maouri; Al fine di minimizzare la copertura nuvolosa sull'area di interesse, il dataset è costituito da due acquisizioni eseguite in due date differenti:

- La prima, che ricopre la porzione nord dell'area, è stata acquisita il 6 Ottobre 2009, ore 10:29 GMT, con un angolo off-nadir di 21,6 gradi. L'immagine non presenta una copertura nuvolosa;
- La seconda, che ricopre la porzione sud dell'area, è stata acquisita il 14 Ottobre 2009, ore 10:20 GMT, con un angolo off-nadir di 15,2 gradi. L'immagine presenta una copertura nuvolosa dell'1,1%.

⁹ GeoEye, GeoEye-1 scene 010474140010, 6-14 October 2009.

Entrambe le acquisizioni comprendono 4 bande nel multispettrale (tre nel visibile e una nell'infrarosso vicino) con risoluzione nominale di 2 m, e una banda in pancromatico con risoluzione nominale di 0.5 m;

La seconda¹⁰ (Figura 13), acquisita con il sensore WorldView-2, ricopre un'area leggermente minore del primo (207 km²) lungo il dallol Maouri: questa differenza è dovuta a un errore nei metadati relativo all'operazione di ortorettifica; Il dataset è costituito da due acquisizioni eseguite in due date differenti:

- La prima, che ricopre la porzione sud dell'area, è stata acquisita l'1 Settembre 2019, ore 10:18 GMT, con un angolo off-nadir di 20,7 gradi. L'immagine presenta una copertura nuvolosa del 3,9%.
- La seconda, che ricopre la porzione nord dell'area, è stata acquisita il 6 Settembre 2019, ore 10:33 GMT, con un angolo off-nadir di 26,8 gradi. L'immagine presenta una copertura nuvolosa del 3,1%;

Entrambe le acquisizioni comprendono 8 bande nel multispettrale (cinque nel visibile e tre nell'infrarosso vicino) con risoluzione nominale di 2 m, e una banda in pancromatico con risoluzione nominale di 0.5 m;

Il primo passo per l'analisi della dinamica insediativa è quindi la fotointerpretazione dell'immagine del 2009. Sono state eseguite le opzioni di pre-processamento del dato grezzo, analogamente alle immagini usate nella fase di test. Preliminarmente è stata eseguita un'operazione di mosaicatura dei dati (sia multispettrale sia in pancromatico) di entrambe le acquisizioni, che sono state consegnate suddivise in diverse porzioni di immagine. In seguito sono state eseguite le operazioni di calibrazione radiometrica, atmosferica ed ortorettifica delle immagini, attraverso il metodo RPC (Rational Polynomial Coefficients) che contiene i parametri della relazione geometrica tra le coordinate immagine e le coordinate nel sistema di riferimento geografico (Datum WGS84)¹¹. Infine, una volta eseguita l'operazione di pansharpening, si è ottenuto il dato finale da utilizzare come input per l'algoritmo di classificazione.

Ai fini di verificare l'efficacia degli algoritmi di classificazione sull'area di studio, i test sono stati effettuati su un'area limitata alla sola Guéchémé, l'area edificata più estesa rilevata nell'immagine a disposizione.

¹⁰ WorldView, WorldView-2 scene 1030010097333C00, 1-6 September 2019.

¹¹ Per approfondimenti: Harris Geospatial Solutions, Map Information in Envi, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/overviewmapinformationinenvi.html#Rational>.

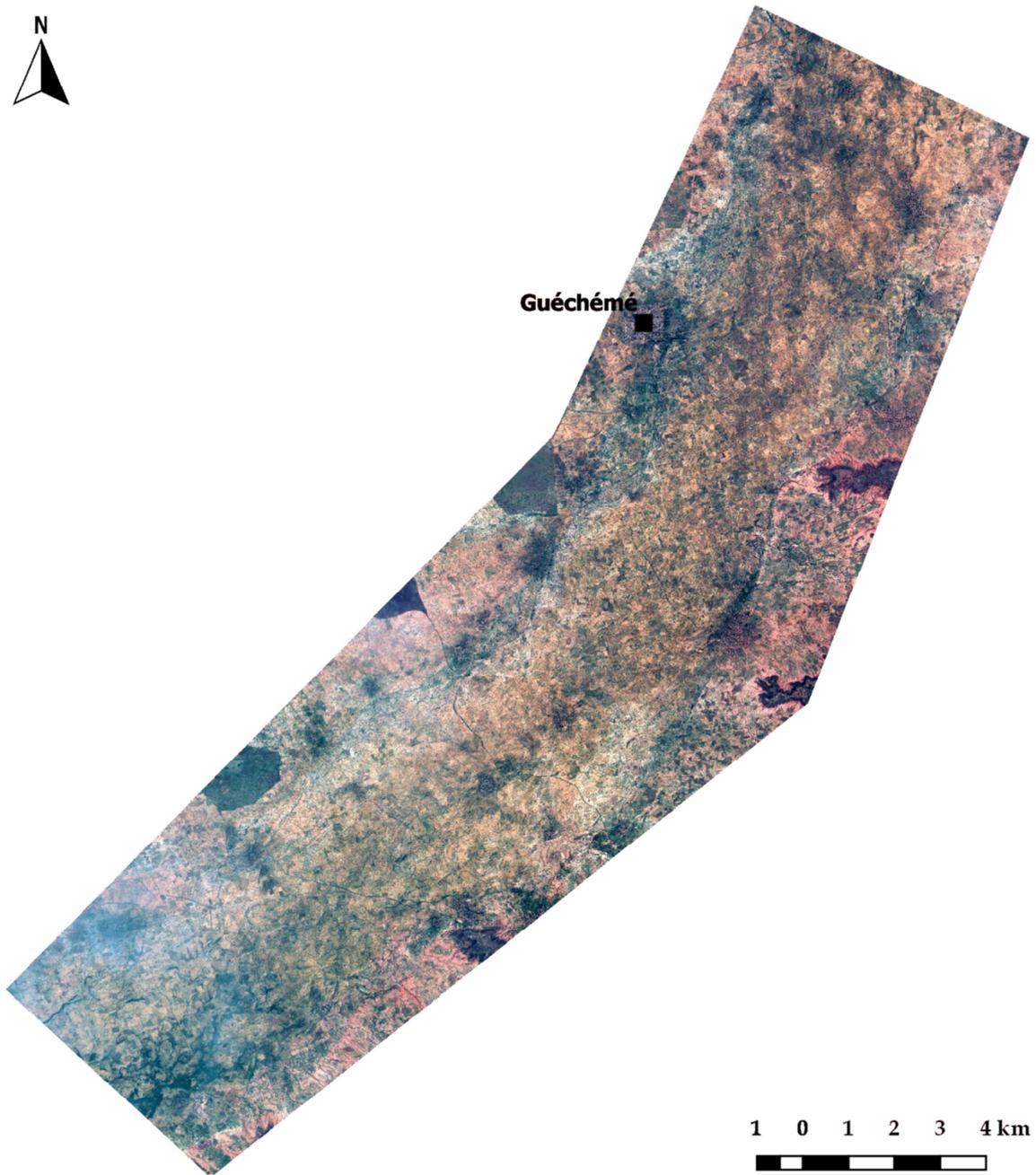


Figura 5 - Immagine satellitare (GeoEye-1) del dallol al 2009

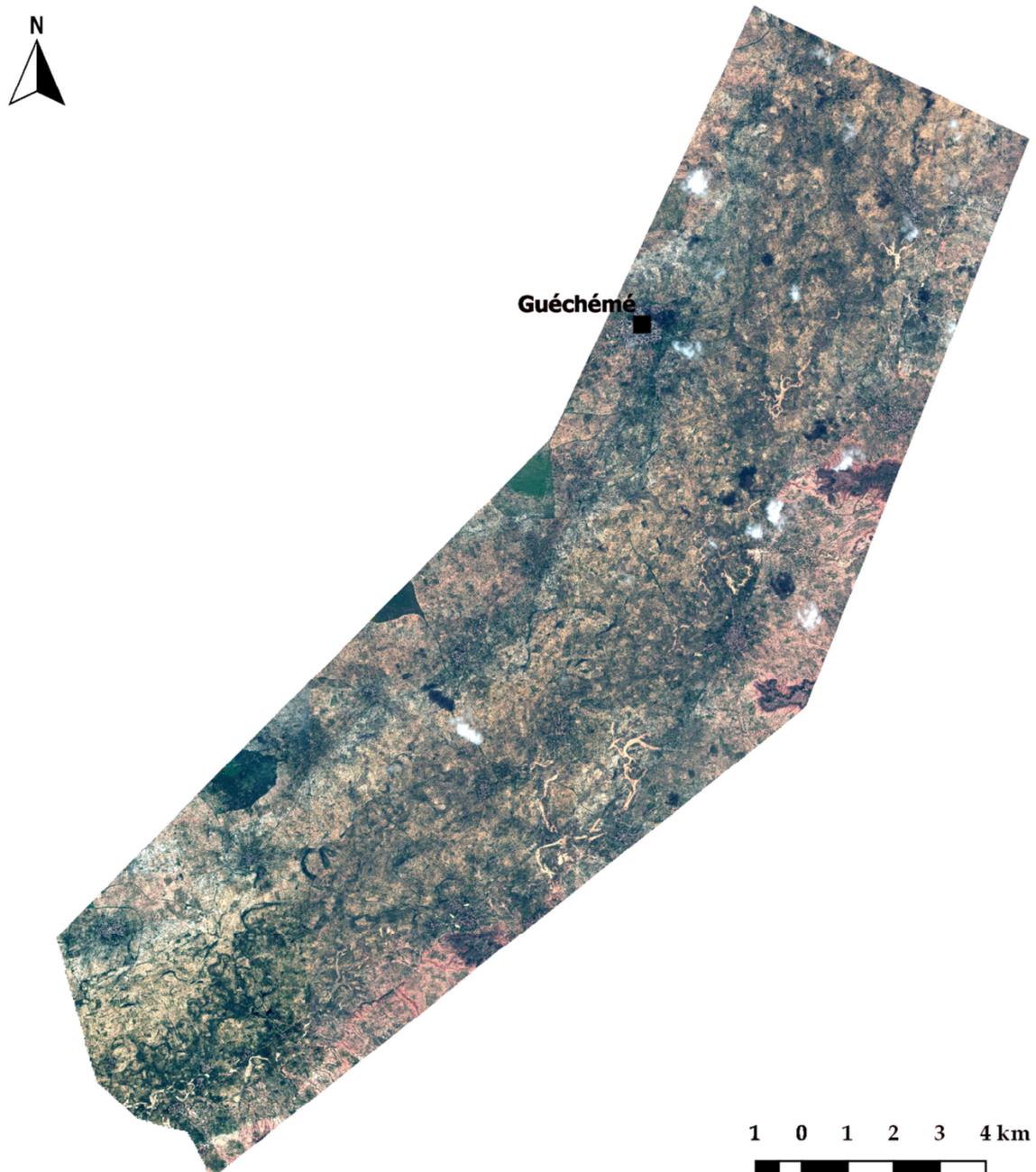


Figura 6 - Immagine satellitare (WorldView-2) del dallol al 2019

3.2.4.2. Test di classificazione

I test di classificazione si sono inizialmente concentrati sull'algoritmo Spectral Angle Mapper, come risultato del confronto dei livelli di accuratezza dei test preliminari. Il SAM è stato eseguito impostando un'ampiezza angolare differente per ogni classe estratta, in modo da equilibrare i rapporti di sovrapposizione tra le singole classi. Nonostante aver ottenuto un'accuratezza dell'83% (valutata attraverso la matrice di confusione), questo classificatore presenta comunque una quantità molto elevata di falsi positivi nelle aree non incluse nella ground truth, facendo calare sensibilmente l'accuratezza reale.

Alla luce del modesto risultato ottenuto, è stato scelto di sperimentare due ulteriori algoritmi di classificazione:

- Il primo è la segmentazione, facente parte della categoria di algoritmi object-oriented. Tale metodo genera cluster di celle omogenee da utilizzare come dato di input per una successiva classificazione. I criteri di appartenenza alle classi possono essere di tipo geometrico (forma, dimensione), o di tipo radiometrico (trama, texture).
- Il secondo è il Normalized Difference Built-up Index (NDBI), il quale rientra nella categoria degli indici spettrali, definiti come la combinazione di riflettanza tra due o più bande che hanno l'obiettivo di esprimere attraverso un'indice adimensionale la possibile appartenenza di una cella ad una determinata classe tematica¹². Nel caso specifico, l'NDBI mette in evidenza i manufatti antropici mediante la relazione tra le bande dell'infrarosso vicino e dell'infrarosso medio. Questa relazione è espressa dalla seguente rapporto tra combinazioni di bande:

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

Dove SWIR indica la prima banda dell'infrarosso medio e NIR indica la banda dell'infrarosso vicino.

Tale formula è stata tuttavia utilizzata in una seconda fase, applicandola all'immagine al 2019, in quanto contiene un maggior numero di bande, tra cui l'infrarosso medio. Per l'immagine al 2009, avendo a disposizione solo le bande del visibile più l'infrarosso vicino, l'operazione corrisponde ad una sintesi NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Dove NIR indica la banda dell'infrarosso vicino e RED indica la banda rossa del visibile.

Il primo algoritmo è stato eseguito, analogamente a quelli precedenti, con il software ENVI. L'immagine è stata quindi segmentata trovando la combinazione di valori migliore da assegnare ai diversi parametri richiesti. In seguito, l'algoritmo richiede la selezione manuale di campioni (example-based segmentation) che andranno a costituire le classi dell'immagine classificata. Le classi selezionate sono analoghe a quelle utilizzate nel SAM. Infine, l'algoritmo è stato eseguito secondo il metodo Principal Component Analysis (PCA) (Rodarmel & Shan, 2002). La verifica dell'accuratezza di questo classificatore è stata eseguita solo visivamente, con risultati, in questo caso, piuttosto soddisfacenti e visibilmente migliori della classificazione ottenuta attraverso il SAM.

I vantaggi dell'utilizzo dell'algoritmo di segmentazione, rispetto agli algoritmi pixel-based, è la capacità di semplificare l'immagine attraverso il raggruppamento di celle con caratteristiche radiometriche simili e la possibilità di includere, tra i parametri discriminanti, le relazioni geometriche tra insiemi di celle. Questa caratteristica è fondamentale quando si devono analizzare superfici composte da materiali simili, per cui le relative firme spettrali sono parzialmente sovrapposte.

¹² Per approfondimenti: Harris Geospatial Solutions, Spectral indices, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/SpectralIndices.html>.

Gli svantaggi dell'algoritmo di segmentazione è tuttavia l'elevato numero di parametri discriminanti da tenere in considerazione che richiede numerosi tentativi nel definire la combinazione migliore, aumentando considerevolmente i tempi di esecuzione. Un altro svantaggio, comune agli algoritmi pixel-based, è la variabilità dell'accuratezza a seconda del contesto geografico in cui si applica l'algoritmo e a seconda dei campioni selezionati che caratterizzano le singole classi.

L'indice NDBI è invece stato calcolato con il software ArcGIS Pro (versione 2.3), un software di Geographical Information System (GIS) prodotto da ESRI per l'analisi e l'elaborazione di dati geospaziali (ESRI, 2019).

Il prodotto dell'algoritmo è un'immagine in scala di grigi i cui Digital Number variano da -1 a 1. L'edificato è dunque rappresentato con tonalità chiare e valori superiori a 0. Attraverso un'operazione matematica viene infine prodotta un'immagine booleana (contenente quindi soltanto due valori 0 e 1) in cui isolare tutte le celle al di sopra di una certa soglia. Tale soglia viene stabilita caso per caso al fine di trovare il giusto compromesso tra errori di omissione e falsi positivi. Anche in questo caso, la verifica dell'accuratezza è stata effettuata solo al livello visivo, ma è risultato essere molto meno efficace della segmentazione.

La rappresentazione dei risultati delle classificazioni appena descritte sono sintetizzate nell'immagine seguente, il quale pone un confronto delle tre classificazioni sull'abitato di Guéchémé. Possiamo notare, almeno a livello visivo, alcune peculiarità di ogni classificatore (Figura 14):

- La segmentazione ha prodotto un discreto risultato, con una limitata quantità di falsi positivi e una sovrapposizione geometrica degli edifici quasi completa;
- Lo Spectral Angle Mapper ha prodotto un risultato simile alla segmentazione, ma con una sovrapposizione geometrica degli edifici meno precisa;
- L'indice NDVI, per l'immagine al 2009 e l'indice NDBI, per l'immagine al 2019, ha prodotto un risultato meno accurato, con una sovrapposizione geometrica degli edifici nettamente inferiore rispetto ai precedenti.

La variabilità dell'accuratezza di ogni algoritmo a seconda del contesto in cui è stato applicato, ha richiesto ulteriori test da effettuare sui singoli casi studio per determinarne rispettivamente l'algoritmo più performante ed accertare la fattibilità di questo metodo di estrazione semi-automatica di edifici.

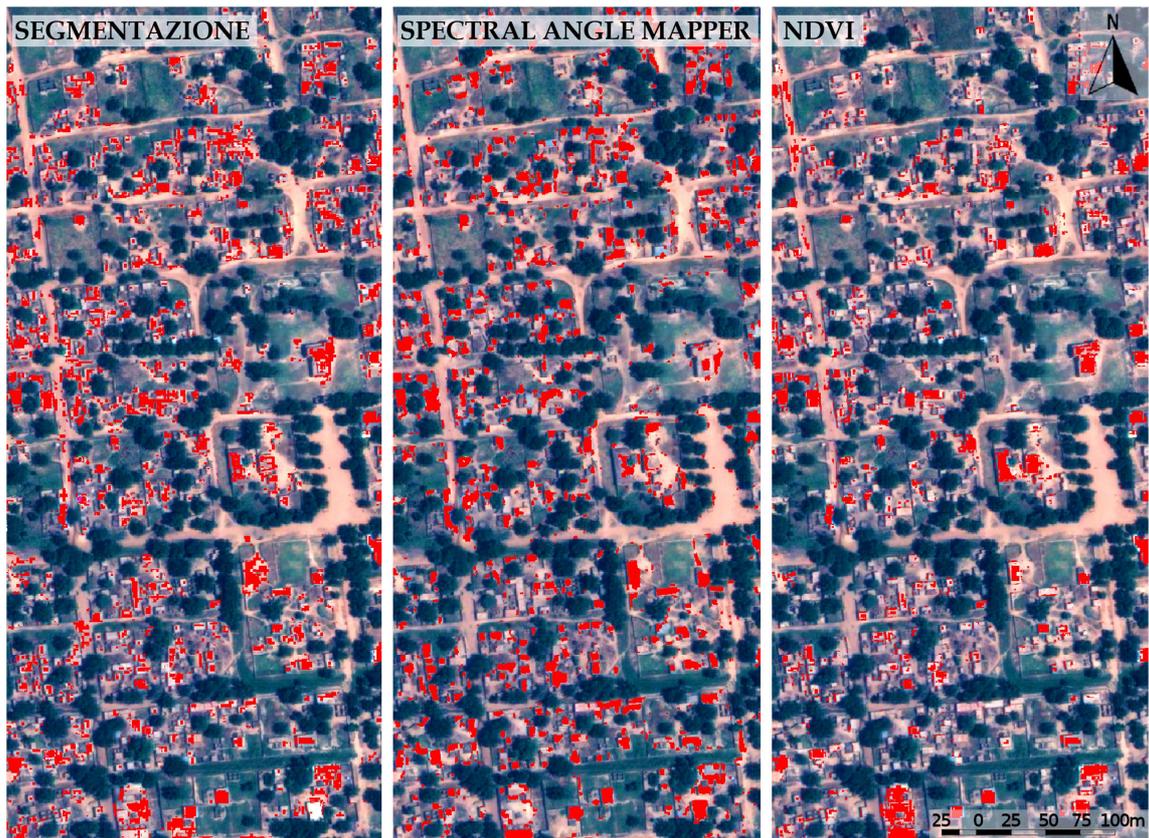


Figura 7 - Confronto di performance delle classificazioni su Guéchémé al 2009

4. Dinamica insediativa

Questo capitolo analizza la dinamica insediativa tra il 2009 e il 2019 nelle zone inondabili del dallol di Guéchémé. I dati di partenza sono i tre perimetri inondabili con tempo di ritorno di 2, 20 e 200 anni e tutte le superfici edificate presenti nell'area studio, rilevate tramite fotointerpretazione delle immagini satellitari. L'obiettivo di questa fase è di individuare le superfici edificate esposte ad inondazione, la loro dinamica e il processo di loro consolidamento.

4.1. Individuazione delle località inondabili

L'analisi della dinamica insediativa richiede anzitutto la ricognizione visiva delle aree edificate che ricadono (interamente o parzialmente) nella zona inondabile con tempo di ritorno di 200 anni. Il secondo passo è la perimetrazione delle aree edificate al 2009 e al 2019, il calcolo delle relative superfici e il confronto di esse nelle due date. La valutazione quantitativa dell'espansione edilizia e la valutazione visiva dell'incidenza di tale espansione nelle aree inondabili ha consentito di individuare le aree abitate da analizzare.

L'area di studio conta 110 località, alcune di discrete dimensioni, come il capoluogo comunale Guéchémé, che conta quasi 8500 abitanti; altre di dimensioni molto ridotte, limitate ad un nucleo di pochi edifici e con popolazione inferiore alle 50 unità. Le località sono state riportate cartograficamente suddividendole per classi di dimensioni basate sulla popolazione dal censimento del 2012, indicate nel repertorio nazionale delle località (RENALOC) (INS, 2014). Per le località sprovviste di dati sulla popolazione, è stata assegnata la classe di dimensione sulla base della loro estensione, confrontate con altre località di simili dimensioni. Esse sono state inoltre distinte sulla base delle aree inondabili, come determinato dalla modellazione idraulica (Figura 15).

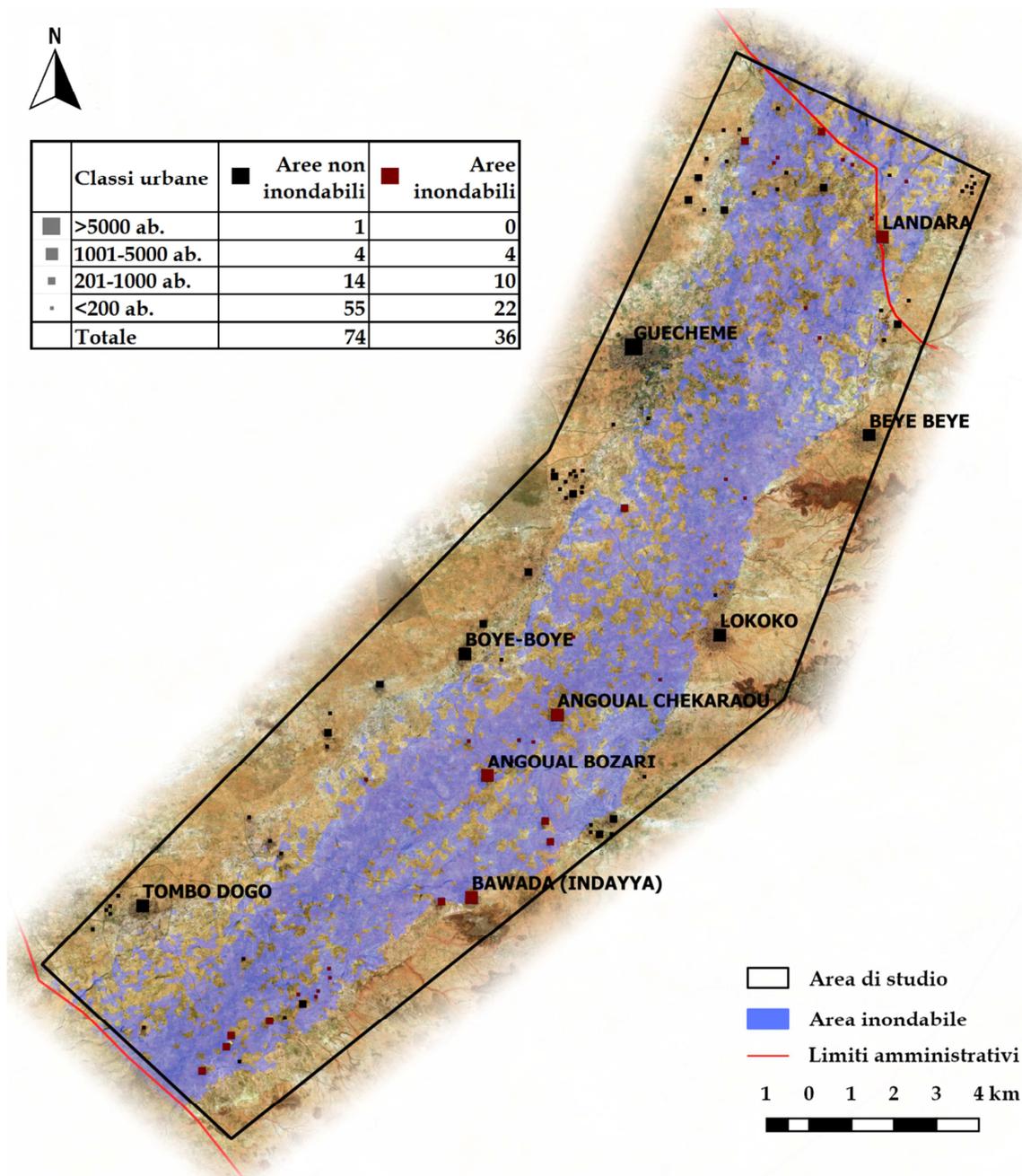


Figura 8 - Insediamenti nel dallol Maouri di Guéchéme per dimensione demografica ed esposizione ad inondazione (blu)

Delle oltre 100 località presenti nell'area di studio, 36 sono situate nell'alveo del dallol nella zona inondabile secondo un tempo di ritorno di 200 anni. Il numero di insediamenti in area inondabile non coincide al numero di insediamenti nell'alveo in quanto alcuni di essi sono situati su lievi alture tali da non essere interessati dall'area inondabile. Di 36 località individuate, nove di esse presentano una dinamica rilevante. In aggiunta, due località sono presenti soltanto al 2019 e una località è presente soltanto al 2009 (Tabella 5, Figura 16). Alcune località sono prive di toponimo perché non indicate nel repertorio nazionale delle località (RENALOC) (INS, 2014).

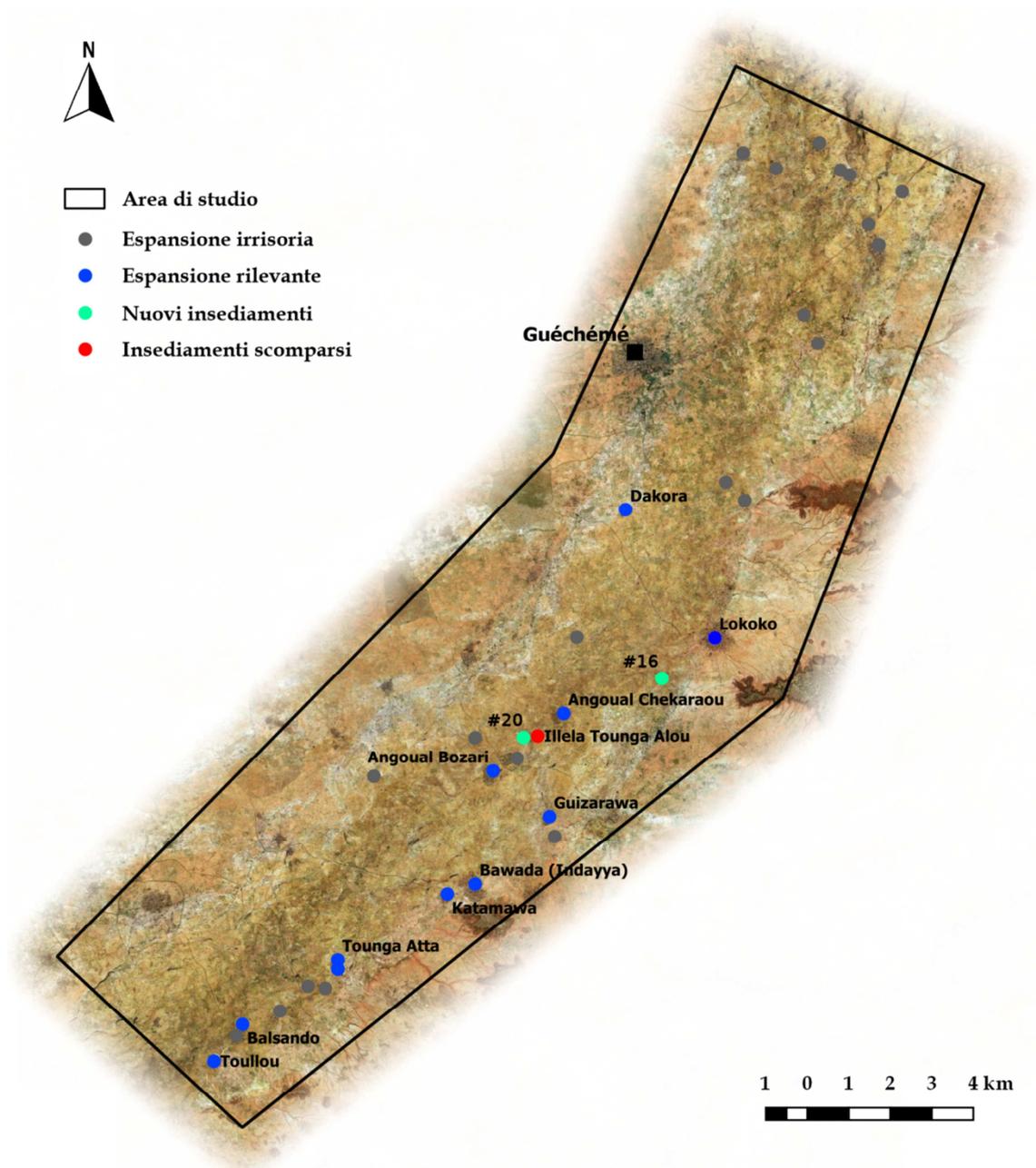


Figura 9 - Localizzazione dei 13 insediamenti analizzati del dallol Maouri a Guéchémé (12 insediamenti in area inondabile, uno fuori l'area inondabile)

Tabella 5 - Espansione edilizia degli insediamenti nel periodo 2009-2019

id	Località	Area			id	Località	Area		
		2009	2019	2009-19			2009	2019	2009-19
		ha		%			ha		%
1	Angoual Sarkin Toudou	4.09	5.32	+30%	19	Illela Tounga Alou	0.62	0	-100%
2	Choukoura	2.76	2.67	-3%	20	Angoual Abba	1.5	2.07	+38%
3	Tounga Nabirni	0.92	2.27	+147%	21	***	0	1.35	-
4	Tounga Labo	0.43	0*	-100%	22		0.17	0.22	+29%
5		0.22	0.35	+59%	23	Angoual Bozari	13.85	16.92	+22%
6	Tounga Bori (Dari)	0.36	0.5	+39%	24	Tounga Amadi	0.96	1.56	+63%
7		0.64	1.02	+59%	25	Guizarawa	3.84	5.07	+32%
8		1.98	2.32	+17%	26	Tounga Dobi	2.25	2.39	+6%
9	Landara	19.36	26.56	+37%	27	Bawada (Indayya)	25.52	32.95	+29%
10	Tounga Bissala	0.49	0.58	+18%	28	Katamawa	4.12	5.41	+31%
11	Tounga Makoche	0.65	1.19	+83%	29	Tounga Atta	1.41	2.5	+77%
12		0.16	0.2	+25%	30		0.27	0.39	+44%
13		0.4	0.48	+20%	31		0.2	0.2	+0%
14	Dakora	1.62	2.69	+66%	32		1.04	1.57	+51%
15	Lokoko**	38.85	47.51	+22%	33	Touhere	4.45	5.39	+21%
16		0.12	0.18	+50%	34	Balsando	2.8	4.44	+59%
17	***	0	0.85	-	35	Tounga Kagna	1.96	2.53	+29%
18	Angoual Chekaraou	28.63	70.71	+147%	36	Toullou	5.68	7.69	+35%
TOTAL							172.32	258.05	+50%
*Inglobata con Tounga Nabirni									
**Esterna all'area interessata dalle aree inondabili									
***Le località senza toponimo sono segnate come "#17" e "#21"									

Preso in considerazione la caratteristica comune di queste località di essere situate sull'alveo del dallol, si è ritenuto necessario includere nell'analisi una località situata all'esterno dell'area interessata dal dallol, al fine di osservare se, limitatamente alla sola località considerata, le dinamiche insediative delle località all'interno dell'alveo presentano le stesse caratteristiche delle località all'esterno. La località considerata è Lokoko, di dimensioni simili ad Angoual Chekaraou.

4.2. Riconoscimento dell'ambiente costruito

Sulla base dei risultati nei test di classificazione semi-automatica condotti in precedenza, sono stati effettuati i test di classificazione mirati alle singole località. Attraverso questa fase sarà possibile confermare o smentire i risultati precedenti, determinando la validità e la fattibilità di questa metodologia nel contesto territoriale in analisi.

Dato il numero elevato di località abbiamo limitato i test ad un paio di località, selezionate in considerazione dell'incidenza delle aree inondabili, della presenza di coperture in lamiera e della dimensione del centro abitato. Le località selezionate sono Angoual Chekaraou e Toullou (Figura 17). Il primo è stato scelto per la sua dimensione e la notevole espansione edilizia riscontrata anche su aree inondabili; il secondo è stato scelto in quanto ricade in maggior parte in area inondabile, seppur di dimensioni significativamente inferiori al primo.

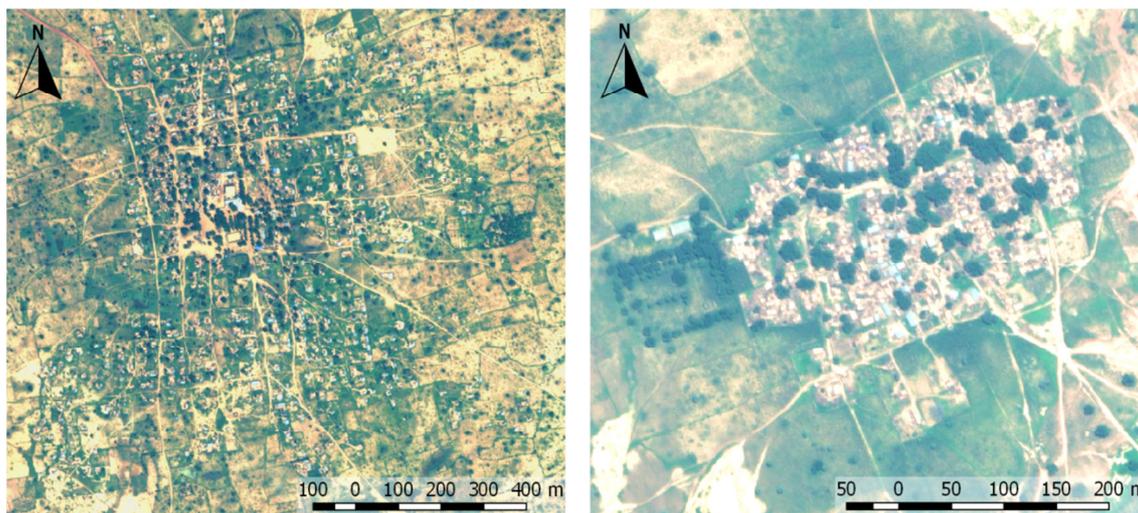


Figura 10 - Angoual Chekaraou (sinistra) e Toullou (destra) nel 2019

4.2.1. Estrazione semi-automatica dell'edificato tramite algoritmi di classificazione

Analogamente ai test precedenti, sono state eseguite classificazioni attraverso l'algoritmo Spectral Angle Mapper, la segmentazione e gli indici spettrali al fine di estrarre l'edificato delle località selezionate. :

- Il primo è stato eseguito regolando, caso per caso, l'ampiezza angolare delle classi acquisite, minimizzando la sovrapposizione radiometrica tra classi;
- Il secondo è stato eseguito ricercando tra i parametri geometrici, come punto forte del metodo object-oriented, la combinazione che restituisse il risultato migliore;
- Il terzo è infine stato eseguito ricercando il giusto compromesso tra errori di omissione e falsi positivi.

Per i primi due metodi sono stati definiti una serie di classi radiometriche al fine di ottenere risultati più precisi. Le classi definite sono: tre classi dedicate agli edifici, a seconda dei materiali utilizzati per le coperture (rispettivamente, lamiera, terra, terra/paglia); una classe di suolo (che comprende strade/spazi pubblici); una classe di vegetazione, nello specifico alberi (Figura 18).



Figura 11 - Classi radiometriche utilizzate con l'algoritmo SAM (Angoual Chekaraou, 2019)

La buona riuscita delle classificazioni è, come già detto, fortemente influenzata dal contesto territoriale e dai parametri di esecuzione dei classificatori, per cui per ogni contesto non è garantito che la performance migliore derivi dallo stesso classificatore. Per questo motivo, in questi due ambiti in analisi, si sono ottenuti risultati apprezzabili e significativi attraverso il SAM e gli indici spettrali.

I risultati, in formato raster, sono stati successivamente convertiti in formato vettoriale per la verifica dell'accuratezza attraverso un'analisi geospaziale..

La verifica dell'accuratezza è stata eseguita attraverso un metodo che fosse applicabile a tutte le classificazioni effettuate, in modo da ottenere valori coerenti e confrontabili: sono stati quindi digitalizzati manualmente gli edifici dei centri abitati analizzati da utilizzare come dato di Ground Truth, categorizzandoli in base al materiale delle coperture (terra, terra-paglia, lamiera). Il dato di accuratezza è ottenuto attraverso query di selezione per posizione che seleziona gli edifici che ricadono all'interno dei poligoni ottenuti dai classificatori, reiterando l'operazione per tutte le casistiche presenti (Tabella 6). Tali poligoni sono stati modificati attraverso un'operazione di buffer di 1.25 metri: questa operazione si è resa necessaria in quanto tra i poligoni di classificazione e gli edifici puntuali possono sussistere errori di georeferenziazione, omettendo parte degli edifici che sarebbero correttamente classificati. Il valore di 1.25 metri è scelto come il valore medio tra la risoluzione nominale del dato multispettrale dell'immagine satellitare (2 metri) e la risoluzione nominale del dato pancromatico (0.50 metri). Di seguito vengono riportati due estratti delle migliori classificazioni per località (Figura 19). Parallelamente, sono state eseguite query di selezione per posizione finalizzati a selezionare i poligoni delle classificazioni che non contengono alcun edificio, ottenendo i dati relativi ai falsi positivi (Tabella 7)

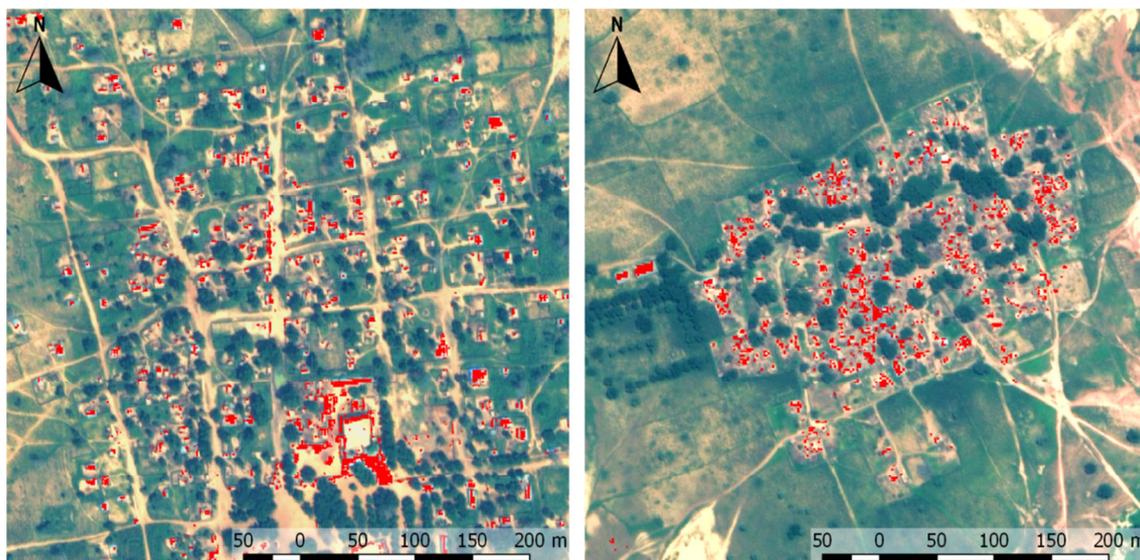


Figura 12 - Estratti di classificazione al 2019: NDBI su Angoul Chekaraou (sinistra); SAM su Toullou (destra)

Tabella 6 - Metrica di accuratezza degli algoritmi SAM e NDBI per le località Angoul Chekaraou e Toullou

Metrica di accuratezza	Materiale	Angoul Chekaraou				Toullou				
		Totale	Classificati	Errore di omissione	Accuratezza	Totale	Classificati	Errore di omissione	Accuratezza	
NDBI	2009	Terra	313	140	173	44.73%	152	12	140	7.89%
		Terra/paglia	75	62	13	82.67%	125	94	31	75.20%
		Lamiera	28	28	0	100.00%	8	8	0	100.00%
		Totale	416	230	186	55.29%	285	114	171	40.00%
NDBI	2019	Terra	462	234	228	50.65%	224	51	173	22.77%
		Terra/paglia	7	4	3	57.14%	50	15	35	30.00%
		Lamiera	397	361	36	90.93%	36	33	3	91.67%
		Totale	866	599	267	69.17%	310	99	211	31.94%
Spectral Angle Mapper	2009	Terra	313	220	93	70.29%	152	48	104	31.58%
		Terra/paglia	75	3	72	4.00%	125	51	74	40.80%
		Lamiera	28	26	2	92.86%	8	7	1	87.50%
		Totale	416	249	167	59.86%	285	106	179	37.19%
	2019	Terra	462	213	249	46.10%	224	138	86	61.61%
		Terra/paglia	7	1	6	14.29%	50	24	26	48.00%
		Lamiera	397	376	21	94.71%	36	31	5	86.11%
		Totale	866	590	276	68.13%	310	193	117	62.26%

Tabella 7 - Metrica di accuratezza degli algoritmi SAM e NDBI in relazione ai falsi positivi

Data	Algoritmo	Angoul Chekaraou SAM				Toullou SAM			
		Totale	Classificati	Falsi positivi	Accuratezza	Totale	Classificati	Falsi positivi	Accuratezza
2009	NDBI	373	167	206	44.77%	134	86	48	64.18%
	SAM	378	209	169	55.29%	176	47	129	26.70%
2019	NDBI	856	525	331	61.33%	206	76	130	36.89%
	SAM	890	542	348	60.90%	179	101	78	56.42%

Dalla metrica di accuratezza (Tabella 5 e 6) possiamo osservare alcuni elementi significativi:

- L'algoritmo SAM è risultato mediamente più efficace dell'indice NDBI/NDVI in entrambe le date, seppur con uno scarto esiguo;
- Le classificazioni al 2019 sono mediamente più efficaci di quelle al 2009 per 3 casi su 4. Questo fatto trova ragione nella miglior risoluzione spettrale dell'immagine al 2019 rispetto al 2009, consentendo una maggior discriminazione delle risposte radiometriche delle singole superfici;
- La scarsa performance dell'indice NDBI al 2019 può essere attribuita ad una drastica riduzione delle coperture in terra/paglia (con buone percentuali di classificati) unito ad un aumento esiguo delle coperture in lamiera rispetto al totale;
- Mentre le coperture in lamiera sono classificate correttamente per entrambe le date e con entrambi gli algoritmi, le coperture in terra risultano meglio classificate attraverso il SAM, viceversa le coperture in terra/paglia risultano meglio classificate attraverso l'NDBI/NDVI.

Gli elementi descritti trovano ampiamente conferma nell'analisi dei falsi positivi (Tabella 6), in cui l'accuratezza descrive quelle geometrie di classificazione su cui ricade uno o più edifici.

Le classificazioni eseguite hanno dunque confermato in buona parte i risultati già ottenuti in precedenza (ad eccezione della segmentazione) e hanno mostrato come un maggior numero di bande consente performance di classificazione migliori. Tuttavia, le percentuali di accuratezza ottenute attraverso questo metodo di verifica risultano inferiori alle percentuali ottenute in precedenza con le matrici di confusione: difatti, le ground truth usate nella matrice di confusione si basavano solo su alcuni edifici, rendendo i risultati meno significativi rispetto ad una ground truth che si basa sull'intero edificato della località.

Le percentuali ottenute dimostrano infine che nel contesto territoriale in analisi, metodi di estrazione semi-automatici di edifici tramite algoritmi di classificazione forniscono risultati con accuratezze tali da richiedere comunque una fase di fotointerpretazione dei dati per correggere/integrare le informazioni estratte. Ciò è imputabile in buona parte alla difficoltà di distinguere radiometricamente superfici molto simili dal punto di vista del materiale costruttivo e in parte alla risoluzione delle immagini satellitari in relazione alle dimensioni, talvolta molto minute, degli edifici da classificare. Questo metodo offre tuttavia strumenti più affinati, attraverso tecniche di deep learning, che consentono di ottenere risultati più promettenti rispetto agli strumenti utilizzati (Ghassemi, 2018), ma per via della loro complessità, non vengono trattati in questo studio.

4.2.2. Ricostruzione manuale dell'edificato tramite fotointerpretazione

La bassa accuratezza del metodo semi-automatico di estrazione degli edifici ha richiesto una fase di analisi insediativa basata su fotointerpretazione all'interno dei perimetri delle aree edificate definiti in precedenza. Gli edifici sono stati categorizzati a seconda delle seguenti tipologie di copertura: coperture in terra, coperture in terra/paglia (applicato alle capanne), coperture in lamiera. Questa suddivisione si basa su due considerazioni:

- Il tipo di edificio e il materiale usato per le coperture è indice di consolidamento del tessuto edilizio e un indicatore proxy di migliorate condizioni economiche secondo uno schema per cui:

coperture in terra/paglia → coperture in terra → coperture in lamiera;

- Differenti materiali utilizzati per le coperture comporta differenti risposte radiometriche delle stesse nella fase di rilevamento semi-automatico degli edifici tramite classificazione.

I dati relativi agli edifici sono riassunti nella seguente tabella (Tabella 8):

Tabella 8 - Tipologia di copertura degli insediamenti nel periodo 2009-2019

Località	Edifici											
	2009				2019				2009-2019			
	Terra	Terra/Paglia	Lamiera	Totale	Terra	Terra/Paglia	Lamiera	Totale	Terra	Terra/Paglia	Lamiera	Totale
Dakora	71	46	0	117	99	41	10	150	39%	-11%	-	28%
Lokoko	760	771	68	1599	1050	113	347	1510	38%	-85%	410%	-6%
Angoual Chekaraou	313	75	28	416	462	7	397	866	48%	-91%	1318%	108%
Illela Tounga Alou	33	6	1	40				-	-	-	-	-
Angoual Bozari	447	69	22	538	441	18	58	517	-1%	-74%	164%	-4%
Bawada (Indayya)	626	327	28	981	755	87	205	1047	21%	-73%	632%	7%
Katamawa	137	69	1	207	137	28	31	196	0%	-59%	3000%	-5%
Guizarawa	140	61	10	211	170	37	19	227	21%	-39%	90%	8%
Toullou	152	125	8	285	224	50	36	310	47%	-60%	350%	9%
Balsando	145	38	16	199	170	16	40	226	17%	-58%	150%	14%
Tounga Atta	52	49	1	102	95	43	7	145	83%	-12%	600%	42%
#21	-	-	-	-	35	2	8	45	-	-	-	-
#17	-	-	-	-	6	1	4	11	-	-	-	-
Totale	2116	865	115	3096	2594	330	815	3740	23%	-62%	609%	21%

Confrontando i dati delle tabelle 4 e 7, si può osservare come una significativa espansione dei limiti edificati sia accompagnata da aumento meno importante del numero di edifici, indicando una minore densità edilizia degli insediamenti. A livello di edificato possiamo osservare un rilevante aumento delle coperture degli edifici con tetto in lamiera ondulata (talvolta oltre 10 volte la quantità riscontrata nel 2009), un aumento modesto delle coperture in terra e per contro, una drastica riduzione delle coperture in terra/paglia. Inoltre, nel decennio 2009-2019, un piccolo centro abitato scompare e compaiono due nuove località abitate (nei dintorni del centro abitato più esteso).

Le dinamiche riscontrate trovano conferma anche nella località situata all'esterno del dallol, con trend simili e una significativa riduzione delle coperture in terra/paglia (-85%).

Per comprendere a pieno le caratteristiche dell'espansione edilizia è utile infine determinare la densità abitativa, la quale è calcolata, sulla base dei dati a disposizione, come il numero di edifici per ettaro (Tabella 9).

Tabella 9 - Densità edilizia per località tra 2009 e 2019

Località	Area		Edifici		Densità	
	2009	2019	2009	2019	2009	2019
	ha		Unità	Unità	Edifici/ha	Edifici/ha
Lokoko	38.85	47.51	1599	1510	41.2	31.8
Dakora	1.62	2.69	117	150	72.2	55.8
Angoual Chekaraou	28.63	70.71	416	866	14.5	12.2
Illela Tounga Alou	0.62	-	40	-	64.5	-
Angoual Bozari	13.85	16.92	538	517	38.8	30.6
Bawada (Indayya)	25.52	32.95	981	1047	38.4	31.8
Katamawa	4.12	5.41	207	196	50.2	36.2
Guizarawa	3.84	5.07	211	227	54.9	44.8
Toullou	5.68	7.69	285	310	50.2	40.3
Balsando	2.8	4.44	199	226	71.1	50.9
Tounga Atta	1.41	2.5	102	145	72.3	58.0
#21	-	1.35	-	45	-	33.3
#17	-	0.85	-	11	-	12.9
Total	126.94	198.09	4695	5250	37.0	26.5

Il primo fenomeno che risalta è una generale diminuzione della densità edilizia nel periodo 2009-2019. I valori di densità riscontrati fanno inoltre emergere la tendenza degli insediamenti di piccole dimensioni ad essere generalmente più dense degli insediamenti di dimensioni maggiori. Di particolare interesse è invece la densità della località Angoual Chekaraou, significativamente più bassa rispetto alle altre, tenendo conto anche delle dimensioni notevoli dell'insediamento.

4.3. Individuazione degli edifici esposti ad inondazione

L'incrocio dei dati relativi agli edifici e dei risultati della modellazione idraulica consente di determinare l'incidenza delle zone inondabili sul tessuto edilizio. Per ogni area abitata è stata valutata la quantità di edifici che ricadono rispettivamente nella zona inondabile con tempo di ritorno di 2, 20 e 200 anni. Applicando la stessa metodologia per entrambe le date è stato possibile effettuare un confronto della percentuale di edifici, rispetto al totale, che ricade in area inondabile per ogni tempo di ritorno.

E' stato inoltre valutato il rapporto tra l'espansione edilizia in zona inondabile (espressa come il rapporto tra edifici presenti al 2019 ed edifici presenti al 2009) e l'espansione edilizia totale: valori superiori ad 1 indicano che l'espansione in zona inondabile è più rapida dell'espansione totale; viceversa, valori inferiori ad 1 indicano che l'espansione totale è più rapida dell'espansione in zona inondabile (Tabella 10);, nella località Dakora, per esempio, gli edifici in zona inondabile con tempo di ritorno di 2 anni, aumentano quasi il doppio rispetto alla variazione degli edifici totali.

Tabella 10 - Valutazione degli edifici in aree inondabili del dallo di Guéchémé nel periodo 2009-2019

Località	Edifici in area inondabile										
	2009				2019				Rapporto di crescita		
	Edifici	TR2	TR20	TR200	Edifici	TR2	TR20	TR200	TR2	TR20	TR200
Dakora	117	15	22	23	150	37	44	47	1.92	1.56	1.59
Angoual Chekaraou	416	55	82	109	866	181	256	322	1.58	1.50	1.42
Illela Tounga Alou	40	38	40	40	-	-	-	-	-	-	-
Angoual Bozari	538	20	54	76	517	36	74	105	1.87	1.43	1.44
Bawada (Indayya)	981	302	354	379	1047	337	407	436	1.05	1.08	1.08
Katamawa	207	52	65	78	196	55	75	91	1.12	1.22	1.23
Guizarawa	211	5	20	40	227	3	26	38	0.56	1.21	0.88
Toullou	285	153	164	180	310	163	178	198	0.98	1.00	1.01
Balsando	199	69	77	86	226	79	88	96	1.01	1.01	0.98
Tounga Atta	102	102	102	102	145	144	145	145	0.99	1.00	1.00
#21	-	-	-	-	45	44	45	45	-	-	-
#17	-	-	-	-	11	6	9	11	-	-	-
Totale	3096	811	980	1113	3740	1085	1347	1534	1.11	1.14	1.14
Edifici in aree inondabili (%)	-	26%	32%	36%	-	29%	36%	41%	-	-	-

Tra i fenomeni osservati, si può affermare che il valore relativo di edifici situati in zona inondabile aumenta tra il 2009 e il 2019 in tutte e tre le zone inondabili, anche se di una percentuale esigua. Da ciò ne consegue un aumento degli edifici in zona inondabile che risulta più rapido dell'aumento totale degli edifici per 6 delle 9 principali località analizzate. E' stata individuata inoltre una località situata interamente in zona inondabile, presente in entrambe le date. Infine, tutte le località presenti a una sola data (una presente al 2009 e due al 2019) si trovano interamente in zona inondabile con tempo di ritorno di 200 anni.

4.3.1. Individuazione delle coperture in lamiera nelle zone inondabili

Un'analisi più approfondita è stata condotta in merito al consolidamento edilizio. La copertura degli edifici è uno dei miglioramenti più importanti degli edifici in quanto ne evita il crollo in caso di piogge intense. Di solito la copertura in terra cruda viene sostituita con quella in lamiera ondulata. Quest'ultimo materiale è nettamente distinguibile sulle immagini satellitari. Abbiamo conteggiato gli edifici con coperture in lamiera presenti in zona inondabile ed il rapporto tra coperture in lamiera in zona inondabile e in zona non inondabile alle due date. Infine abbiamo calcolato la loro variazione nel tempo.

Tabella 11 – Edifici con copertura in lamiera in aree inondabili del dallol di Guéchémé nel periodo 2009-2019

Località	Coperture in lamiera in area inondabile										
	2009				2019				Rapporto di crescita		
	Edifici	TR2	TR20	TR200	Edifici	TR2	TR20	TR200	TR2	TR20	TR200
Dakora	0	0	0	0	10	5	6	6	-	-	-
Angoual Chekaraou	28	4	7	12	397	101	146	182	1.78	1.47	1.07
Illela Tounga Alou	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-
Angoual Bozari	22	1	2	4	58	7	16	19	2.66	3.03	1.80
Bawada (Indayya)	28	9	10	10	205	77	87	91	1.17	1.19	1.24
Katamawa	1	1	1	1	31	8	8	9	0.26	0.26	0.29
Guizarawa	10	0	0	3	19	0	5	7	-	-	1.23
Toullou	8	8	8	8	36	28	29	30	0.78	0.81	0.83
Balsando	16	8	10	10	40	17	18	19	0.85	0.72	0.76
Tounga Atta	1	1	1	1	7	7	7	7	1.00	1.00	1.00
#21	-	-	-	-	8	44	45	45	-	-	-
#17	-	-	-	-	4	6	9	11	-	-	-
Totale	115	33	40	50	815	300	376	426	1.28	1.33	1.20
Edifici in aree inondabili (%)	-	29%	35%	43%	-	37%	46%	52%	-	-	-

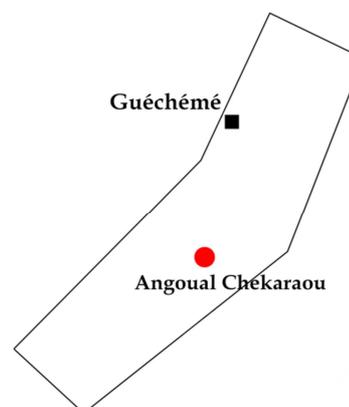
I risultati dei calcoli (Tabella 11) confermano i fenomeni già osservati in precedenza e ne amplificano l'entità, a partire dagli edifici situati in aree inondabili con range di percentuali relative del 29-43% al 2009, e percentuali relative del 37-52% al 2019, superando, per il tempo di ritorno di 200 anni, il 50% degli edifici totali. Inoltre, per 5 località su 9 analizzate, l'aumento degli edifici con copertura in lamiera in zona inondabile è maggiore dell'aumento totale degli edifici. Ad Angoual Bozari, per esempio, gli edifici con tetto in lamiera nella zona inondabile con tempo di ritorno di vent'anni aumentano tre volte l'aumento totale degli edifici.

4.4. Analisi di tre località emblematiche

In questa sezione vengono approfondite le dinamiche insediative di alcune località, scelte per la dinamica prevalente di interesse ai fini dello studio.

4.4.1. Angoual Chekaraou

Angoual Chekaraou è una località importante nel dallol Maouri (1440 abitanti al 2012). Situato a circa 9 chilometri a sud di Guéchémé, è collegata ad essa da un'unica strada sterrata, e alle altre località con piste. Angoual Chekaraou è passato da 29 a 71 ettari tra il 2009 e il 2019 (Tabella 5; Figura 20).



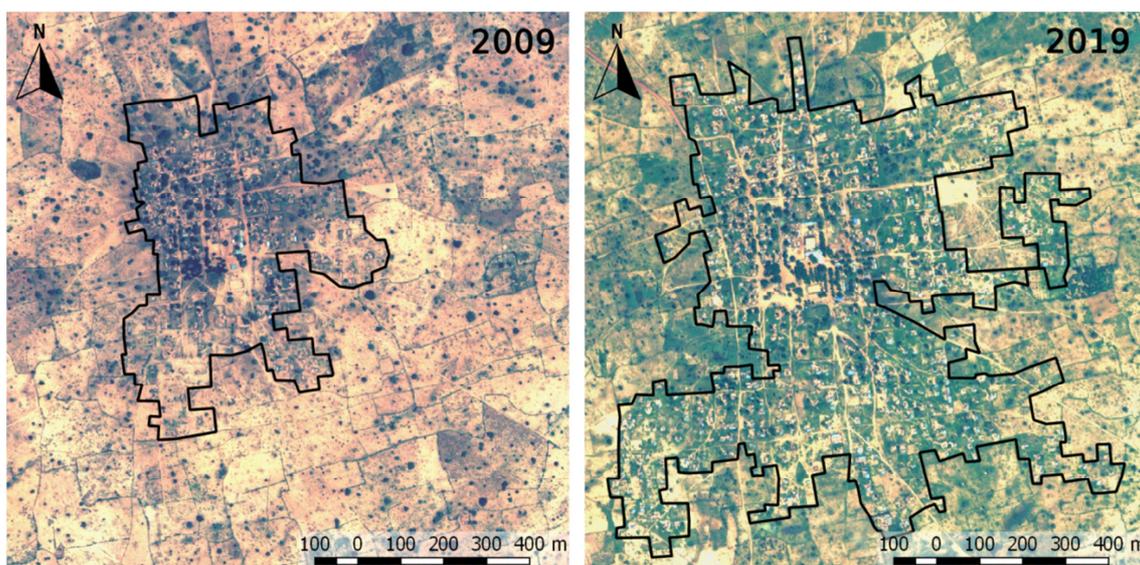


Figura 20 - Espansione di Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019

Espansione edilizia:

La dinamica dominante di Angoual Chekaraou è l'espansione edilizia e dei limiti insediativi attraverso nuove costruzioni con edifici semi-permanenti (Figura 22).

Gli edifici sono passati da 416 a 866 in soli dieci anni, con dinamiche interne simili alle altre località analizzate: scarso aumento delle coperture in terra, drastica riduzione delle coperture in terra/paglia, significativo aumento delle coperture in lamiera, contando al 2019, 397 edifici in lamiera su 866. Angoual Chekaraou presenta quindi la più alta percentuale, tra le località analizzate, di edifici in lamiera rispetto al totale degli edifici, ma registra anche la minore densità abitativa, con appena 12 edifici per ettaro nel 2019 (contro la media di 26.5). Tali caratteristiche sono ben visibili negli estratti cartografici (Figura 21), nei quali si nota, a sinistra, come le coperture in lamiera fossero concentrate maggiormente nella parte centrale dell'insediamento, mentre a destra, si nota una distribuzione delle coperture in lamiera su tutta l'area edificata.

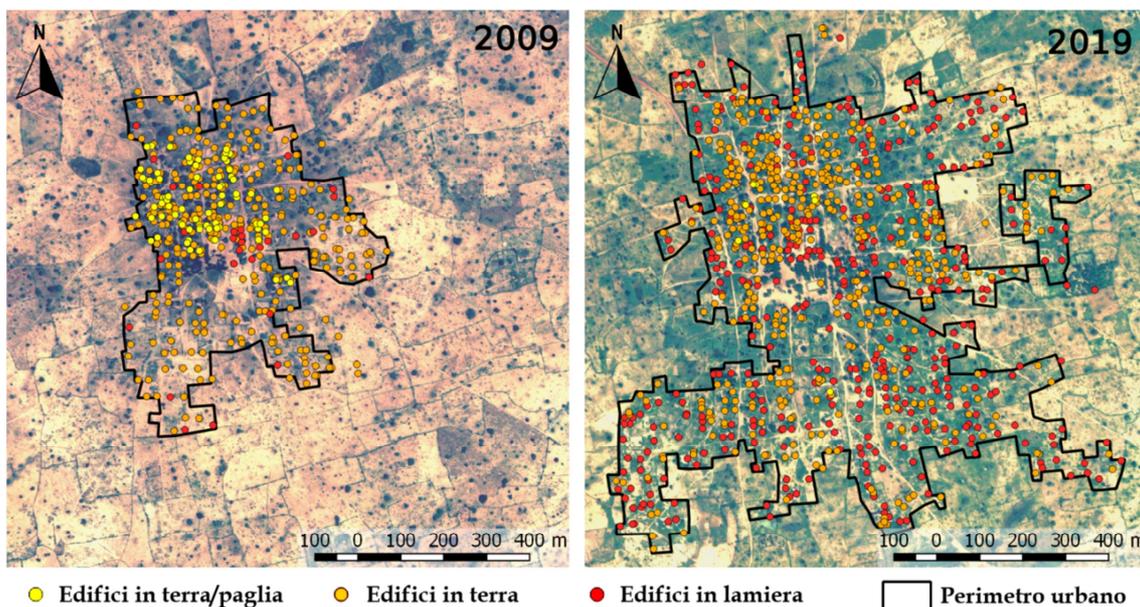


Figura 13 - Dinamica edilizia per tipologia di Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019

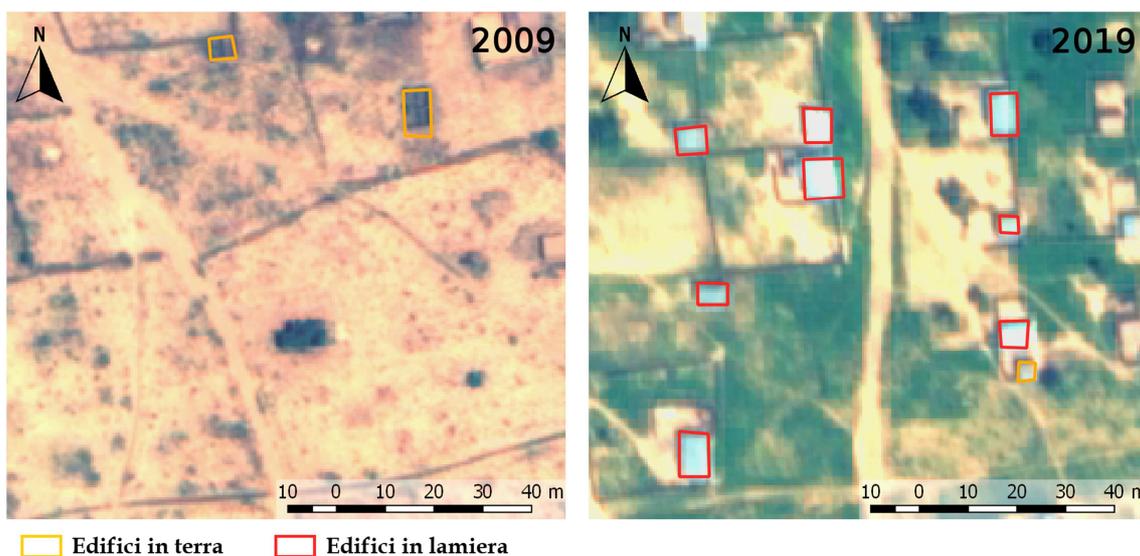


Figura 14 - Dettaglio dell'espansione edilizia di Angoulême Chekaraou nel periodo 2009-2019

L'espansione edilizia nel periodo recente ha interessato ampie aree risultate inondabili: la percentuale di edifici in area inondabile rispetto al totale è aumentata da 20% a 29%. Osservando gli estratti cartografici (Figura 23), la superficie edificata presenta un'espansione accentuata in direzione sud ed est, mentre rimane limitata verso nord e ovest, tuttavia, non si rilevano particolari pattern di espansione in relazione alle aree inondabili, facendo presupporre che tale espansione sia slegata da considerazioni sulle aree inondabili nelle scelte insediative locali. Questa considerazione acquisisce maggior interesse tenendo conto dell'associazione delle coperture in lamiera come indicatore di consolidamento edilizio.

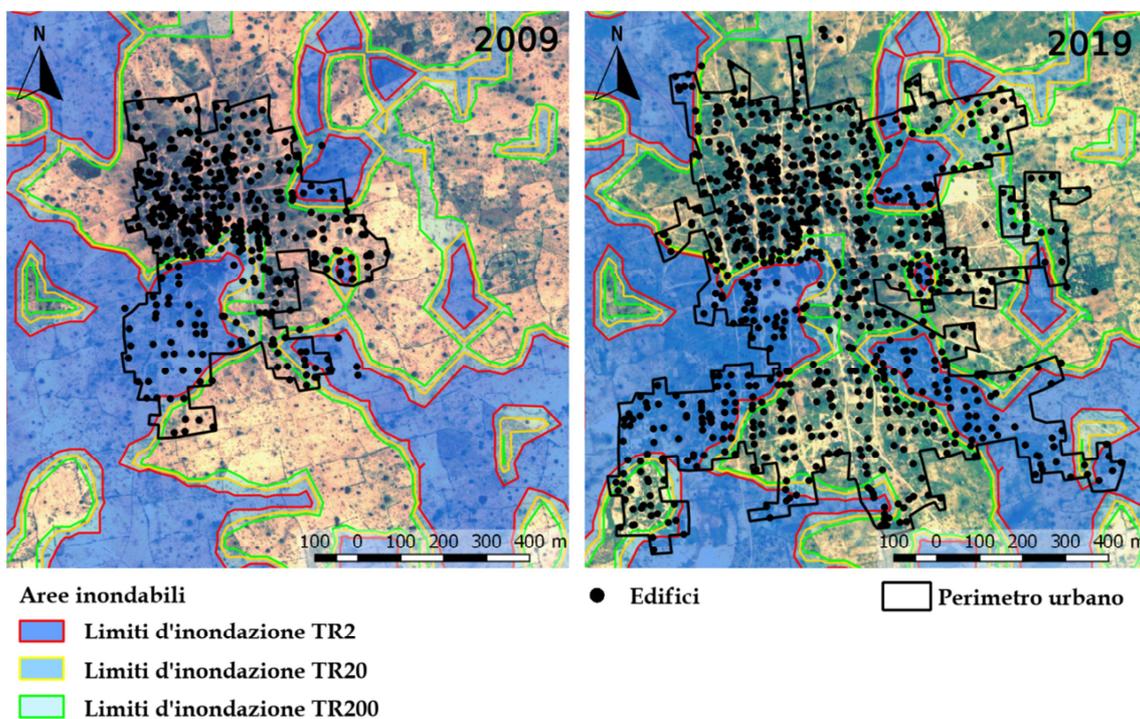


Figura 23 - Aree inondabili in Angoulême Chekaraou nel periodo 2009-2019

4.4.2. Toullou: espansione e consolidamento

Toullou è piccolo villaggio situato nel dallol Maouri, (632 abitanti al 2012). Situato a circa 20 chilometri a sud-ovest di Guéchémé, è collegata con le altre località attraverso piste che si sviluppano in modo radiale dall'insediamento. Toullou è passato da 5.5 a 7.7 ettari tra il 2009 e il 2019 (Tabella 5; Figura 24).

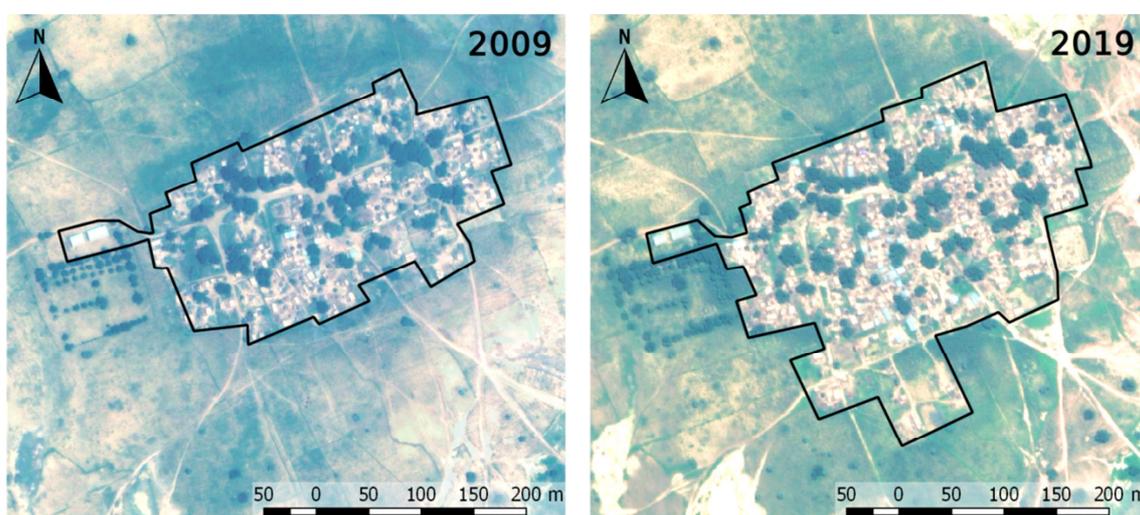
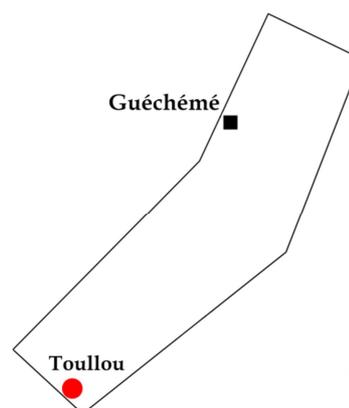


Figura 15 - Espansione di Toullou nel periodo 2009-2019

Espansione e consolidamento edilizio:

La dinamica che caratterizza Toullou presenta un mix tra espansione e consolidamento edilizio attraverso la sostituzione con edifici semi-permanenti (Figura 26).

Gli edifici sono passati da 285 a 310 in dieci anni, con un aumento di solo il 9%. Tale risultato è spiegato dai due fenomeni contrapposti: aumento degli edifici in terra e riduzione degli edifici in terra/paglia, mentre gli edifici in lamiera aumentano di una percentuale irrisoria rispetto al patrimonio edilizio totale. Come le altre località, anche Toullou registra una riduzione della densità edilizia (da 52 a 40 edifici per ettaro), ma sopra la media. Negli estratti cartografici (Figura 25), si nota la "conversione" dell'edificato in terra/paglia in edificato in terra, mentre gli edifici in lamiera aumentano rimanendo concentrati nella parte centrale dell'insediamento.

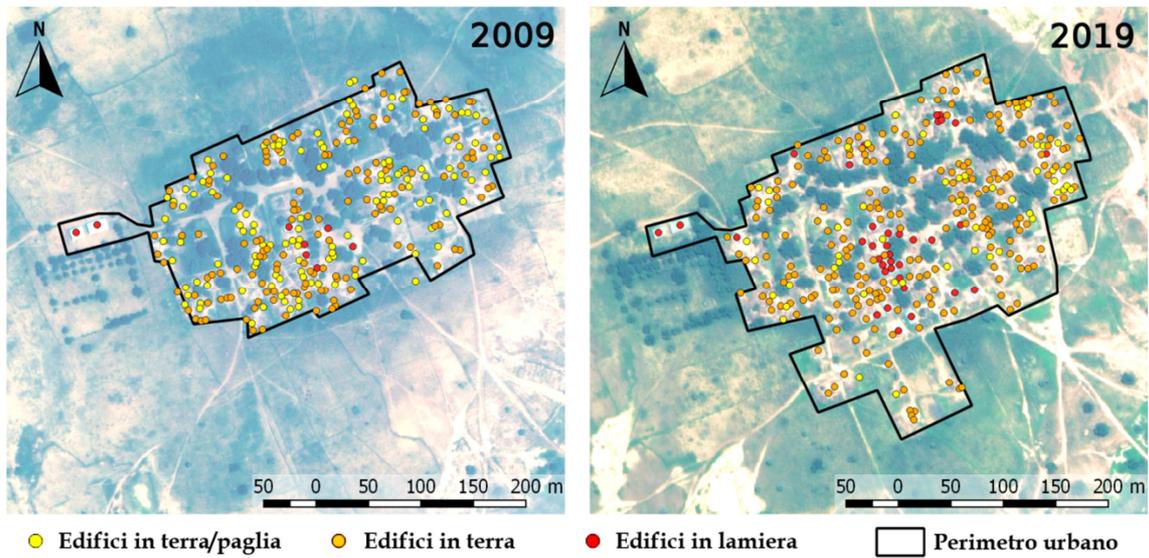


Figura 25 - Dinamica edilizia per tipologia di Toullou nel periodo 2009-2019

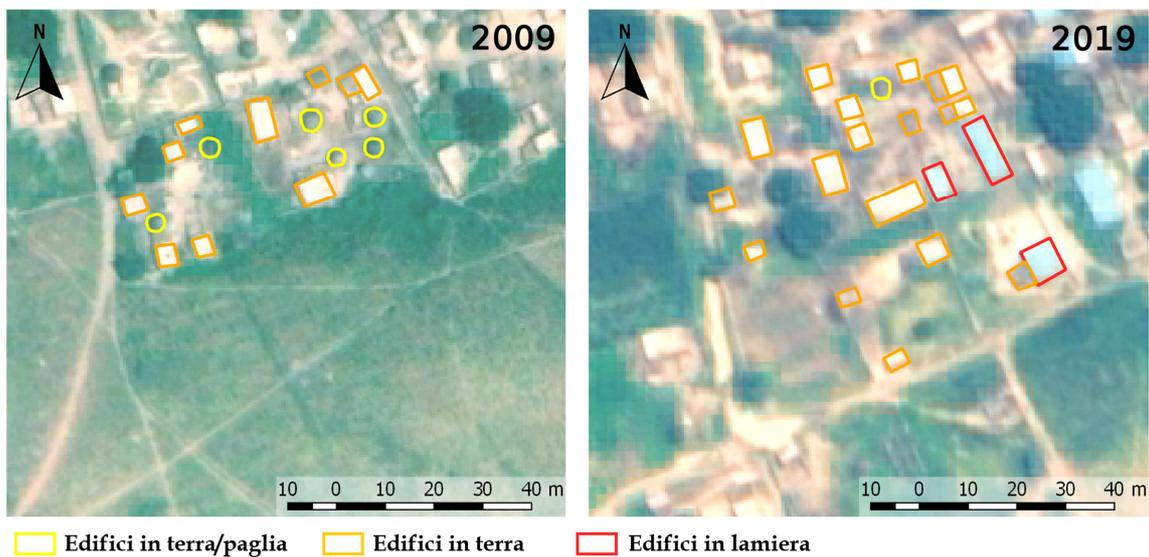


Figura 26 - Dettaglio dell'espansione e consolidamento edilizio di Toullou nel periodo 2009-2019

La località di Toullou presenta, già nel 2009, più del 50% della propria superficie in zone inondabili. Tale condizione peggiora nel 2019, osservando un'espansione edilizia che seppur modesta, si sviluppa interamente in aree soggette ad inondazione anche a breve termine (tempo di ritorno di due anni), in direzione sud-ovest (Figura 27). Nonostante questo, la percentuale di edifici in area inondabile rispetto al totale rimane invariata (58%). Anche in questo caso, l'espansione edilizia appare slegata da considerazioni sulle aree inondabili nelle scelte insediative locali.

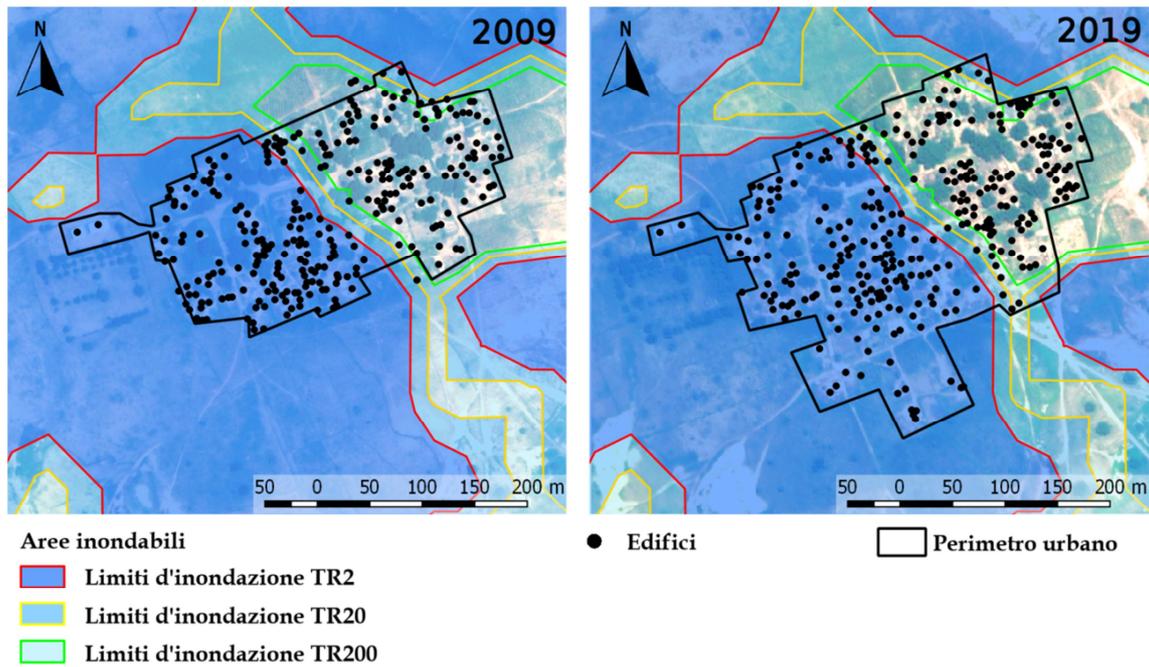
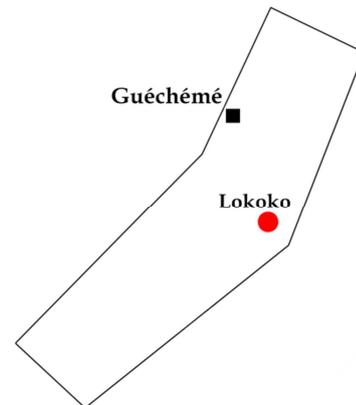


Figura 16 - Aree inondabili in Toullou nel periodo 2009-2019

4.4.3. Lokoko: consolidamento

Lokoko è una località importante nel dallol Maouri, localizzata in prossimità dell'area inondabile sulla sinistra idrografica del dallol. Con 3944 abitanti al 2012, è la seconda località più popolosa nel tratto del dallol analizzato. Situato a circa 7 chilometri a sud-est di Guéchémé, è collegata ad essa da un'unica strada sterrata, la quale prosegue verso il confine con la Nigeria, mentre è collegata con le altre località attraverso piste. Lokoko è passato da 38.85 a 47.51 ettari tra il 2009 e il 2019 (Tabella 5; Figura 28).



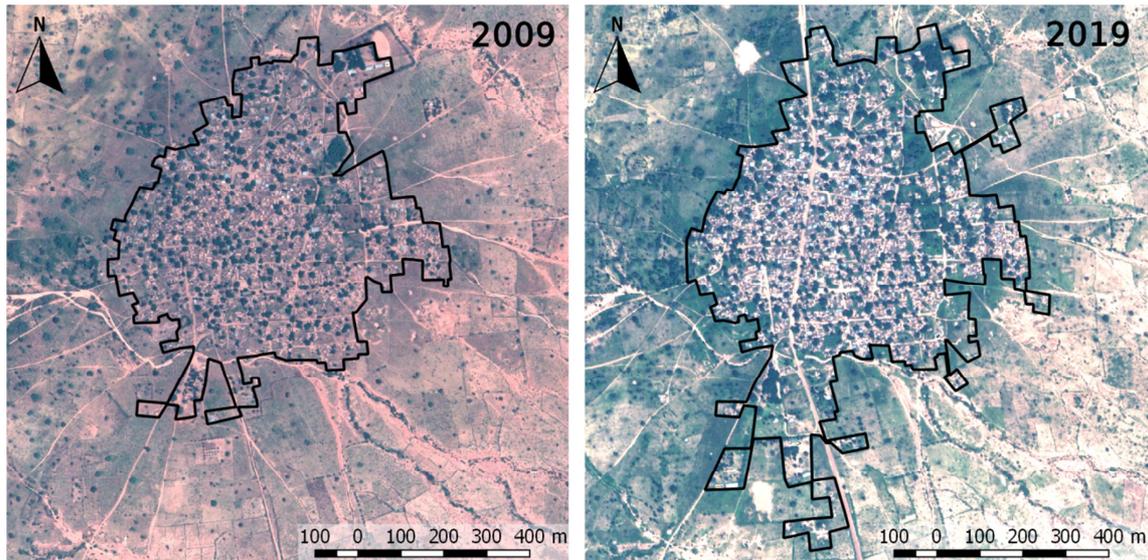


Figura 17 - Espansione di Lokoko nel periodo 2009-2019

Consolidamento edilizio:

La dinamica dominante di Lokoko è la sostituzione edilizia con edifici semi-permanenti (Figura 30).

Gli edifici sono passati da 1599 a 1510 edifici in dieci anni, con una riduzione del 6%. Analogamente ad altre località, questo fenomeno è principalmente dovuto alla drastica riduzione degli edifici in terra/paglia (-85%), i quali costituivano circa la metà del patrimonio edilizio al 2009 (771 su 1599). Anche in questo caso, vi è un aumento modesto dell'edificato in terra e un forte aumento dell'edificato in lamiera. In modo analogo, Lokoko registra una riduzione della densità edilizia (da 41 a 32 edifici per ettaro), in linea con altre località di medie/grandi dimensioni. Negli estratti cartografici (Figura 29), si nota la drastica riduzione dell'edificato in terra/paglia, sostituito dall'edificato in terra e/o in lamiera.

La dinamica insediativa di questa località presenta quindi caratteristiche molto simili alle località situate nel dallol, suggerendo come l'intero territorio presenti dinamiche insediative analoghe tra loro.

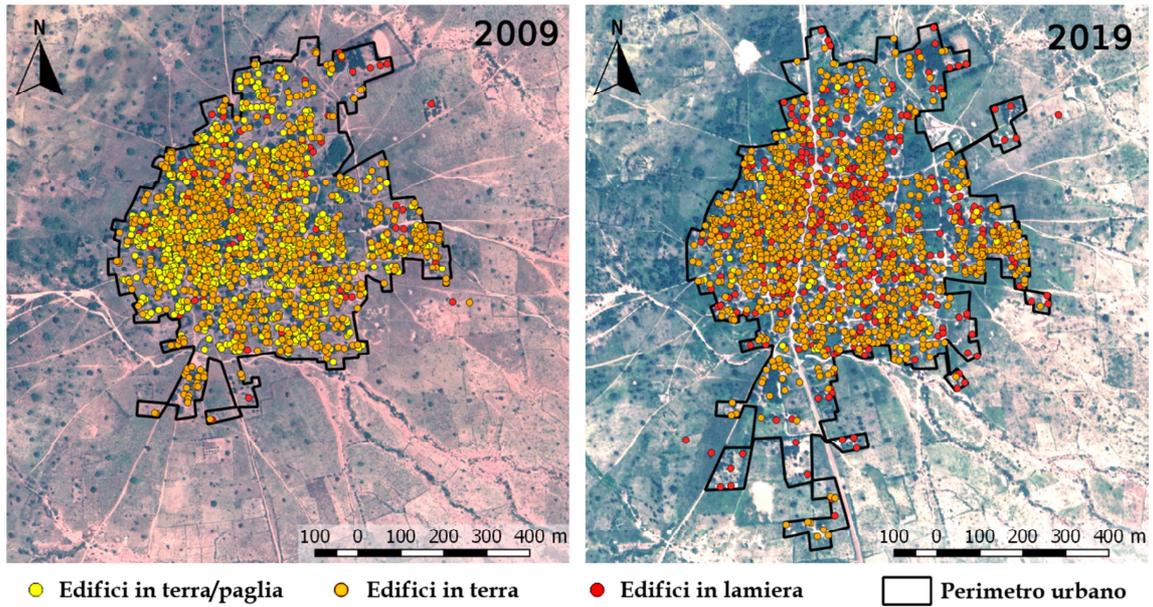


Figura 18 - Dinamica edilizia per tipologia di Lokoko nel periodo 2009-2019

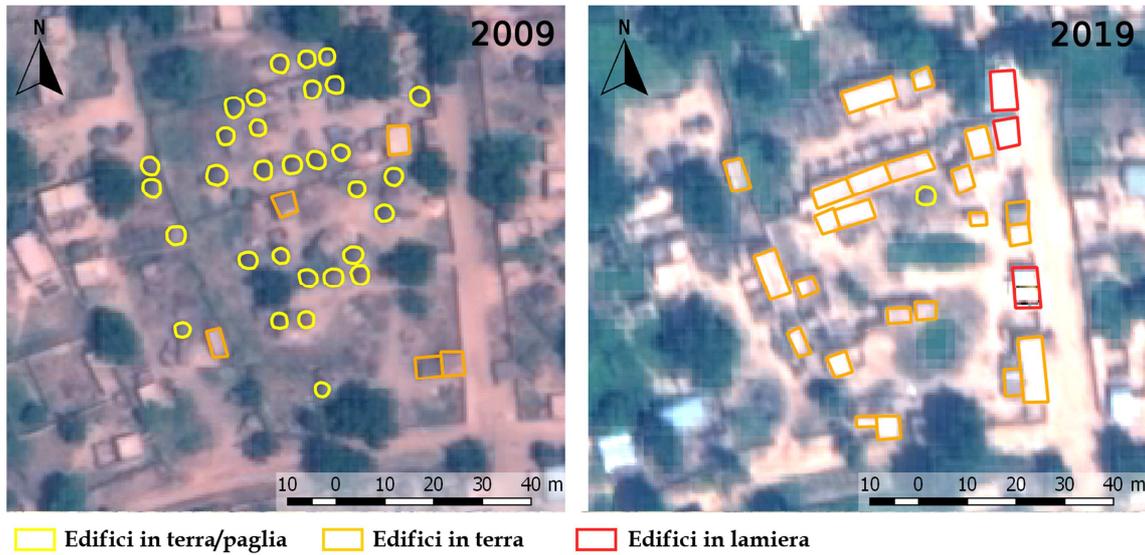


Figura 30 - Dettaglio del consolidamento edilizio di Lokoko nel periodo 2009-2019

5. Discussione

Contrariamente alla dinamica demografica rurale-urbana usualmente descritta dalle statistiche e da parte della letteratura sull'Africa tropicale, in diverse zone rurali la popolazione è in aumento. Ciò genera un'accresciuta pressione demografica. L'obiettivo di questa tesi era di verificare la dinamica degli insediamenti in una di queste zone: il dallol Maouri nel comune di Guéchémé, Niger.

Le analisi condotte hanno prodotto risultati significativi. L'analisi tra 2009 e 2019 delle precipitazioni e della dinamica insediativa nelle zone inondabili del dallol Maouri di Guéchémé ha fornito risultati che rispecchiano in buona parte l'obiettivo dello studio e costituiscono inoltre elementi utili per l'amministrazione comunale.

In primo luogo, abbiamo osservato un marcato incremento dei massimi di precipitazione, che ha prodotto un incremento delle inondazioni negli ultimi decenni. Ciò conferma una tendenza osservata anche in altri contesti (Eakin, 2010).

In secondo luogo, nel dallol Maouri a Guéchémé la superficie edificata aumenta del 50% in 10 anni (da 172 a 258 ettari). La crescita edilizia non è dunque prerogativa delle città capitali (Sliuzas, 2013; Mbow, 2008), nonostante il trend migratorio rurale-urbano (Mbow, 2008), ma è un fenomeno che avviene anche in zone rurali remote che presentano condizioni favorevoli, come un corso d'acqua (Tiepolo, 2009).

In terzo luogo, gli edifici in zone inondabili con tempo di ritorno 200 anni aumentano da 1113 a 1534 (+38%) in un solo decennio.

Quarto, l'edificazione in materiali precari si consolida in tutte le località analizzate: calano gli edifici con copertura in terra/paglia del 73% rispetto al 2009 (da 1636 a 443), aumentano del 500% quelli con copertura in lamiera (da 183 a 1162).

Quinto, consolidamento ed espansione nelle aree inondabili è più rapido che altrove: gli edifici in lamiera aumentano del 27% in zona inondabile e solo del 13% nel resto dell'abitato. Questo fenomeno potrebbe indicare una scarsa percezione locale del rischio. Sulla base delle conoscenze disponibili, non è possibile tuttavia stabilire se questa tendenza sia correlata a questioni socio-economiche (Eakin, 2010; Birhanu, 2016).

Le dinamiche riscontrate fanno quindi presupporre che il rischio inondazione non abbia attivato un meccanismo di apprendimento da parte della popolazione sul rapporto tra insediamenti e fenomeni alluvionali, sulla base degli eventi passati, recenti e non, che influenzi le scelte insediative (Früh-Müller, 2014). E' inoltre da ipotizzare che la popolazione tenda ad occupare le zone inondabili perché sono le sole in cui è possibile accedere ad un pezzo di terra su cui costruire la propria abitazione.

Il consolidamento delle abitazioni in zona inondabile, rappresenta un problema per la sicurezza delle abitazioni e per la popolazione che vi abita. In caso di inondazione, i beni perduti saranno maggiori. Tale problema dovrebbe essere affrontato dalle amministrazioni locali, le quali dovrebbero sviluppare dei piani di prevenzione del rischio (Eakin, 2010; Tiepolo, 2019). Questi piani potrebbero includere la prevenzione (informazione sulle zone a rischio), la delocalizzazione degli abitanti esposti in zone con rischio minore.

La vulnerabilità alle alluvioni delle località analizzate può aver avuto come testimonianza la scomparsa di una piccola località (Illela Tounga Alou) adiacente a Angoual Chekaraou, tra il 2009 e il 2019, dovuta presumibilmente ad un evento alluvionale che ha comportato il crollo degli edifici e l'abbandono. Questa supposizione è rafforzata dal fatto che tale località si trovasse interamente in zona inondabile. Questo evento può aver portato all'insediamento di una nuova località, di dimensioni simili a quello scomparso, ma situata analogamente in zona inondabile.

Comprendere queste dinamiche è essenziale per l'amministrazione locale. Adottare e realizzare politiche di riduzione del rischio d'inondazione diventa urgente in un contesto in cui gli eventi estremi aumentano di frequenza e aumenta la popolazione ad essi esposta (Tiepolo, 2019), sia per l'aumento naturale demografico, che per la scelta insediativa. L'urgenza di agire è dettata anche dal fatto che l'espansione e il consolidamento degli abitati in zona inondabile è significativo ed è avvenuto nel corso di un decennio appena.

Fra i risultati inattesi della tesi figura l'impossibilità di applicare una estrazione semi-automatica degli edifici dalle immagini satellitari in contesti connotati da edifici con tetti in terra e viabilità non asfaltata, rendendone difficile la loro distinzione. Per contro, quando le coperture sono in lamiera, la risposta radiometrica è univoca e l'estrazione semi-automatica funziona bene. Ciò ha richiesto di impiegare la digitalizzazione manuale. Ne consegue che gli edifici non si riescono ad isolare dal contesto.

Tale strumento rimane comunque un'opzione da considerare nel caso di analisi della dinamica insediativa, dove gli edifici sono di grandi dimensioni ed impiegano coperture in lamiera o hanno una viabilità asfaltata: da una parte ricorrendo a tecniche già esistenti di *deep learning* (Ghassemi, 2018), dall'altra contando su una miglior risoluzione spettrale dei recenti sensori satellitari.

Il principale limite nell'analisi condotta sta nella scarsa disponibilità di informazioni sulla natura del suolo, che determina il coefficiente di ruscellamento, e la bassa risoluzione del DTM (90m) ha comportato significative approssimazioni nella modellazione delle aree inondabili.

Questa tesi ha indagato fenomeni poco esplorati ed ha prodotto elementi per avviare politiche di prevenzione che salvaguarderebbero le popolazioni e le economie rurali, disincentivando il fenomeno migratorio verso le città maggiori in cui, come testimoniato dall'ampia letteratura, i problemi e le sfide si concentrano. Approfondire questo approccio metodologico in altri contesti consentirebbe di costruire un quadro più esaustivo delle dinamiche rurali nell'Africa Tropicale, rimediando alla scarsa attenzione finora data alle zone rurali. Una migliore conoscenza di questi fenomeni renderebbe possibile attivare piani di prevenzione più efficaci.

6. Conclusioni

La dinamica insediativa nelle zone rurali in Africa Tropicale è poco nota. L'attenzione è invece rivolta alle zone urbane. Tuttavia, molti danni e perdite umane conseguenti le inondazioni si verificano proprio in zona rurale. Abbiamo di conseguenza voluto indagare la dinamica insediativa in una zona rurale di 210 km² in Niger, nota per il suo potenziale agricolo e per la crescita demografica in atto. Colmare la scarsa attenzione e conoscenza delle zone rurali consentirebbe di includere un'ampia porzione di popolazione nelle politiche di gestione del rischio inondazione.

Ciò rappresenta l'obiettivo ultimo di questo studio, come risultato della conoscenza della dinamica insediativa in relazione alle aree inondabili, ottenuta attraverso il tentativo di automatizzare il processo di estrazione di informazioni da immagini satellitari.

Si è osservata una significativa rapida espansione degli insediamenti, un forte processo di consolidamento dell'edificato attraverso il proliferare delle coperture in lamiera ondulata, indicatore proxy di accresciute disponibilità economiche. A ciò si intreccia il rischio inondazione che ne risulta significativamente amplificato, sia per il maggior numero di edifici esposti, sia per il loro accresciuto valore, sia per le aumentate frequenze degli eventi estremi.

Si evince quindi come sia mancato il processo di apprendimento locale sulle aree inondabili. Proprio per questo motivo i risultati di questo studio sono d'interesse per l'amministrazione locale al fine di definire un piano di adattamento.

L'analisi della dinamica insediativa in relazione alle aree inondabili in un contesto rurale dell'Africa Tropicale ha dimostrato che processi di forte espansione dell'ambiente costruito non sono prerogativa delle città capitali e che tali processi - espansione e consolidamento edilizio - quando non pianificati, contribuiscono significativamente all'aumento della vulnerabilità della popolazione. La conoscenza di questi processi fornisce alle amministrazioni locali elementi utili per l'attuazione di politiche di gestione locale del rischio.

Si è visto come i metodi di estrazione semi-automatica dell'edificato da immagini satellitari ad alta risoluzione al suolo non abbiano prodotto risultati soddisfacenti. L'automatizzazione del processo di estrazione degli edifici in questi contesti territoriali necessita dunque di tecniche più avanzate e dati più articolati per raggiungere risultati soddisfacenti. Al contrario, è stato possibile elaborare un modello idraulico che ha consentito l'analisi della dinamica insediativa in zona inondabile.

Questo tipo di analisi può essere replicato in altri contesti rurali ad alta densità abitativa. Ciò può permettere alle amministrazioni locali di individuare le azioni di adattamento al cambiamento climatico e di localizzarle.

7. Bibliografia e sitografia

Amogu, O., Descroix, L., Yéro, K.S., Le Breton, E., Mamadou, I., Ali, A., Vischel, T. et al, (2010). Increasing River Flows in the Sahel?, *Water* 2010, 2, 176.

Anonimo, (2011). *Distribuzioni di probabilità per l'idrologia*, inedito.

Battiato, S. (2011). *Segmentazione di immagini*, Image Processing Laboratory, Università degli Studi di Catania, 50pp, inedito.

Birhanu, D., Kim, H., Jang, C., Park, S., (2016). Flood Risk and Vulnerability of Addis Ababa City Due to Climate Change and Urbanization, *Procedia Engineering*. 154. 696-702.

Boccardo, P., (2019). *Dispense di telerilevamento*, inedito.

CILSS (2016). Landscapes of West Africa – A Window on a Changing World. U.S. Geological Survey EROS.

Climate-data.org, Dosso climate, Consultato: 08 Dicembre 2019, <https://en.climate-data.org/africa/niger/dosso/dosso-26232/#temperature-graph>.

Deng, L., & Yu, D., (2013). Deep Learning: Methods and Applications. *Foundations and Trends R in Signal Processing*, vol. 7, nos. 3–4, 197–387.

Descroix, L., Guichard, F., Grippa, M., Lambert, L.A., Panthou, G., Mahé, G., Gal, L. et al, (2018). Evolution of Surface Hydrology in the Sahelo-Sudanian Strip: An Updated Review, *Water* 2018, 10, 748, 20.

Direction de la Météorologie Nationale du Niger (DMN), (2019). Guéchémé pluviométrie 1981-2018.

Eakin, H., Lerner, A. M., Murtinho, F., (2010). Adaptive capacity in evolving peri-urban spaces: Responses to flood risk in the Upper Lerma River Valley, Mexico. *Global Environmental Change*, 20(1), 14.

ESRI, Pansharpening function, ArcGIS Pro, consultato: 10 Febbraio 2020, <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/pansharpening-function.htm>.

ESRI, (2019). ArcGIS Pro version 2.3.

ESRI, (2000). Dictionary of GIS terminology, ESRI press, Redlands, 119pp.

Exelis Visual Information Solutions, (2013). Environment for Visualizing Images (ENVI) version 5.1.

Früh-Müller, A., Wegmann, M., Koellner, T., (2014). Erratum to: Flood exposure and settlement expansion since pre-industrial times in 1850 until 2011 in north Bavaria, Germany, *Regional Environmental Change*, 15, 183-193.

GeoAdvice, Hydraulic modeling, consultato: 11 Febbraio 2020, http://www.geoadvice.com/hydraulic_modeling.php.

GeoEye, GeoEye-1 scene 010474140010, Corrected, Bundle, Longmont, CO: GeoEye, 6-14 Ottobre 2009.

GeoEye, GeoEye-1 scene 2010091710314181603031607224, Standard Geometrically Corrected, Bundle, Thornton, CO: GeoEye, 10 Settembre 2009.

Geoimage, Satellite Imagery Glossary, 4pp, consultato: 11 Febbraio 2020, https://www.geoimage.com.au/PDFs/Geoimage_Glossary.pdf.

Ghassemi, S., Sandu, C., Fiandrotti, A., Giulio Tonolo F., Boccardo, P., Francini, G., Magli, E., (2018). Satellite Image Segmentation with Deep Residual Architectures for Time-Critical Applications, *Proc. of 2018 26th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2235-2239.

Giandotti, M., *Previsione delle piene e delle magre dei corsi d'acqua*, Memorie e studi idrografici, vol 8, Istituto Poligrafico dello Stato, Roma, 1934.

Goel, M.K., (2011), Runoff Coefficient, *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*, 952.

Güneralp, B., Güneralp, I., Liu, Y., (2015). Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards, *Global Environmental Change*, 31, 217-225.

Harris Geospatial Solutions, Map Information in Envi. Consultato: 26 Novembre 2019, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/overviewmapinformationinenvi.html#Rational>.

Harris Geospatial Solutions, Spectral indices, Consultato: 26 Novembre 2019, <https://www.harrisgeospatial.com/docs/SpectralIndices.html>.

Huong, H. T. L. & Pathirana, A., (2011). Urbanization and climate change impacts on future urban flooding in Can Tho City, Vietnam, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8, 10781-10824.

HydroCAD Stormwater Modeling, Rational Method, Consultato: 26 Novembre 2019, <https://www.hydrocad.net/rational.htm>.

Idrissa, R., (2020). *Historical dictionary of Niger: Fifth edition*, Rowman & Littlefield, Lanham, 585pp.

Institut National de la Statistique - Ministère des Finances, (2014), Niger : répertoire national des localités (RENALOC), Niamey, 730 pp.

IPCC, (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, In Press.

IPCC, (2018). Annex I: Glossary [Matthews, J.B.R. (ed.)], *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, In Press.

Kohavi, R. & Provost, F., (1998). Glossary of terms. Machine Learning—Special Issue on Applications of Machine Learning and the Knowledge Discovery Process, *Machine Learning*, 30, 271-274.

Kuester, M.A., (2017). Absolute Radiometric Calibration: 2016v0, Digital Globe, 2-3.

LDEO, (1998). Remote sensing glossary, consultato: 10 Febbraio 2020, <https://www.ldeo.columbia.edu/res/fac/rsvlab/glossary.html>.

Lehner, B., Verdin, K., Jarvis, A., (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union Journals*, 89(10), 93-94.

Mamadou, I., Descroix, L., Gautier, E., Brunstein, D., Le-Breton, E., Moussa, I., Maiga, O., et al, (2009). Recent dynamic change of the tributaries of the Niger river in Sahel, *Catena*, 131, 130-139.

Massazza, G., Tamagnone, P., Wilcox, C., Belcore, E., Pezzoli, A., Vischel, T., Panthou, G., et al, (2019). Flood Hazard Scenarios of the Sirba River (Niger): Evaluation of the Hazard Thresholds and Flooding Areas. *Water* 2019, 11, 1018-1039.

Maurer, T., (2013). How to pan-sharpen images using the gram-schmidt pan-sharpen method - A recipe, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Services*, Vol xl-1/w1, 1.

Mbow, C., Diop, A., Diaw, A., Niang, C., (2008). Urban sprawl development and flooding at Yeumbeul suburb (Dakar-Senegal), *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2, 75-88.

Merriam-Webster, Alluvial terrace, Consultato: 08 Dicembre 2019, <https://www.merriam-webster.com/dictionary/alluvial%20terrace>.

Microsoft Corporation, Bing Maps.

NASA, DRL, ASI, (2000). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>.

NRCan, (2015). Pre-processing, Consultato: 14 Febbraio 2020, <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/image-interpretation-analysis/pre-processing/9403>.

NTUA, Introduction to Photointerpretation and Remote Sensing, Laboratory of Remote Sensing, consultato: 11 Febbraio 2020, http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/rsens/DeCETI/NTUA/Main_topics_00.htm.

Ok, A. O., (2016). Automated detection of buildings and roads in urban areas from VHR satellite images, *Journal of Geodesy and Geoinformation*. 108-3, 29-38.

Praskievicz, S., & Chang, H., (2009). A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts, *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 33(5), 650-671.

QGIS Development Team, (2016). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

Rodarmel, G., & Shan, J., (2002). Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Classification, *Surveying and Land Information Systems*, Vol 62-2, 115-123.

SDSTATE, Radiometric calibration, Jerome J. Lohr College of Engineering, consultato: 10 Febbraio 2020, <https://www.sdstate.edu/jerome-j-lohr-engineering/radiometric-calibration>.

Sliuzas, R., Flacke, J., & Jetten, V., (2013). Modelling urbanization and flooding in Kampala, Uganda, *In Proceedings of the 14th N-AERUS / GISDECO Conference*, 1-16.

SMHI Hypeweb (2012). 1-10 Day Forecast Niger River, da: <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/forecasts/short-medium-range-forecast-niger-river/>.

Taubenböck, H., Wurm, M., Netzband, M., Zwenzner, H., Roth, A., Rahman, A., Dech, S., (2011). Flood risks in urbanized areas – Multi-sensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 431-444.

Tiepolo, M., & Braccio, S., (2020). Mainstreaming disaster risk reduction into local development plans for rural tropical Africa: A systematic assessment, *Sustainability* (in press).

Tiepolo, M., Rosso, M., Massazza, G., Belcore, E., Issa, S., Braccio, S., (2019). Flood Assessment for Risk-Informed Planning along the Sirba River, Niger, *Sustainability*, 11, 1-18.

Tiepolo, M., (2014). Flood Risk Reduction and Climate Change in Large Cities South of the Sahara, *Springer Climate*, 19-36.

Tiepolo, M., Braccio, S., Tarchiani, V., (2009). *Lo sviluppo delle aree rurali remote: petrolio, uranio e governance locale in Niger*, Studi urbani e regionali, FrancoAngeli, 222 pp.

UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA) country office in Niger, (2006). Niger administrative level 0, 1, 2, and 3 boundary polygons (2019 Update).

US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, (2016). Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS). <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>.

US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center, (2015). Key USACE Flood Risk Management Terms, TD-40, 30pp.

USDA Natural Resources Conservation Service, (2010). Chapter 15 - Time of Concentration, *National Engineering Handbook Part 630 Hydrology*, 15-3.

USGS, Alluvial terrace, consultato: 11 Febbraio 2020, <https://mrdata.usgs.gov/geology/state/sgmc-lith.php?code=1.1.5>.

USGS Astrogeology Science Center, Glossary of terms, consultato: 10 Febbraio 2020, <https://www.usgs.gov/centers/astrogeology-science-center/glossary-terms>.

USGS Landsat missions, Landsat glossary, consultato: 10 Febbraio 2020, <https://www.usgs.gov/centers/astrogeology-science-center/glossary-terms>.

USGS, WWF, (2008). Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivates at multiple Scales. Estratto da: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov>.

WMO, UNESCO, (2012). International glossary of hydrology, WMO-No. 385, Geneva, 461pp.

WorldView, WorldView-2 scene 053799140010, Corrected, Bundle, Longmont, CO: Digital Globe, 28 Agosto 2014.

WorldView, WorldView-2 scene 1030010097333C00, Corrected, Bundle, Munich, Germany: EUSI GmbH, 1-6 Settembre 2019.

Yan, G., F. Mas, J., H. P. Maathuis, B., Xiangmin, Z., M. Van Dijk, P., (2006). Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches - a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China, *International Journal of Remote Sensing*, Vol 27-18, 4039-4055.

Lista figure

Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio con principali località nel dallol Maouri a Guéchémé.....	15
Figura 2 - Densità di popolazione per comune in Niger (Censimento 2012).....	17
Figura 3 - Diagramma di flusso della metodologia utilizzata.....	19
Figura 4 - Inquadramento del bacino del dallol ed il suo reticolo idrografico.....	21
Figura 5 - Precipitazioni medie mensili 1981-2018.....	23
Figura 6 - Precipitazioni annue 1981-2018.....	23
Figura 7 - Massimi di precipitazione annuali su un periodo di 9 giorni consecutivi (stazioni di Guéchémé e Guéchémé Centre de Santé).....	24
Figura 8 - Sezioni trasversali del letto fluviale del dallol per il modello idraulico numerico.....	26
Figura 9 - Profilo della profondità delle portate di piena per ogni tempo di ritorno lungo il letto fluviale del dallol.....	27
Figura 10 - Aree inondabili nel dallol di Guéchémé secondo tre scenari di probabilità.....	28
Figura 11 - Sinistra, Classificazione SAM degli edifici (in rosso) a Sékome; Destra, Classificazione SAM degli edifici (in rosso) a Gothèye.....	34
Figura 12 - Immagine satellitare (GeoEye-1) del dallol al 2009.....	36
Figura 13 - Immagine satellitare (WorldView-2) del dallol al 2019.....	37
Figura 14 - Confronto di performance delle classificazioni su Guéchémé al 2009.....	40
Figura 15 - Insedimenti nel dallol Maouri di Guéchémé per dimensione demografica ed esposizione ad inondazione (blu).....	42
Figura 16 - Localizzazione dei 13 insediamenti analizzati del dallol Maouri a Guéchémé (12 insediamenti in area inondabile, uno fuori l'area inondabile).....	43
Figura 17 - Angoual Chekaraou (sinistra) e Toullou (destra) nel 2019.....	45
Figura 18 - Classi radiometriche utilizzate con l'algoritmo SAM (Angoual Chekaraou, 2019).....	46
Figura 19 - Estratti di classificazione al 2019: NDBI su Angoual Chekaraou (sinistra); SAM su Toullou (destra).....	47
Figura 20 - Espansione di Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019.....	53
Figura 21 - Dinamica edilizia per tipologia di Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019.....	53
Figura 22 - Dettaglio dell'espansione edilizia di Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019.....	54
Figura 23 - Aree inondabili in Angoual Chekaraou nel periodo 2009-2019.....	54
Figura 24 - Espansione di Toullou nel periodo 2009-2019.....	55
Figura 25 - Dinamica edilizia per tipologia di Toullou nel periodo 2009-2019.....	56
Figura 26 - Dettaglio dell'espansione e consolidamento edilizio di Toullou nel periodo 2009-2019.....	56
Figura 27 - Aree inondabili in Toullou nel periodo 2009-2019.....	57
Figura 28 - Espansione di Lokoko nel periodo 2009-2019.....	58
Figura 29 - Dinamica edilizia per tipologia di Lokoko nel periodo 2009-2019.....	59
Figura 30 - Dettaglio del consolidamento edilizio di Lokoko nel periodo 2009-2019.....	59

Lista tabelle

Tabella 1 - Densità di popolazione del dallol di Guéchémé in confronto con altri contesti rurali in Niger (Censimento 2012).....	17
Tabella 2 - Calcolo del tempo di corrivazione.....	22
Tabella 3 - Analisi dei tempi di ritorno delle precipitazioni.....	24
Tabella 4 - Calcolo delle portate di piena.....	25
Tabella 5 - Espansione edilizia degli insediamenti nel periodo 2009-2019.....	44
Tabella 6 - Metrica di accuratezza degli algoritmi SAM e NDBI per le località Angoual Chekaraou e Toullou.....	47
Tabella 7 - Metrica di accuratezza degli algoritmi SAM e NDBI in relazione ai falsi positivi.....	47
Tabella 8- Tipologia di copertura degli insediamenti nel periodo 2009-2019.....	49
Tabella 9 - Densità edilizia per località tra 2009 e 2019.....	50
Tabella 10 - Valutazione degli edifici in aree inondabili del dallol di Guéchémé nel periodo 2009-2019.....	51
Tabella 11 - Edifici con copertura in lamiera in aree inondabili del dallol di Guéchémé nel periodo 2009-2019.....	52