

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Analisi e Gestione dell'Ambiente

Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali

sede di Ravenna

**Caratterizzazione idrogeologica della valle del
Bao Bolong nella regione di Kaffrine (Senegal)**

Tesi di laurea in Idrologia ambientale

Relatore:

Dott.ssa Beatrice Maria Sole Giambastiani

Presentata da:

Francesco Bacchereti

Correlatori:

Prof. Luigi Cantelli

Prof. Marco Antonellini

Controrelatore:

Dott. Nicolas Greggio

Sessione Anno Accademico 2021-2022

Indice

ABSTRACT.....	4
1. IL PROGETTO GLOBAL SOUTH	5
2. INTRODUZIONE.....	7
2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	8
2.1.1. AREA DI STUDIO	8
2.1.3. TOPOGRAFIA	10
2.1.4. IDROGEOLOGIA	11
3. METODOLOGIA	14
3.1. CREAZIONE DEL DATABASE GIS.....	14
3.2. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA UAV	15
3.3. MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE	21
3.3.1. TRANSETTI.....	25
3.4. BILANCIO IDROLOGICO	28
4. RISULTATI E DISCUSSIONE.....	31
4.1. DATABASE GIS	31
4.2. RILIEVI TOPOGRAFICI.....	41
4.3. MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE	45
4.3.1. TRANSETTI.....	54
4.4. BILANCIO IDROLOGICO	58
5. CONCLUSIONI.....	61
6. ALLEGATO A	64
7. BIBLIOGRAFIA	71
8. SITOGRAFIA.....	73

ABSTRACT

Questo lavoro di tesi caratterizza sotto i punti di vista idrologico ed idrogeologico il bacino idrografico del fiume Bao Bolong, un affluente del fiume Gambia situato nella regione senegalese di Kaffrine. La tesi si concentra sullo studio dell'evoluzione della falda freatica e del fiume tra la fine della stagione arida e la fine di quella delle piogge, valutando le differenze dei livelli piezometrici, gli scambi che avvengono tra il fiume e l'acquifero, le variazioni dei parametri chimico-fisici delle acque, con particolare attenzione alla salinità. Per lo studio del bacino, sono state organizzate due campagne di monitoraggio nel 2022, una a giugno, alla fine della stagione arida, e una ad ottobre, alla fine della stagione delle piogge, lungo tutta la parte centrale della valle. La metodologia utilizzata comprende il monitoraggio dei parametri chimico-fisici delle acque sotterranee e superficiali, la profondità della falda, i rilievi topografici di dettaglio mediante aerofotogrammetria UAV e tecnologia SFM (Structure from Motion), la creazione di modelli idrogeologici lungo transetti della falda freatica e del fiume e il calcolo del bilancio idrologico. I risultati mostrano una forte salinità delle acque superficiali, soprattutto a giugno, quando l'acqua di mare che risale lungo il fiume evapora concentrando i sali e raggiungendo valori di ipersalinità. Le acque sotterranee risultano complessivamente dolci, ma anche queste vanno incontro a variazioni stagionali di salinità e di profondità della tavola d'acqua. Questa tesi ha anche contribuito alla creazione di un database GIS che costituirà un elemento di supporto per le autorità locali, responsabili del monitoraggio e della gestione delle acque, per continuare la ricerca sul territorio e individuare politiche e interventi a sostegno delle comunità della valle.

1. IL PROGETTO GLOBAL SOUTH

La presente tesi riporta le attività di uno studio che si inserisce nel progetto intitolato ‘Studio della gestione sostenibile dell’acqua a supporto delle attività agrosilvopastorali nella valle del Bao Bolong, nella Regione di Kaffrine (Senegal)’, finanziato all’interno dei progetti di cooperazione internazionale allo sviluppo ‘Global South’ dell’Università di Bologna. Il progetto si sviluppa nel dipartimento senegalese di Kaffrine in un contesto in cui sono già in essere iniziative di sviluppo socioeconomico a supporto della popolazione locale. Il progetto prevede di approfondire e migliorare la conoscenza del territorio attraverso uno studio dettagliato del contesto locale nel quale saranno studiate l’idrogeologia, la geomorfologia, la geologia e l’idrologia. A seguito dello studio di caratterizzazione l’obiettivo è quello di individuare soluzioni per la raccolta e l’immagazzinamento dell’acqua durante la stagione delle piogge e di suggerire buone pratiche per la gestione sostenibile delle risorse idriche nel tentativo di mantenere nel tempo la quantità e la qualità della risorsa acqua nelle zone rurali del dipartimento di Kaffrine, in particolare nei numerosi villaggi dislocati lungo le sponde del corso del fiume Bao Bolong. Il progetto persegue 5 dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile proposti dalle Nazioni Unite (*Sustainable Development Goals*, Agenda 2030 del 2015): 1-Sconfiggere la povertà; 2-Sconfiggere la fame; 6-Acqua pulita; 13-Lotta contro il cambiamento climatico; 15- La vita sulla terra.

Il partenariato è composto dal Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali (BiGeA) dell’Università di Bologna che fornisce le competenze dei docenti/ricercatori coinvolti in materia di idrogeologia, monitoraggio ambientale, gestione integrata delle risorse idriche e geomorfologia, nonché la partecipazione di due tesisti; CIM ONLUS (Centro Studi Cooperazione Internazionale e Migrazione) e COMI ONG (Cooperazione per il mondo in via di sviluppo) che hanno operatività locale in Senegal e collaborano con diversi attori locali quali le associazioni di contadini della zona (AVRB-Association des Villages Riverains du Bao Bolong) e hanno il ruolo di coordinamento in loco (burocrazia, logistica, etc.) e di organizzazione e facilitazione delle attività di formazione e dei tavoli di concertazione; la Inspection des Eaux et Forêts IREF che è l’istituzione pubblica regionale senegalese, sotto l’autorità del Ministero competente - la Direzione delle Acque e delle Foreste, Caccia e Conservazione - e si occupa della gestione, conservazione e tutela delle foreste.

I beneficiari del progetto sono: le istituzioni che potranno accedere alle conoscenze acquisite durante il progetto per iniziative di miglioramento ambientale; AVRB e popolazioni locali che beneficeranno di training formativi e dei risultati del progetto.

Per realizzare gli obiettivi del progetto di caratterizzazione dell’area di studio sotto i punti di vista idrologico, idrogeologico, geologico e morfologico sono state organizzate 3 missioni di raccolta dati:

una missione preliminare nel giugno 2022 (alla fine della stagione arida), una prima missione in ottobre 2022 (alla fine della stagione delle piogge) ed una seconda missione a fine febbraio 2023. In queste missioni sono stati raccolti dati in campo (monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee, rilievi topografici) e presso le autorità locali che si occupano della gestione dell'acqua nel territorio; sono stati organizzati tavoli di concertazione, in cui ha avuto sede la divulgazione delle attività di campo e delle criticità e dei risultati emersi durante lo studio, con lo scopo di sensibilizzare la popolazione sulle problematiche del territorio soprattutto in riferimento all'acqua e alla sua gestione, e suggerire buone pratiche in merito all'uso dell'acqua (Figura 1).

Il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno della missione preliminare di giugno 2022 e della prima missione di ottobre 2022, alla quale ho partecipato, con l'obiettivo di supportare la caratterizzazione idrogeologica dell'area di progetto attraverso: la costruzione di un database di informazioni spaziali all'interno del quale sono stati integrati dati già esistenti e dati raccolti durante le attività di monitoraggio; monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee lungo tutta la valle del Bao Bolong; ricostruzione fotogrammetrica UAV di alcune sezioni del fiume; ed elaborazione dei dati.



Figura 1. Presentazione delle attività dell'Università di Bologna durante i tavoli di concertazione

2. INTRODUZIONE

I cambiamenti climatici sono cambiamenti a lungo termine dei modelli meteorologici, questi possono avvenire per cause naturali. Tuttavia, a partire dal XIX secolo, le attività antropiche costituiscono il principale fattore alla base dei cambiamenti climatici. Questi, sono responsabili dell'innalzamento dei livelli marini con conseguenze sulla salinizzazione delle acque sotterranee e del suolo, fenomeni che possono incidere sulla salute e sulla sicurezza alimentare (<https://unric.org/it/che-cosa-sono-i-cambiamenti-climatici/>) aggravando la situazione di paesi che, come il Senegal, devono far fronte ad un clima ostile. Dai modelli previsionali emerge che il Senegal sarà sottoposto ad un aumento della frequenza degli eventi estremi (MEDD, 2018) con un aumento della temperatura media del paese compreso tra i 0.5°C e i 1.7°C entro il 2035 e un cambiamento nella distribuzione delle precipitazioni che si manifesterebbe attraverso l'aumento della durata dei periodi secchi e l'aumento del numero di giorni di forti piogge, in un clima già caratterizzato da una forte stagionalità, in cui le piogge sono concentrate tra giugno e ottobre. Tra i fenomeni che interessano il clima del Senegal si registrano periodi di siccità ed allagamenti. Le siccità del 2011 e del 2014 hanno colpito rispettivamente 850.000 e 640.000 persone (MEDD, 2018). Nella regione di Kaffrine, area studio del progetto Global South, sia zone rurali che urbane sono soggette ad allagamenti durante la stagione delle piogge (<https://Climateknowledgeportal.Worldbank.Org>).

Anche l'economia del Senegal è sensibile ai cambiamenti climatici, che costituiscono un ostacolo per la crescita economica, la sicurezza alimentare e la lotta alla povertà. Il settore agricolo, ad esempio, deve far fronte a numerose difficoltà, tra cui la scarsità d'acqua e l'impoverimento dei suoli causato dall'erosione (MEDD, 2018), quest'ultima è spesso aggravata dalla deforestazione e dalle cattive pratiche agricole. L'acqua è una risorsa fondamentale, soprattutto in un contesto semiarido come quello della regione di Kaffrine dove l'approvvigionamento avviene principalmente per emungimento da pozzi nell'acquifero freatico. Quest'acqua viene impiegata per il consumo alimentare umano e del bestiame, per il lavaggio dei vestiti, in alcuni casi, dove sono presenti colture ortive irrigue, anche per l'irrigazione, che avviene per lo più a mano. Nella maggior parte dei casi l'acqua dei pozzi superficiali non subisce nessuna forma di trattamento o potabilizzazione. In molte zone all'interno del 'bacino delle arachidi', che si estende principalmente nelle regioni di Kaolack, Diourbel, Louga, Thiès, Fatick e Kaffrine, la potabilità dell'acqua viene meno a causa delle alte concentrazioni di fluoro al suo interno, spesso però, quest'acqua viene comunque bevuta a causa dell'assenza di alternative esponendo circa un milione di persone al rischio di fluorosi, causa di osteosclerosi, artriti cervicali e lombari che possono presentarsi in forme invalidanti (*World Bank Group*, 2022). In uno studio condotto nel 2017 da Millennium Drinking Water and Sanitation

Program (PEPAM) e Agency for Statistics and Demography (ANSD) si evidenzia come la percentuale della popolazione che utilizza acqua sicura per il consumo umano si attesti a livello nazionale sul 7.8%, scendendo attorno all'1% nelle zone rurali fino a toccare quasi lo 0% a Kaffrine (*World Bank Group*, 2022). Un'altra criticità legata all'acqua è legata alla salinizzazione del corso del fiume Bao Bolong, causata dalle onde di marea alla foce del fiume Gambia, di cui il Bao Bolong è tributario, le quali portano alla risalita di acqua salata per 380 km dalla foce del Gambia (Faye et al., 2018). Tale salinizzazione è accentuata dalla natura effimera del Bao Bolong; infatti, la lunga stagione secca (novembre-giugno) porta a notevoli variazioni della portata del fiume con fenomeni di forte evaporazione, aumento della concentrazione e deposizione del sale per gran parte del corso del fiume.

Un altro problema risiede nell'amministrazione della risorsa acqua e nella mancanza di cooperazione da parte degli enti e amministrazioni locali deputati alla gestione del territorio e dell'acqua. Questo aspetto è riscontrabile, ad esempio, nell'assenza di gestione e manutenzione delle poche infrastrutture idrauliche esistenti, i cosiddetti "barrages", sbarramenti fenestrati con le funzioni di regimazione della portata del fiume e riduzione della risalita di acqua salata lungo il fiume. Infatti, manca una definizione chiara nella suddivisione dei compiti e delle responsabilità dei vari enti pubblici (Dia et al., 2020) che si occupano della gestione della risorsa acqua, tra cui (FAO, 2005):

- Ministero dell'agricoltura, dell'allevamento e dell'idrologia attraverso:
 - Dipartimento di ingegneria rurale, dei bacini di ritenzione e dei laghi artificiali;
 - Dipartimento dell'agricoltura;
 - Dipartimento di idrologia;
 - Programmi di sviluppo e società sotto la supervisione del ministero.
- Ministero dell'ambiente e della protezione della natura attraverso:
 - Dipartimento dell'ambiente e degli stabilimenti classificati (DEEC);
 - Dipartimento delle acque, delle foreste, della caccia e della conservazione del suolo (DEFCCS);
 - Osservatorio ecologico (CSE)

2.1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

2.1.1. AREA DI STUDIO

Il Senegal è il paese più ad ovest del continente africano, è situato tra l'equatore ed il tropico del cancro, esattamente tra 12°20' e 16°40' N e tra 11°20' e 17°30' W, confina con Mauritania, Mali, Guinea, Guinea-Bissau e Gambia ed è bagnato dall'Oceano Atlantico (Dia et al., 2020). L'area di

studio si trova nella regione senegalese di Kaffrine, più precisamente a sud dell'omonimo capoluogo; i limiti dell'area sono quelli del bacino idrografico del fiume Bao Bolong, un affluente che si inserisce nella sponda destra del fiume Gambia (Figura 2).

Il bacino idrografico del fiume Bao Bolong si estende per un'area di 3059 km², il fiume ha una lunghezza di 133 km. In prossimità del Bao Bolong si trovano numerosi villaggi, sedici dei quali, fanno parte dell'AVRB (Association des Villages Riverains du Bao Bolong). I villaggi, popolati principalmente da due etnie (Wolof e Peul) vivono prevalentemente di agricoltura di sussistenza utilizzando asini e cavalli come forza lavoro, e allevamento. La produzione principale è quella di arachidi, infatti, l'area di studio ricade all'interno del cosiddetto 'bassin arachidier', una regione in cui si ha circa il 50% della produzione nazionale di arachidi, secondariamente sono presenti colture di altri cereali, tra cui miglio, sorgo, riso e mais (Dia et al., 2020).

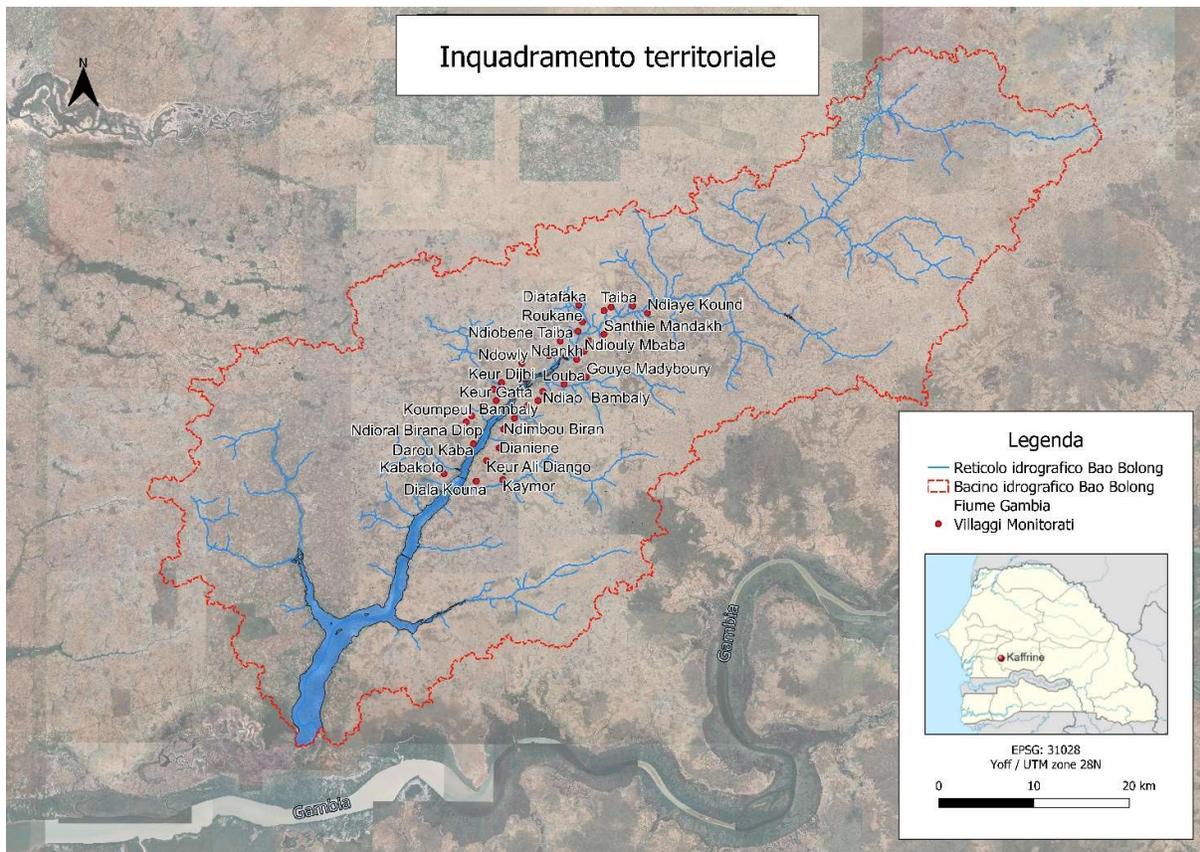


Figura 2. Area di studio

2.1.2. CLIMA

Il clima del Senegal è di tipo sudano-saheliano, caratterizzato dall'alternanza di una stagione secca da novembre a giugno, segnata dalla presenza degli alisei ed una stagione delle piogge da giugno ad ottobre, dominata dai monsoni (Dia et al., 2020; MEDD, 2018). Il clima del paese presenta variazioni

a seconda della latitudine, infatti, la pluviometria varia da 1200 mm nel sud a 300 mm del nord (MEDD, 2018). Secondo la classificazione climatica di Koppen il paese può essere suddiviso in 3 fasce (<https://Climateknowledgeportal.Worldbank.Org/>): la fascia settentrionale del paese con un clima di tipo BWh, che indica un clima arido desertico con temperatura media annua maggiore di 18.5°C; la fascia centrale con un clima di tipo BSh, che indica un clima arido steppico con temperatura media annua superiore ai 18.5°C; la fascia a sud con clima di tipo As/Aw, dove As indica un clima tropicale piovoso in cui la temperatura media del mese più freddo supera i 18°C e con una stagione secca nel trimestre caldo e Aw indica il clima tipico delle savane. Kaffrine rientra nella fascia climatica della classificazione di Koppen di tipo arido steppico, è caratterizzata da temperature medie che oscillano tra i 25°C ed i 33°C ed una pluviometria media di 700 mm annui (Figura 3).

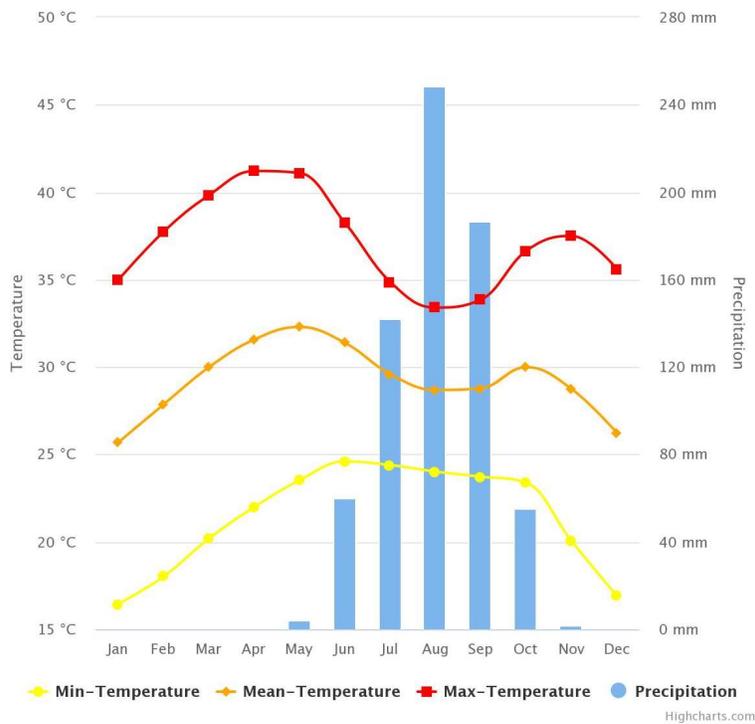


Figura 3. Climatologia mensile della regione di Kaffrine, serie storica 1991-2020.

Fonte: (<https://Climateknowledgeportal.Worldbank.Org/>)

2.1.3. TOPOGRAFIA

La topografia del Senegal è relativamente pianeggiante, con altitudini inferiori ai 130 m sul livello del mare, fanno eccezione soltanto alcune aree del sud del paese (Dia et al., 2020). Nell’area di studio la topografia varia da un minimo di 4.2 m a.s.l. lungo l’alveo del fiume ad un massimo di 68.7 m a.s.l. nella zona NE della valle, con una media di 28.3 m a.s.l. (Figura 4). Tutti i villaggi monitorati sono

localizzati nella fascia compresa tra 13°44' 44'' e 13° 56' 36''N, e si trovano a quote comprese tra 8 e 23 m sul livello del mare.

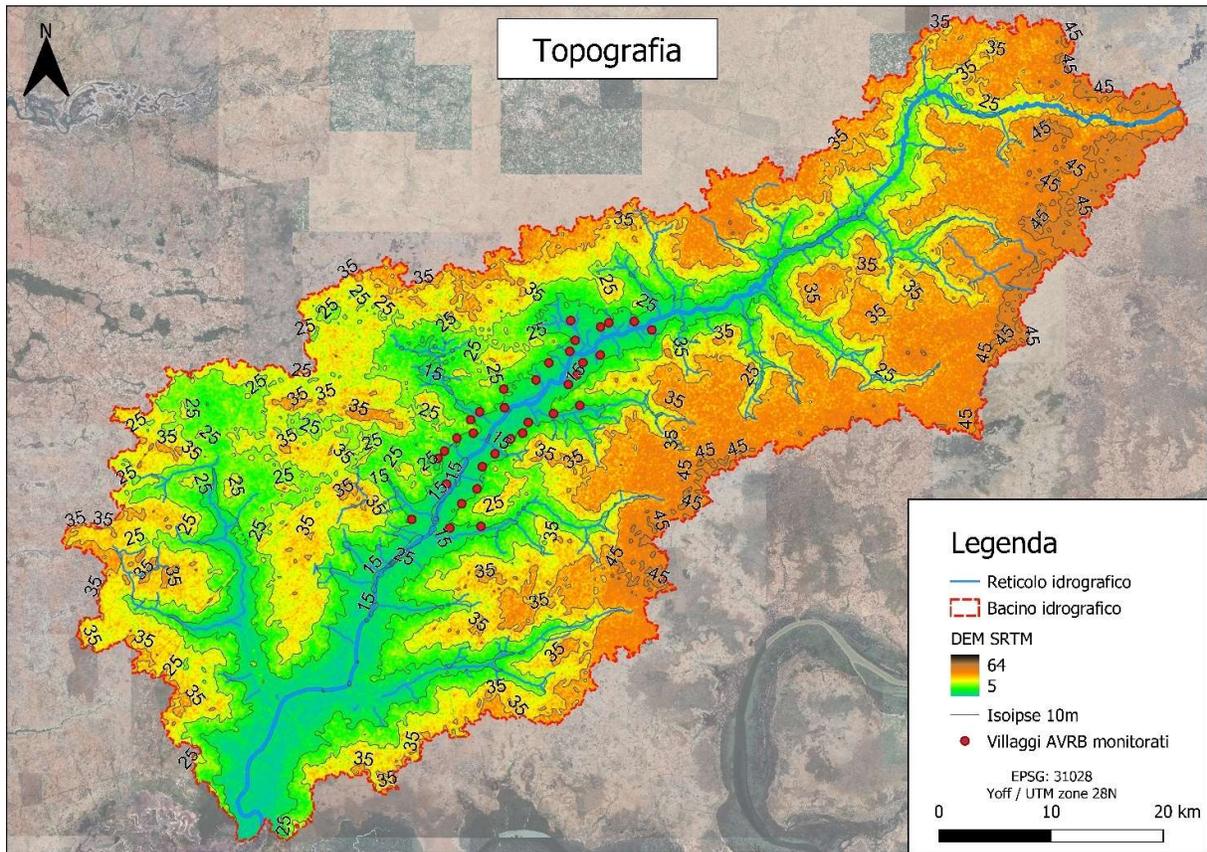


Figura 4. Modello di elevazione digitale dell'area di studio

2.1.4. IDROGEOLOGIA

Le risorse di acqua dolce del Senegal comprendono acqua piovana, acque superficiali e acque sotterranee. Le precipitazioni avvengono principalmente tra giugno e ottobre con una distribuzione molto disomogenea sul territorio. In merito alle acque superficiali, le principali riserve sono costituite dai fiumi Senegal, Gambia, Casamance e Kayanga e dal lago di Guiers. Per quanto riguarda le acque sotterranee, maggior parte del paese è interessato dalla presenza del bacino sedimentario Senegal-Mauritanico, che si estende per l'80% del territorio, e si suddivide in tre grandi sistemi: sistema superficiale, intermedio e profondo (Dia et al., 2020). L'acquifero superficiale, oggetto dello studio, copre l'intero bacino sedimentario Senegal-mauritanico ed è costituito principalmente di sabbia ed argilla in proporzioni variabili. L'acquifero superficiale si trova al di sopra di depositi più consolidati dell'Eocene, Paleocene e Maastrichtiano e il suo spessore varia da pochi metri a 72.5 m. Nella valle del Bao Bolong, il basamento dell'acquifero superficiale si trova a profondità comprese tra i -31 e i -68 m a.s.l., con un valore medio di -47 m a.s.l. (Figura 5). I valori di trasmissività idraulica

dell'acquifero freatico sono compresi tra $2.1 \cdot 10^{-4}$ e $9.5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; i valori di conduttività idraulica variano da $1.7 \cdot 10^{-5}$ a $6.6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (DGPRES, 2018). Il sistema acquifero intermedio è costituito da formazioni dell'Eocene e del Paleocene, è principalmente calcareo e presenta fenomeni di carsismo o fratture (Travi et al., 2017). Tra l'acquifero superficiale e l'acquifero intermedio esiste una continuità idraulica, dalle indagini geologiche e idrogeologiche è emerso che non esiste un orizzonte completamente impermeabile, bensì, sono presenti delle fessurazioni nelle formazioni calcaree che permettono scambi tra i due acquiferi (DGPRES, 2018). Il sistema acquifero profondo è originario principalmente del Maastrichtiano, è un acquifero confinato costituito principalmente di sabbia, argilla sabbiosa ed arenaria calcarea, ha uno spessore di circa 250 m che può arrivare fino a 680 m di profondità (Travi et al., 2017). Questo acquifero è molto produttivo, motivo per il quale è la principale sorgente di approvvigionamento di acqua sotterranea profonda del Senegal. L'acquifero profondo è soggetto ad intrusione salina lungo la costa, ma la principale fonte dell'alta salinità di questo acquifero è da attribuire ad acque salate fossili (Travi et al., 2017).

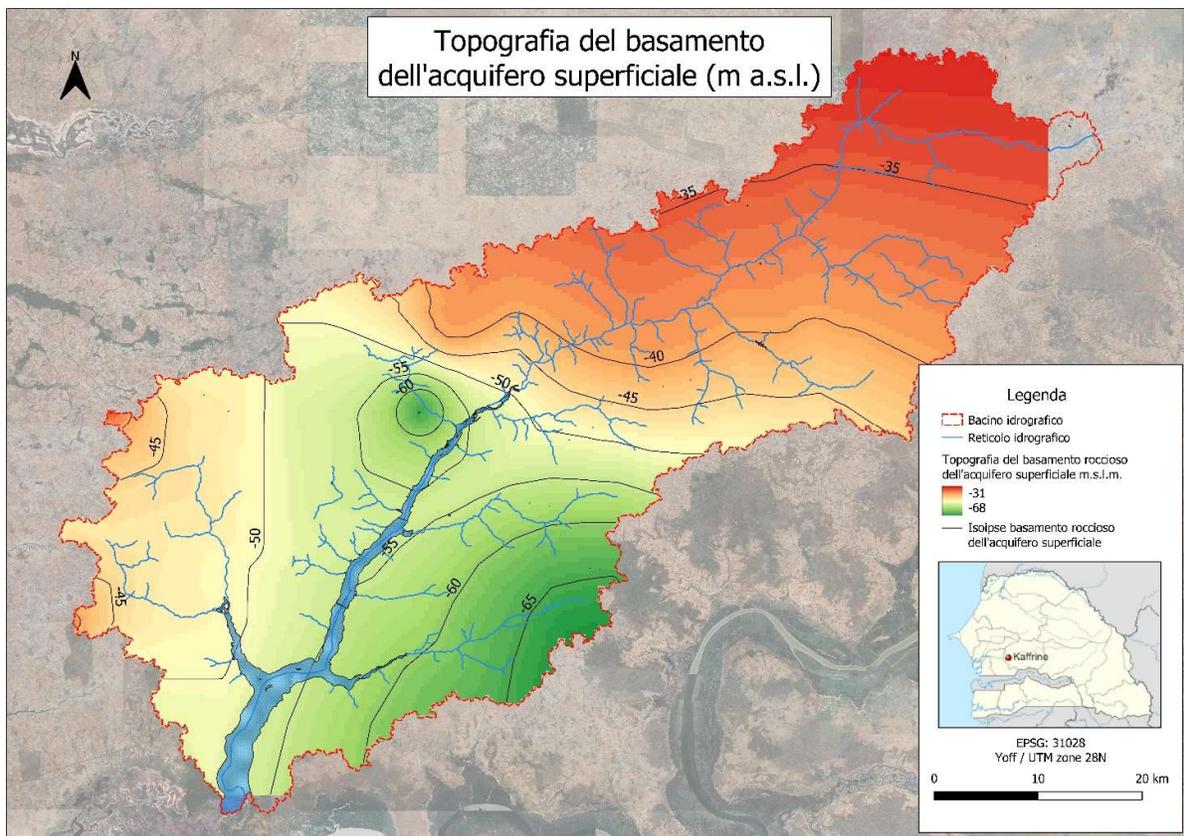


Figura 5. Profondità del basamento dell'acquifero superficiale nella valle del Bao Bolong

Per quanto riguarda la pedologia dell'area di studio prevalgono i suoli classificati dalla World

Reference Base come *acrisols* seguiti dai *lixisols*, in alcune parti del bacino idrografico, in particolare nelle aree adiacenti ai corsi d'acqua sono presenti in piccola parte anche i *gleysols* (Figura 6).

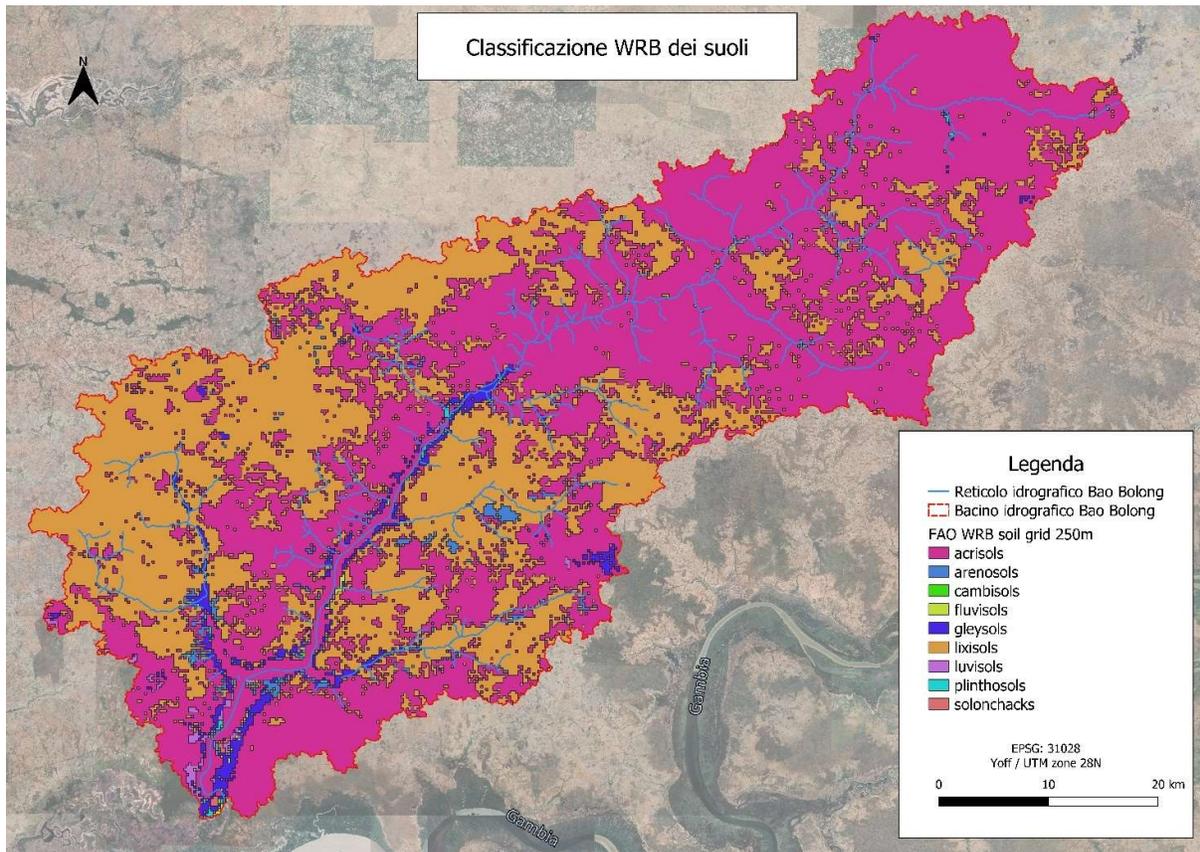


Figura 6. Pedologia dell'area di studio

Gli *acrisols*, i suoli più abbondanti all'interno dell'area di studio sono suoli acidi molto alterati tipici di climi tropicali e sub-tropicali. I profili di questo tipo di suoli sono caratterizzati da una minor quantità di argilla nel topsoil rispetto al subsoil, inoltre possono essere caratterizzati da un orizzonte eluviale al di sotto dell'orizzonte superficiale biancastro dovuto alla perdita degli ossidi di ferro e dei minerali argillosi. Come gli *acrisols* anche i *lixisols* sono caratterizzati da una minor concentrazione di argilla nelle porzioni più superficiali del suolo a causa di processi pedogenetici come la migrazione dell'argilla, che porta alla formazione di un orizzonte 'argico' nel subsoil con una maggior concentrazione di argilla. Questo tipo di suoli, tipico di regioni tropicali come le regioni sub-saheliane con una stagione arida marcata, si forma a partire da vari materiali parentali inconsolidati e fortemente alterati. Per *gleysols*, invece, si intendono dei suoli che sono stati in condizioni di saturazione da parte dell'acqua per un tempo sufficiente per lo sviluppo di condizioni riducenti (FAO, 2015).

3. METODOLOGIA

3.1. CREAZIONE DEL DATABASE GIS

Un database GIS (Geographic Information System) è un tipo di database progettato per gestire, archiviare ed analizzare dati geografici. Questo tipo di database riveste un ruolo fondamentale nell'analisi ambientale perché consente di integrare ed analizzare dati provenienti da diverse fonti per avere una visione completa e dettagliata dell'ambiente in esame. Grazie ai database GIS è possibile analizzare la distribuzione e valutare le interazioni dei diversi elementi del paesaggio, monitorare i cambiamenti ambientali nel tempo e sviluppare strategie di gestione del territorio. In particolare, possono essere utilizzati per: identificare aree a rischio di alluvioni ed altri eventi naturali, attraverso l'analisi di dati geologici, topografici e idrologici; supportare la gestione delle emergenze ambientali; monitorare risorse naturali, ad esempio la qualità dell'acqua o la copertura del suolo; pianificare uno sviluppo territoriale coerente con le esigenze territoriali e sociali (Zhang et al., 2019). La costruzione del database ha avuto inizio con la raccolta di dati mediante la consultazione di studi pregressi, rapporti tecnici delle autorità senegalesi responsabili della gestione delle acque, studi condotti dalle università locali, dati geografici globali di NASA e FAO e dati climatici reperiti dai database online. Molti dati preesistenti, raccolti da rapporti tecnici o da studi condotti da autorità e università locali, sono stati ottenuti in formati cartacei o .pdf e sono stati digitalizzati e armonizzati in modo da configurarsi come informazioni geografiche digitali ed essere integrati nel GIS di progetto. Le immagini cartacee sono state scannerizzate, georeferenziate e digitalizzate. Il processo di georeferenziazione (ottenuto tramite il tool “*georeferencer*” in QGIS) permette di assegnare coordinate geografiche ad un'immagine o ad altri dati spaziali, in modo da poterli posizionare in modo preciso all'interno di un sistema di riferimento geografico. Il processo di georeferenziazione coinvolge solitamente due tipi di dati: l'immagine o il dataset che si vuole georeferenziare e un dataset di riferimento contenente informazioni geografiche accurate come le coordinate geografiche di punti di controllo o la mappa topografica della zona. Per georeferenziare l'immagine o il dataset, si sono individuati alcuni punti di controllo sia nell'immagine da georeferenziare che nel dataset di riferimento e si sono associate le coordinate geografiche corrette ai punti di controllo nell'immagine. Una volta che tutti i punti di controllo sono stati associati alle rispettive coordinate geografiche, l'immagine viene tralata e deformata in modo da posizionarla nel sistema di riferimento geografico corretto. Tutti i file contenuti all'interno del database GIS sono inseriti all'interno di un progetto QGIS. Il sistema di riferimento utilizzato nel progetto QGIS è Yoff UTM zone 28N EPSG: 31028, derivato da WGS72. Si tratta di una proiezione cartesiana con sistema metrico utilizzata per il Senegal che utilizza l'ellissoide Clarke 1880 (IGN) (<https://Epsg.Io/31028-8633>).

Grazie all'utilizzo dei software QGIS, ArcMap, GlobalMapper ed Excel, è stato possibile elaborare i dati, inseriti nel database di progetto, al cui interno sono raccolte tutte le informazioni geospaziali utili alla caratterizzazione della valle del Bao Bolong. Un esempio di elaborazione, che ha permesso di definire l'area di studio, è la delimitazione del bacino idrografico del fiume, che è stata eseguita utilizzando il tool 'create watershed' in ArcMap. Questo strumento permette, basandosi sulla topografia e sulla sezione di chiusura del bacino, di determinare il perimetro del bacino idrografico. In questa elaborazione la topografia utilizzata è quella del SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) in banda X della NASA, che ha una risoluzione dei pixel di 30 m (Mukul et al., 2015). Mentre la sezione di chiusura del bacino è stata definita sul reticolo idrografico e posizionata in prossimità dell'intersezione tra il Bao Bolong ed il fiume Gambia. Tutti i file ottenuti dalla raccolta ed elaborazione dati sono stati organizzati nel database e suddivisi per argomento in undici cartelle tematiche. Nel database sono stati integrati dati raster, shapefile, e tabelle Excel. I file raster sono un formato di dati geospaziali che fornisce una rappresentazione spaziale, discreta e regolare delle informazioni geografiche che può contenere dati in forma di immagini e griglie di valori (DeMers, 2005). Uno shapefile è un formato di file di dati geospaziali che memorizza le informazioni geografiche come un insieme di elementi geometrici (linee, poligoni e punti) con associati attributi alfanumerici (Hengl et al., 2017). Infine, i dati raccolti in forma tabellare e i dati dei monitoraggi sono stati inseriti come file Excel in modo da poter essere visualizzati spazialmente. La creazione e consultazione del database ha permesso di elaborare i diversi dati geografici, di sviluppare mappe tematiche per la caratterizzazione dell'area di studio, di pianificare le diverse campagne di monitoraggio delle acque e di selezionare le aree per i rilievi fotogrammetrici con drone. Inoltre, sarà un valido strumento a supporto delle decisioni che verrà donato come prodotto finale di progetto alle autorità locali competenti per la gestione dell'acqua.

3.2. RICOSTRUZIONE FOTOGRAMMETRICA UAV

Il DEM inserito nel geodatabase e disponibile per l'intero bacino idrografico è il SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) in banda X della NASA. La risoluzione dei dati grezzi del SRTM è di 1 arcsec, che corrisponde a circa 30 m lungo l'equatore. La copertura include Africa, Europa, Nord America, Sud America, Asia e Australia. Le altitudini originali del SRTM sono calcolate rispetto all'ellissoide WGS84, e poi aggiornate alle quote geoidiche usando il geoide EGM96 (<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Per ricostruire il modello concettuale idrogeologico dell'area e caratterizzare la connessione tra il fiume e l'acquifero, è emersa la necessità di avere modelli di elevazione di maggiore precisione. Sono state quindi individuate 3 aree (nelle località di Roukane,

Ndiao Bambaly e Kabakoto, Figura 7) dove effettuare la ricostruzione morfologica della superficie con aerofotogrammetria da SAPR (Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto) (<https://www.dji-store.it/qual-e-la-differenza-tra-droni-uas-uav-e-sapr>).

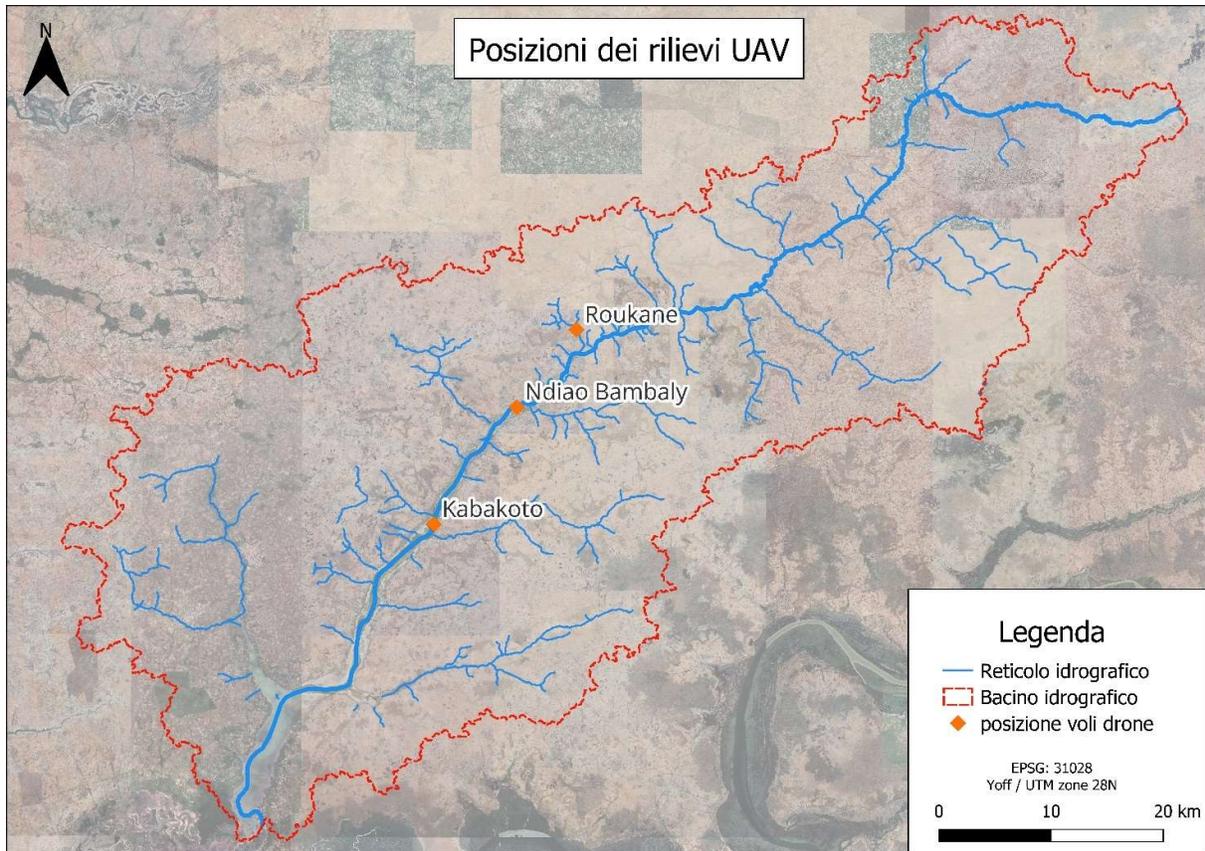


Figura 7. Posizione dei voli dei droni per la ricostruzione fotogrammetrica di 3 sezioni lungo il fiume Bao Bolong e un suo principale affluente.

L'estensione delle aree è stata definita in modo da intercettare trasversalmente il corso del fiume, le sue sponde, e da estendersi fino a includere alcuni pozzi monitorati nelle vicinanze.

I rilievi sono stati programmati utilizzando diversi software:

- Pix4D Mapper, che permette di impostare le aree su cui verrà effettuato il rilievo dopo averle preventivamente identificate, sarà poi utilizzato per il processamento del rilievo fotografico; a questo si associano le applicazioni specifiche da utilizzare per il rilievo che controllano i parametri di volo e di acquisizione come (Figura 8): overlapping frontale, laterale e quota di volo, permettendo la pianificazione del volo considerando il numero di batterie necessarie;
- Dronelink per il controllo del DJi Mini;
- Autel Sky per il controllo del Autel Robotics Evo II v2 RTK (Figura 10).

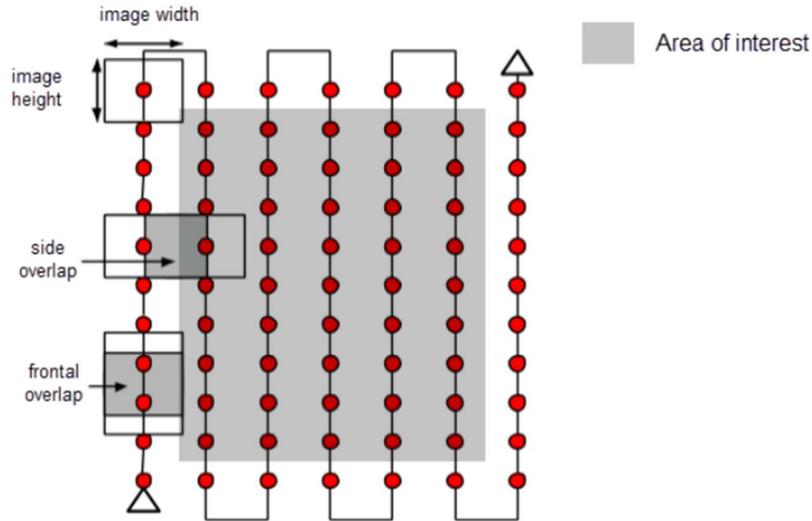


Figura 8. Illustrazione dei parametri di acquisizione di rilievo UAV (Pix4D SA, 2017)

Mediante questi software è stato possibile effettuare dei rilievi aerofotogrammetrici con dispositivi SAPR in modo semi-autonomo (Figura 9), perciò questo tipo di rilievi è configurabile nella categoria UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Per il rilievo di Kabakoto è stato sufficiente un solo volo, questo ha coperto una superficie di 994 km² ed ha raccolto 1542 immagini. A Ndiao Bambaly sono stati effettuati 3 voli per un totale di 2023 km² e 5618 immagini acquisite. A Roukane, invece, sono stati effettuati due voli, con una copertura di 1020 km² e 3029 immagini acquisite. Il risultato dei rilievi fotogrammetrici è una serie di foto che sono state combinate mediante l'uso di Pix4D per creare l'ortomosaico. L'ortomosaico o ortofoto è una composizione di fotogrammi che hanno subito un processo di ortorettificazione e georeferenziazione, in modo tale che il risultato abbia una scala uniforme, che permette di effettuare misurazioni in due dimensioni (<https://www.3dfotogram.It/Ortofoto-Ortomosaico-Ortofotomosaico>).



Figura 9. Fase di decollo del SAPR durante i rilievi presso il barrage Kabakoto

La modellazione di aerofotogrammetria UAV è stata effettuata utilizzando algoritmi di SFM (Structure from Motion). Questi algoritmi costituiscono un metodo a basso costo per la ricostruzione topografica ad alta risoluzione e possono essere utilizzati nella modellazione 3D a partire da una serie di immagini che si sovrappongono (Westoby et al., 2012). La tecnica di utilizzo degli SFM è utilizzata per creare modelli tridimensionali di oggetti o aree geografiche, che possono essere utilizzati per diverse applicazioni come la cartografia, l'ingegneria civile, l'agricoltura e la pianificazione urbana (Nex & Remondino, 2014).

I passaggi principali per la modellazione di aerofotogrammetria UAV con gli algoritmi di SFM in Pix4D sono (Nex & Remondino, 2014; Pix4D SA, 2017; Westoby et al., 2012):

1. Correlazione delle foto: in questo passaggio, vengono identificati i piani epipolari e i punti omologhi nelle foto aeree. I piani epipolari sono piani che passano attraverso la posizione dell'osservatore (SAPR) e l'oggetto fotografato. I punti omologhi sono i punti corrispondenti nelle diverse immagini che rappresentano lo stesso oggetto. La correlazione delle foto viene effettuata utilizzando algoritmi di computer vision che identificano i punti omologhi mediante tecniche di matching all'interno di diverse immagini. Questo metodo è particolarmente adatto

per gruppi di immagini con un alto grado di sovrapposizione, che catturano gli stessi oggetti da diverse angolazioni.

2. Creazione della nuvola sparsa: in questo passaggio, viene creata una nuvola di punti 3D sparsi, utilizzando i dati di: coordinate delle immagini; impostazioni della fotocamera. Per la creazione della nuvola sparsa i punti omologhi sono armonizzati mediante l'uso degli algoritmi "*Approximate Nearest Neighbour*" e "*Random Sample Consensus*", inoltre vengono create delle "tracce" che uniscono i punti omologhi in una serie di immagini, le tracce che comprendono meno di due punti omologhi e tre immagini sono scartate (Westoby et al., 2012). La nuvola di punti sparsi è una rappresentazione approssimativa dell'oggetto fotografato.
3. Creazione della nuvola densa: in questo passaggio, la nuvola sparsa viene processata dal software Pix4D mediante la funzione di densificazione, che utilizza le informazioni della nuvola sparsa per creare una griglia di punti densi sulla superficie dell'oggetto. Il risultato è una nuvola di punti 3D densa, che rappresenta l'oggetto fotografato in modo più preciso. Questo passaggio prevede l'utilizzo di tecniche di filtraggio e di interpolazione per ottenere una nuvola di punti densa e precisa.
4. Pulizia della nuvola di punti: in questa fase vengono individuati gli outliers e gli artefatti e rimossi. Questa operazione è stata svolta mediante il software CloudCompare, con il quale è stato possibile rimuovere manualmente gli artefatti creati durante la creazione della nuvola di punti.
5. Interpolazione della superficie: in questo passaggio, viene utilizzata la nuvola di punti densa per creare una superficie tridimensionale interpolata mediante tecniche di triangolazione.
6. Creazione DSM: utilizzando la superficie triangolata e le informazioni di altitudine raccolte dall'UAV, viene creata una mappa digitale di elevazione (DSM, *Digital Surface Model*) in due dimensioni, che rappresenta la superficie dell'oggetto fotografato.
7. Filtraggio: dal DSM, utilizzando algoritmi di filtraggio del software Cloud Compare, è stato ottenuto il DTM (*Digital Terrain Model*), che rappresenta la superficie terrestre senza gli elementi che si trovano sopra di essa.
8. Creazione dell'ortomosaico: in questo passaggio, le foto aeree sono assemblate per la creazione di un mosaico nel quale le immagini acquisite vengono collegate per creare una

mappa ortorettificata dell'area di interesse. L'ortorettificazione utilizza il DTM per correggere le distorsioni prospettiche nelle immagini.

9. Creazione del modello 3D: le immagini acquisite vengono utilizzate per applicare le textures alla superficie del modello 3D, creando un modello 3D realistico dell'area di interesse.

Tutti i risultati delle elaborazioni dei dati ottenuti dai rilievi UAV (nuvola di punti, ortofoto, DSM, DTM) sono georeferenziati, per essere in accordo con gli altri dati del database, è stato utilizzato il sistema di riferimento Yoff UTM zone 28N. I DTM creati con i dati dei rilievi UAV, per essere utilizzati, sono stati traslati lungo l'asse Z in modo tale che le quote dei pozzi corrispondessero con quelle del modello SRTM visto che la quota dei pozzi monitorati era stata precedentemente riferita al DEM SRTM.

Durante le elaborazioni Pix4D genera dei “*Quality report*” dai quali è possibile consultare i parametri di accuratezza, che sono riferiti agli assi X, Y e Z. Uno di questi è il “*Root Mean Square error*” (RMSE), la radice quadrata della media dei quadrati degli errori, è un parametro utilizzato per la valutazione della differenza tra il valore presente nel modello e il valore reale osservato (Montgomery et al., 2012).

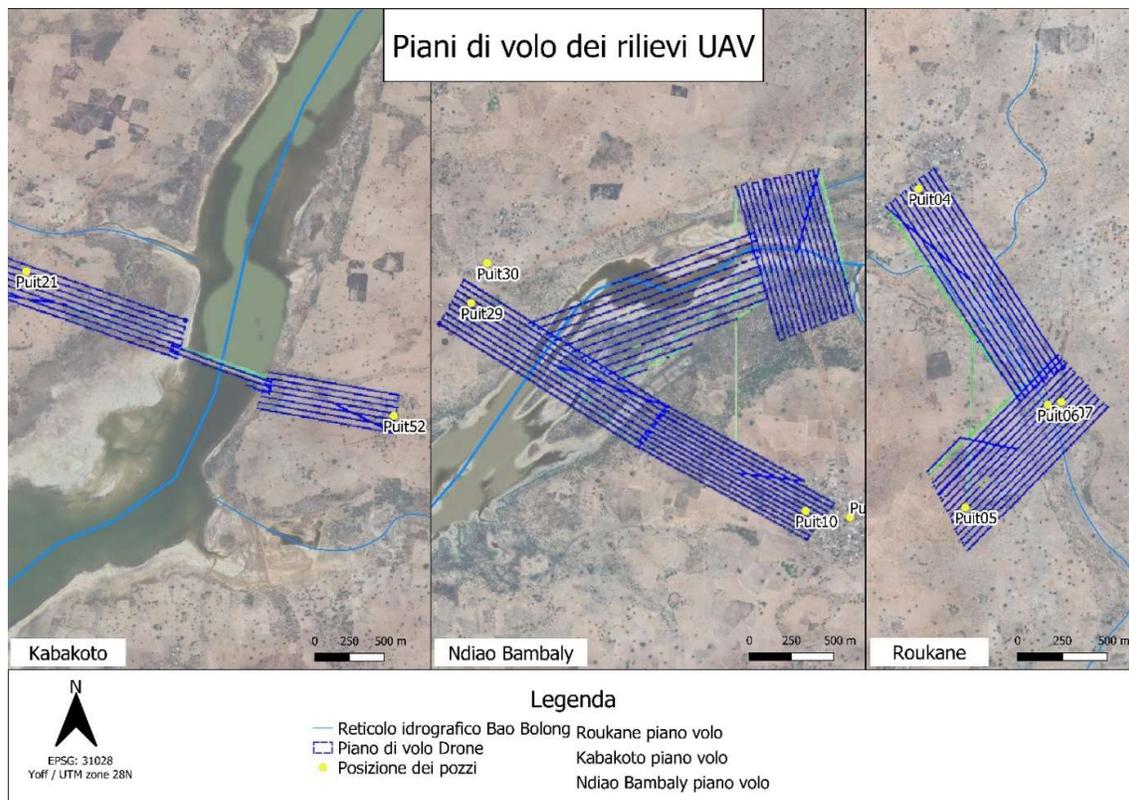


Figura 10. Piani di volo del drone ed estensioni delle tre aree rilevate (Kabakoto, Ndiao Bambaly, Roukane)

3.3. MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE

Il monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee è stato effettuato in due campagne di raccolta dati, una a giugno 2022 e l'altra ad ottobre 2022. Sono stati scelti questi periodi perché corrispondono rispettivamente alla fine della stagione secca e alla fine di quella delle piogge e si è ritenuto che effettuare il monitoraggio in questi periodi fosse opportuno per rappresentare le variazioni stagionali della falda e dei parametri chimico-fisici delle acque dovute alla distribuzione delle precipitazioni durante l'anno. Le acque sotterranee sono state monitorate in 30 pozzi nel mese di giugno e negli stessi pozzi più ulteriori 29 nel mese di ottobre, per un totale di 59 pozzi distribuiti lungo tutto il corso del fiume (Figura 11). Le acque superficiali sono state monitorate in 13 punti nella campagna di giugno e 20 in quella di ottobre (Figura 11), lungo il corso principale del fiume e lungo i suoi affluenti principali.

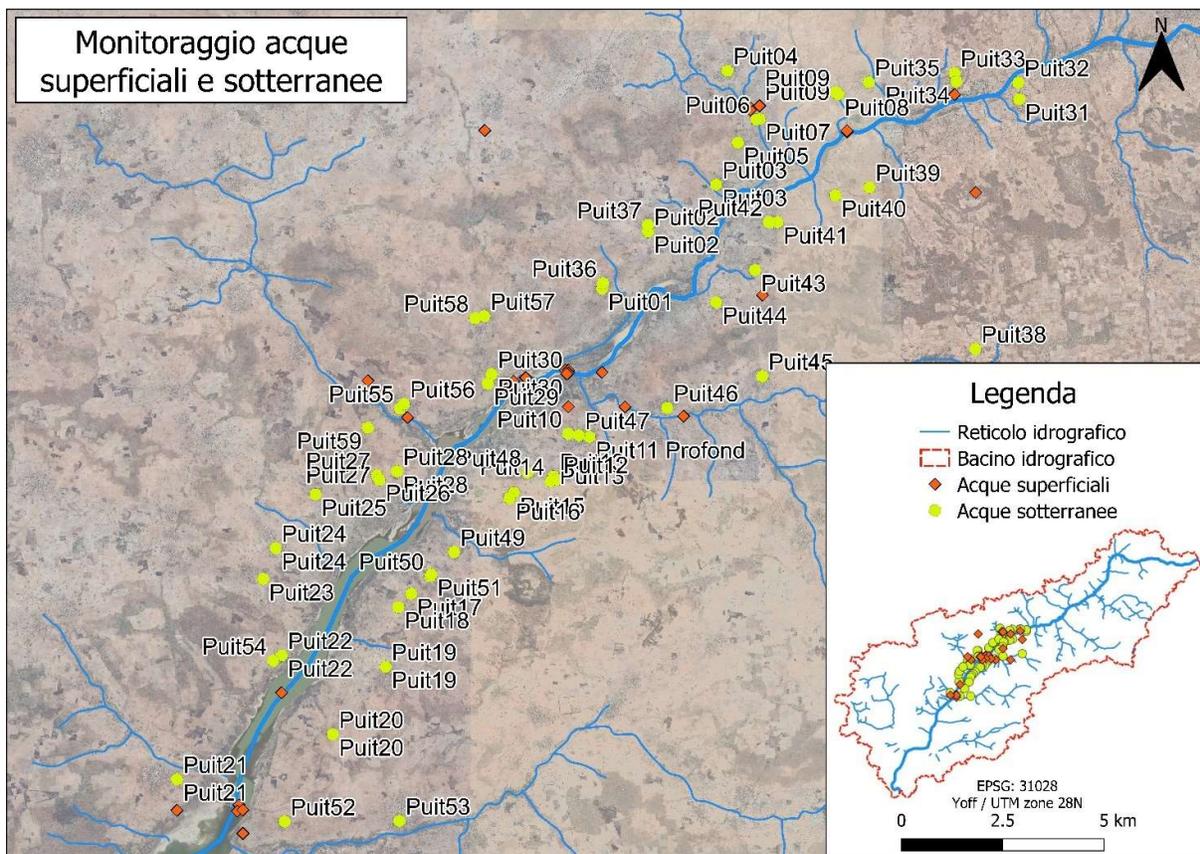


Figura 11. Punti di monitoraggio delle acque superficiali e sotterranee lungo tutta la valle del Baoblong

La profondità della tavola d'acqua è stata misurata con il freatimetro (Figura 12), uno strumento costituito da una cordella metrica che alla sua estremità presenta un dispositivo che emette un suono nel momento in cui viene a contatto con l'acqua. La profondità della tavola d'acqua è stata misurata

a partire dalla testa del pozzo che successivamente è stata quotata rispetto al piano campagna, in modo tale da poter calcolare la soggiacenza per differenza tra la quota della testa del pozzo e quella del piano campagna. Come quota del piano campagna si è considerata l'altimetria del SRTM. I dati ottenuti dai monitoraggi della profondità della tavola d'acqua sono stati impiegati per la costruzione della mappa della soggiacenza della falda freatica. Queste carte sono state ottenute trattando separatamente i dati di giugno e quelli di ottobre. A partire dai valori puntuali di soggiacenza misurata nei singoli pozzi, è stata utilizzata la funzione di QGIS "*interpolazione IDW*" (*Inverse Distance Weighting* – distanza inversa ponderata). Successivamente sui risultati dell'interpolazione (file raster), è stato utilizzato lo strumento di analisi raster '*level curves extraction*' con il quale sono state estratte le curve di livello con un intervallo di 1 m, sia per giugno che per ottobre.

L'interpolazione spaziale è un processo in cui a partire da dei punti i cui valori sono noti, permette di stimare i valori di altri punti non noti. L'interpolazione IDW (*Inverse Distance Weighting*) assegna un peso inversamente proporzionale alla distanza tra i punti di campionamento e il punto da stimare, in modo che i punti più vicini abbiano un peso maggiore rispetto a quelli più lontani. Questo metodo è particolarmente utile quando si hanno pochi punti campionati e si desidera stimare i valori in posizioni intermedie, ma ha alcuni limiti, come: la tendenza a creare "picchi" intorno ai punti campionati e la sensibilità alla selezione dei parametri, come il numero di punti da considerare per la media pesata e la potenza della funzione di peso espressa dal coefficiente di distanza "P" che per le interpolazioni è stato impostato con un valore di 2

(https://Docs.Qgis.Org/2.8/It/Docs/Gentle_gis_introduction/Spatial_analysis_interpolation.Html).



Figura 12. Strumenti utilizzati per il monitoraggio delle acque, a sinistra sonda multiparametrica Acquaread, a destra freatometro

Durante la campagna di ottobre, per ciascun pozzo sono stati misurati, tramite sonda multiparametrica Acquaread (Figura 12), i seguenti parametri chimico-fisici dell'acqua: pressione (mb); profondità (m); pH; pHmV; ORP (mV); ossigeno disciolto (% sat); ossigeno disciolto (mg/l); conduttività elettrica a 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$); TDS (mg/l); salinità (PSU); torbidità (NTU). La sonda multiparametrica, essendo dotata di sensore di profondità, permette di misurare i parametri a profondità note lungo la colonna d'acqua in modo da ottenere dei profili verticali dei parametri lungo i pozzi. Il tempo di acquisizione del dato è stato impostato ogni tre secondi e la sonda è stata calata all'interno dei pozzi a velocità costante.



Figura 13. (A) Fase di misurazione di un profilo verticale dei parametri chimico-fisici dell'acquifero con la sonda multiparametrica; (B) misurazione dei parametri chimico-fisici nelle acque superficiali

Per la campagna di giugno, invece, sono stati misurati, con conducimetro, i valori di temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ed EC a 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$) della tavola d'acqua raccogliendo i campioni d'acqua nei vari pozzi tramite l'utilizzo di una corda e di un secchio. Le acque superficiali sono state monitorate attraverso misurazioni puntuali (Figura 13 B), in cui sono stati registrati gli stessi parametri delle acque sotterranee utilizzando gli stessi strumenti sopra descritti. I dati raccolti nelle due missioni sono stati integrati ed organizzati in un file Excel, ad ogni dato sono state associate le coordinate geografiche del punto di acquisizione misurate dalla stessa sonda, in modo tale che i dati fossero georeferenziati e potessero essere inseriti nel geodatabase.

Sempre mediante l'utilizzo dell'interpolazione IDW sono state create le mappe di distribuzione della salinità, alle quote di 0 m a.s.l. e di 5 m a.s.l. per la campagna di ottobre. Per poter confrontare la salinità di giugno con quella di ottobre, visto che a giugno le misurazioni sono state effettuate su campioni d'acqua presi in superficie, sono state create le mappe di distribuzione della salinità, in cui per la mappa di ottobre sono stati utilizzati i valori misurati a livello di pelo libero dell'acqua. Per rappresentare la salinità si è deciso di utilizzare i valori di total dissolved solids (TDS) misurati durante il monitoraggio e la seguente classificazione dei valori di conduttività elettrica presa da Cozzolino et al., 2017, a cui sono stati associati i valori di TDS calcolati utilizzando i valori del coefficiente K, che esprimono i rapporti tra TDS ed EC, forniti da Rusydi, 2018 per i diversi intervalli di EC delle acque (Tabella 1):

Tabella 1. Classificazione delle acque in base ai valori di TDS ed EC

Tipo di acqua	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$ 25°C)	Rapporto TDS/EC (K)	TDS (mg/L)
Acqua dolce	<1000	0.55	<550
Acqua adatta per irrigazione	1000-3000	0.65	550-1950
Acqua salmastra	3000-30000	0.65	1950-19500
Acqua salata	30000-50000	0.7	19500-35000
Acqua con salinità maggiore o uguale all'acqua di mare	>50000	0.75	>35000

Infine, per ciascuno dei 59 pozzi monitorati in ottobre, sono stati creati i profili verticali dei parametri chimico-fisici di pH, Eh (mV), ossigeno disciolto (DO, mg/l), TDS (mg/l), i cui grafici sono riportati da Figura 1A a Figura 14A nel capitolo 6 ALLEGATO A.

3.3.1. TRANSETTI

I dati raccolti e descritti nei paragrafi precedenti sono stati utilizzati per ricostruire i modelli idrogeologici concettuali sviluppati lungo due transetti a Kabakoto e Ndiao Bambaly (Figura 14). Ognuno dei due transetti è stato impostato in modo da intercettare, oltre al fiume, anche due pozzi sottoposti a monitoraggio: uno sulla sponda destra e uno sulla sponda sinistra del Bao Bolong. Il transetto 1 si trova in corrispondenza del barrage di Kabakoto e attraversa, oltre al fiume, anche i pozzi 21 e 52. Il transetto 2 si trova a Ndiao Bambaly e include i pozzi 10 e 29.

Ogni transetto mostra l'andamento della topografia ricostruita con i voli UAV, la profondità della tavola d'acqua in giugno ed ottobre 2022, l'interfaccia acqua dolce-acqua salata di ottobre e i profili verticali di EC nei pozzi presenti lungo i transetti. Per estrapolare la topografia è stato utilizzato il plug-in "*terrain profile*" di QGIS, che utilizza in ingresso la posizione del transetto ed il DTM per restituire le quote lungo l'intera lunghezza del transetto.

Per quanto riguarda l'alveo fluviale non è stato possibile ricostruire la batimetria con l'utilizzo del drone, infatti dove si ha la presenza di acqua nelle ortofoto, nei DEM si hanno zone di no data. La morfologia dell'alveo fluviale è stata quindi creata artificialmente basandosi esclusivamente sull'andamento delle sponde del fiume e considerando che il fiume è profondo massimo 3 m nella parte più centrale del corso, e massimo 1.5 m vicino alle sponde (da sopralluogo nella stagione secca a giugno quando la maggior parte dell'alveo è visibile).

I livelli del fiume a ottobre sono stati estratti dal DTM del drone, considerando la quota del punto in cui la topografia incontra l'acqua. Le quote della tavola d'acqua sia di ottobre che di giugno sono state corrette sulle quote del DTM, in modo tale da riferire tutte le quote al livello medio mare. È da notare che solo per il pozzo 52, non essendo presenti dati della tavola d'acqua per giugno, è stato necessario stimarli. In questo caso è stata calcolata la variazione media della tavola d'acqua tra le campagne di giugno e ottobre calcolata su tutti i pozzi e la si è sottratta al valore del livello misurato ad ottobre nel pozzo stesso.

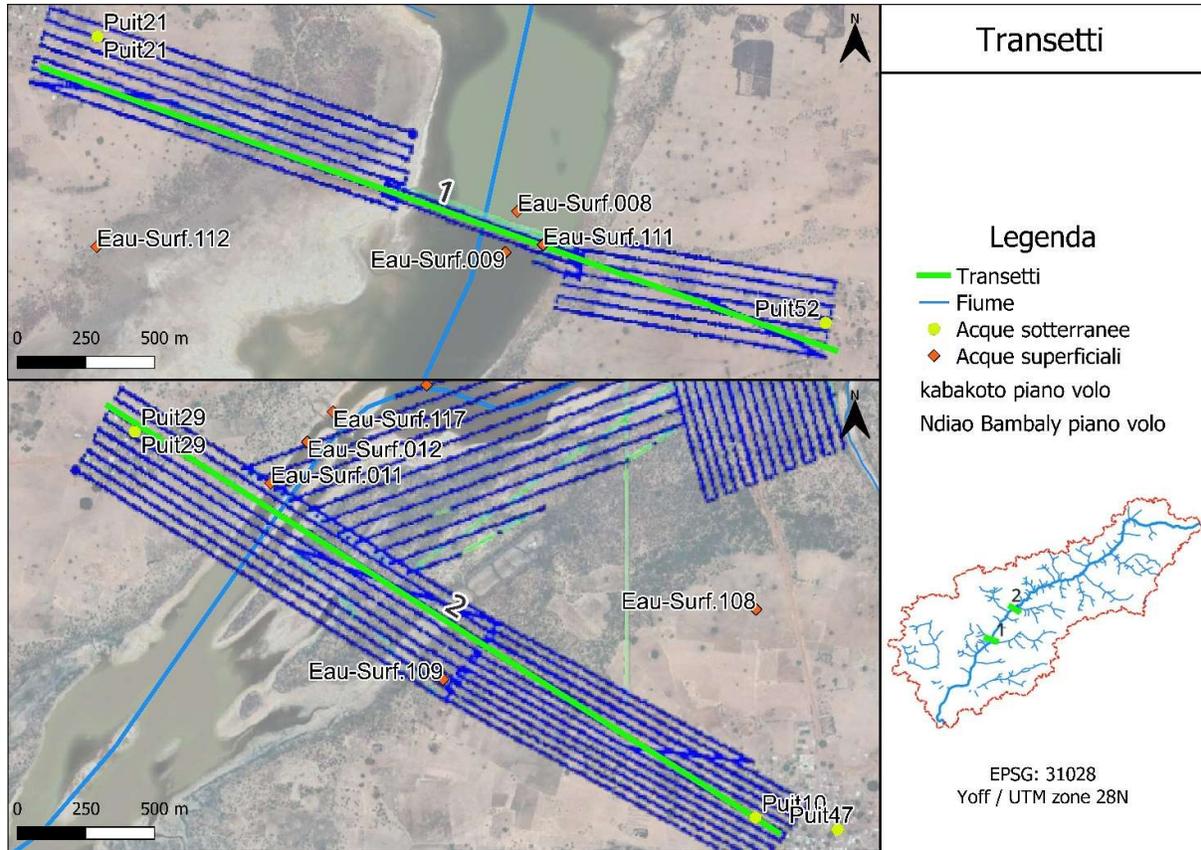


Figura 14. Posizione dei transetti rispetto ai piani di volo con il drone (Kabakoto a sud, Ndiao Bambaly a nord)

La profondità dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata (Z), illustrata nella Figura 15, per la stagione delle piogge è stata calcolata utilizzando la formula di Ghyben-Herzberg-Dupuit (Fetter, 2000):

$$Z = -\sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot x \cdot \left(\frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}\right)}{k}} \quad (2.1)$$

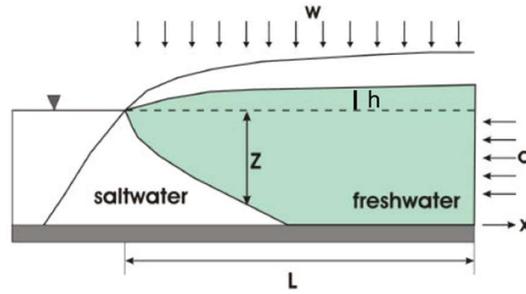


Figura 15. Illustrazione dell'applicazione della formula di Ghyben-Herzberg-Dupuit (modificata da Fetter, (2000)).

dove:

x è la distanza dal fiume [m]; k è la conduttività idraulica [m/giorno]; q è la ricarica dell'acquifero per unità di superficie [m/d]; ρ_s è la densità dell'acqua salata [kg/m^3]; ρ_f è la densità dell'acqua dolce [kg/m^3].

Per la conduttività idraulica (k) si è utilizzato un valore di 1 m/g, tipico di sedimenti sabbiosi e sabbiosi argillosi (Fetter, 2000) e in accordo con i valori riportati da DGPRES (2018) per la valle del Bao Bolong.

Per la densità dell'acqua salata del fiume (ρ_s) è stato usato il valore di 1009.7 kg/m^3 , calcolato a partire dal valore medio di EC (27.3 mS/cm) e temperatura (34.2 °C) del fiume a ottobre (campioni acqua superficiale in Figura 14); mentre la densità dell'acqua dolce dell'acquifero (ρ_f) è stata considerata uguale a 1000 kg/m^3 .

Per un acquifero freatico, la ricarica (q) può essere calcolata in funzione della variazione della tavola d'acqua secondo la seguente formula (Fetter 2000):

$$q = S_y \Delta h \quad (2.2)$$

dove:

S_y è la resa specifica dell'acquifero [-] e Δh è la variazione media della tavola d'acqua [m]. La resa specifica è il rapporto tra il volume d'acqua che l'acquifero può drenare per gravità rispetto al volume totale dell'acquifero e per acquiferi non confinati varia da 0.02 a 0.30. Per l'area di studio sono stati considerati un valore di S_y uguale a 0.21 e una variazione della tavola d'acqua di 0.43 m fra il monitoraggio di giugno e quello di ottobre, restituendo un valore di q uguale a $2.32 \cdot 10^{-3} \text{ m/g}$.

3.4. BILANCIO IDROLOGICO

Secondo il United Nations World Water Assessment Programme, il calcolo del bilancio idrologico è uno degli approcci fondamentali per lo studio delle risorse idriche di un bacino idrografico (UNESCO, 2018). Questo tipo di approccio considera i flussi di acqua in ingresso e in uscita da un bacino idrografico (Figura 16): precipitazioni, evapotraspirazione, ruscellamento superficiale, percolazione profonda, e variazione di immagazzinamento (Kothawale et al., 2018; UNESCO, 2018).

Per lo studio del bilancio idrologico del bacino idrografico del fiume Bao Bolong è stata utilizzata l'equazione fondamentale del ciclo idrologico (Fetter, 2000):

$$P = ET + DP + R + \Delta S \quad (2.3)$$

dove:

- P: precipitazioni [mm];
- ET: evapotraspirazione [mm];
- DP: percolazione profonda [mm];
- R: ruscellamento [mm];
- ΔS : differenza di immagazzinamento [mm]

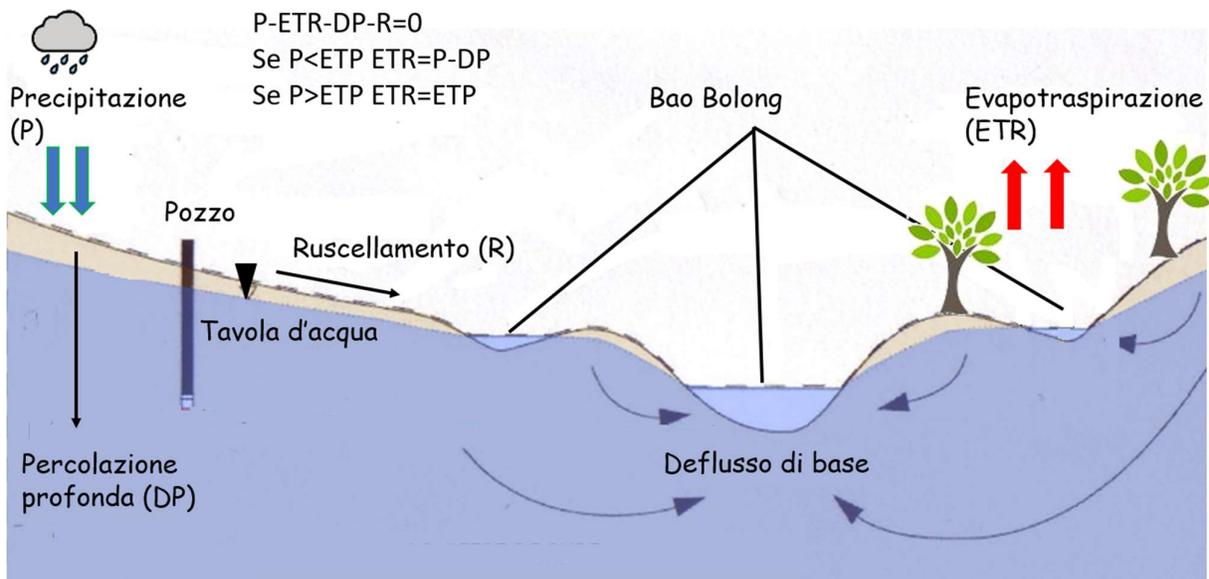


Figura 16. Illustrazione delle componenti del bilancio idrologico

Con l'obiettivo di riflettere il carattere fortemente stagionale del clima, si è deciso di sviluppare il bilancio idrologico su base mensile.

I dati di precipitazione costituiscono l'unico flusso di acqua in ingresso del bacino del Bao Bolong e sono stati utilizzati i dati giornalieri disponibili per Kaffrine per l'anno 2022 (fonte: www.visualcrossing.com).

La percolazione profonda è il processo idrologico per il quale l'acqua attraversa la zona vadosa del suolo per raggiungere l'acquifero, contribuendo alla ricarica, e costituisce un flusso in uscita dal bilancio idrologico. In questo sistema, la percolazione totale, che può avvenire solo durante il periodo delle piogge, ovvero da maggio a ottobre è stata calcolata considerando le mappe di soggiacenza di giugno e ottobre, così come descritte nel paragrafo 3.3. Con il plugin di QGIS “*statistiche zonali*” sono stati calcolati i valori medi di soggiacenza di giugno e ottobre per l'area monitorata e la variazione media della soggiacenza è stata moltiplicata per il valore della resa specifica della sabbia/sabbia-argillosa secondo l'equazione (2.2). La percolazione profonda totale è stata distribuita mensilmente nei mesi della stagione delle piogge (maggio-ottobre) pesandola sul valore mensile di precipitazioni.

Il ruscellamento superficiale costituisce anch'esso un flusso in uscita dal bilancio idrologico, è il fenomeno di scorrimento dell'acqua di precipitazione sulla superficie del suolo e si verifica nel momento in cui le precipitazioni eccedono la capacità del suolo di drenare l'acqua per infiltrazione. Il tipo di suolo dell'area di studio ha una tessitura di tipo sabbioso e sabbioso argilloso, questi tipi di suoli sono caratterizzati da una porosità medio-alta che li rende molto porosi e conferisce loro un'alta capacità di drenaggio (Brady & Weil, 2016; McLaughlin & Wimmer, 2017). Le caratteristiche di questi tipi di suoli, insieme al clima, e alla presenza di un gradiente topografico contenuto, rendono il ruscellamento superficiale una componente trascurabile del bilancio idrologico, infatti, la maggior parte delle precipitazioni tende ad infiltrare nel suolo. Soltanto durante gli eventi piovosi più intensi l'acqua forma ristagni superficiali, che però in breve tempo vanno incontro ad infiltrazione o ad evaporazione per le alte temperature. Successivamente, l'acqua che per percolazione ha ricaricato la falda, può contribuire mediante deflusso di base alla portata del fiume (Poeter et al., 2020). Per questi motivi ruscellamento e percolazione profonda sono stati considerati come un'unica variabile all'interno del bilancio idrologico.

L'evapotraspirazione costituisce un flusso in uscita dal bilancio idrologico ed è il processo attraverso il quale l'acqua presente nel suolo, nelle piante e sulla superficie terrestre viene trasformata in vapore acqueo e rilasciata nell'atmosfera. Questo processo, influenzato da diversi fattori che includono clima, vegetazione e umidità del suolo, comprende due componenti principali: l'evaporazione e la traspirazione operata dalle piante. L'evapotraspirazione potenziale corrisponde al quantitativo di acqua che andrebbe incontro ad evapotraspirazione in un ambiente in condizioni ottimali di umidità,

in assenza di limitazioni idriche di suolo e piante. Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale è stato utilizzato il metodo di Thornthwaite equazione (2.4), che restituisce valori mensili di ETP (Thornthwaite, 1948):

$$ETP = 16 \cdot \left(\frac{L}{12}\right) \cdot \left(\frac{N}{30}\right) \cdot \left(\frac{10T_m}{I}\right)^\alpha \quad (2.4)$$

dove:

- L: numero di ore di insolazione giornaliera [h];
- N: numero dei giorni del mese di riferimento;
- T_m : temperatura media mensile dell'aria [°C];
- $\alpha = (6.75 \cdot 10^{-7}) \cdot I^3 - (7.71 \cdot 10^{-5}) \cdot I^2 + (1.792 \cdot 10^{-2}) \cdot I + 0.49239$
- I: indice calorico annuo in funzione della temperatura media mensile secondo la seguente equazione (2.5):

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_{mi}}{5}\right)^{1.514} \quad (2.5)$$

Questo metodo utilizza i dati di temperatura media mensile dell'aria come indice di energia disponibile per l'ETP assumendo che questa energia sia suddivisa in porzioni fisse tra riscaldamento dell'atmosfera ed ETP. Oltre ai dati di temperatura il metodo considera il numero medio di ore di insolazione giornaliera, che dipende dalla latitudine, il numero di giorni del mese di riferimento e l'indice calorico annuo, che è in funzione della temperatura media mensile (Allen et al., 2010; Thornthwaite, 1948).

L'evapotraspirazione reale (ETR), a differenza di quella potenziale rappresenta l'effettiva quantità di acqua persa per evapotraspirazione. Il metodo di Turc per il calcolo dell'ETR reale non si adatta al clima tropicale semi-arido caratterizzato da due stagionalità così diverse in termini di precipitazione (Goutorbe & Mahé, 1996); i risultati, infatti, sovrastimavano i valori di ET restituendo valori uguali a quelli delle precipitazioni oppure superiori (Diouf et al., 2016; Ndehedehe et al., 2018). Quindi si è deciso di assumere $ETR = ETP$ calcolata con la formula di Thornthwaite nei mesi in cui $P > ETP$, e $ETR = P - DP$ nei mesi in cui $P < ETP$.

4. RISULTATI E DISCUSSIONE

4.1. DATABASE GIS

La Tabella 2 illustra la struttura del database. Questo contiene 192 file suddivisi in 11 cartelle, ogni file contiene informazioni georeferenziate, che sono state inserite all'interno di un progetto con il software QGIS.

Tabella 2. Struttura e contenuti del database

Cartella	File	Formato	Copertura	Fonte	Elaborazione	Note o descrizione
Idrogeologia	Spessore acquifero superficiale	Raster	Scala regionale	(DGPRES, 2018)	Georeferenziazione	-
	Basamento acquifero superficiale	Raster	Scala regionale	(DGPRES, 2018)	Georeferenziazione	-
	Senegal Hydrogeology	Vettoriale	Scala di continente	British Geological Survey, Africa Groundwater Atlas country hydrogeology maps (Version 1.0, 2019)	-	-
	Curve di livello (1.5 m e 10 m) spessore acquifero superficiale	Vettoriale	Scala locale dell'area monitorata	(DGPRES, 2018)	Digitalizzazione da raster	-
	Isobate (10 m) basamento acquifero	Vettoriale	Scala locale dell'area monitorata	(DGPRES, 2018)	Digitalizzazione da raster	
	Permeabilità	Vettoriale	Scala di bacino	Fornito da autorità senegalesi	-	Fonte incerta copertura parziale del bacino
Suolo	Agglomerati; aree protette, superfici boscate e superfici coltivate	Vettoriale	Scala di bacino	Fornito da autorità senegalesi	Correzione da immagini satellitari di Google Earth 2022	-
	ESA CCI Land cover	Raster	Scala globale	ESA. Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep. (2017)	-	10 classi di land use
	Uso del suolo riclassificata	Raster	Scala di bacino	ESA. Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep. (2017)	Riclassificazione da raster ESA CCI Land cover	4 classi di land use
	HYSOGs250m	Raster	Scala globale	(Ross et al., 2018)	-	-
	HSGS vettorializzato	Vettoriale	Scala di bacino	(Ross et al., 2018)	digitalizzazione	-

Cartella	File	Formato	Copertura	Fonte	Elaborazione	Note o descrizione
	Curve number	Raster; Vettoriale	Scala di bacino	NASA hydrologic Soil Group 250m grid; ESA. Land Cover CCI Product User Guide Version 2. Tech. Rep. (2017)	Calcolato sulla base di Hydrologic soil group e Land use	Parametro adimensionale che caratterizza il deflusso del bacino idrografico
	Suoli dominanti	Vettoriale	Scala regionale	(http://www.isotc211.org/2005/gmd)	-	-
Monitoraggio	Monitoraggio giugno e ottobre acque superficiali	Vettoriale	Scala locale dei villaggi	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	-	-
	Monitoraggio giugno e ottobre acque sotterranee	Vettoriale	Scala locale dei villaggi	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	-	-
	Posizione dei pozzi monitorati	Vettoriale	Scala locale dei villaggi	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	-	-
	Soggiacenza giugno ed ottobre 2022	Raster	Scala Locale dell'area monitorata	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	Interpolazione IGW	-
	Differenza soggiacenza ottobre e giugno 2022	Raster	Scala Locale dell'area monitorata	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	Calcolatore di raster	-
	TDS giugno	Raster	Scala Locale dell'area monitorata	Acquisizione in campo giugno 2022	Interpolazione IGW	-
	TDS ottobre tavola d'acqua	Raster	Scala Locale dell'area monitorata	Acquisizione in campo ottobre 2022	Interpolazione IGW	Valori misurati alla tavola d'acqua
	TDS acque sotterranee 0 m a.s.l.	Raster	Scala locale dei villaggi	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	Interpolazione IGW	-
	TDS acque sotterranee 5 m a.s.l.	Raster	Scala locale dei villaggi	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	Interpolazione IGW	-

Cartella	File	Formato	Copertura	Fonte	Elaborazione	Note o descrizione
	Fotografie	Raster	Scala locale dei villaggi e dei barrage	Acquisizione in campo giugno e ottobre 2022	Link ai dati geografici	Foto scattate durante le attività di monitoraggio e collegate al geodatabase per visualizzazione delle diverse località
Fotogrammetria UAV	DTM kabakoto, Roukane e Ndiao Bambaly	Raster	Scala locale dei barrage (Kabakoto; Ndiao Bambaly; Roukane)	Acquisizione in campo ottobre 2022	Elaborazione con software Pix4D e CloudCompare	-
	Curve di livello 1m Kabakoto, Ndiao Bambaly, Roukane	Vettoriale	Scala locale dei barrage (Kabakoto; Ndiao Bambaly; Roukane)	Acquisizione in campo ottobre 2022	Estrapolazione da raster	-
	Raster	Scala locale (barrages di Ndiao Bambaly; Roukane; Kabakoto)	Acquisizione in campo ottobre 2022	Mosaicatura	Risoluzione dei pixel di 0.1 m	Ortofoto Ndiao Bambaly Barrage; Transetto; Big link
	Curve di livello Ndiao Bambaly 0.5 m	Vettoriale	Scala locale del barrage Ndiao Bambaly	Acquisizione in campo giugno 2022	Estrapolazione da raster	-
Geologia	Morfologia	Vettoriale	Scala regionale	(http://www.isotc211.org/2005/gmd)	-	Info su pianura, altopiano, fondovalle, acque interne
	Geologia	Vettoriale	Scala regionale	(http://www.isotc211.org/2005/gmd)	-	
Idrografia	Bacino idrografico	Vettoriale	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione con software ArcMap	-

Cartella	File	Formato	Copertura	Fonte	Elaborazione	Note o descrizione
	Fiume Bao Bolong	Vettoriale	Scala di bacino	Google Earth 2022	Digitalizzazione	-
	Reticolo idrografico	Vettoriale	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione con software HEC-HMS	-
	Estensione fiume stagione delle piogge	Vettoriale	Scala di bacino	Google Earth 2022	Digitalizzazione	Immagini satellitari di novembre 2018
	Pendenza bacino idrografico	Raster	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione SRTM con software HEC-HMS	-
	Direzione di drenaggio bacino idrografico	Raster	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione SRTM con software HEC-HMS	-
	Sottobacini	Vettoriale	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione SRTM con software HEC-HMS	-
	Estensione fiume stagione secca	Vettoriale	Scala di bacino	Google Earth 2022	Digitalizzazione	Immagini satellitari di maggio 2021
	Sottobacini	Vettoriale	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Elaborazione con software HEC-HMS	-
Infrastrutture di trasporto	Ferrovie	Vettoriale	Scala regionale	Fornito da autorità senegalesi	-	File utili alla pianificazione dei monitoraggi
	Strade; strade nazionali, regionali, dipartimentali asfaltate e non	Vettoriale	Scala regionale	Fornito da autorità senegalesi	-	
Limiti amministrativi	Regione; dipartimento, circoscrizione, comune, villaggi	Vettoriale	Scala nazionale	Fornito da autorità senegalesi	-	File utili alla pianificazione dei monitoraggi

Cartella	File	Formato	Copertura	Fonte	Elaborazione	Note o descrizione
	Estensione villaggi	Vettoriale	Scala di bacino	Fornito da autorità senegalesi	-	
Satellite	Google satellite_5m	Raster	Scala Regionale	(Google Satellite, 2022)	-	Risoluzione dei pixel di 5 m
SRTM	SRTM	Raster	Scala globale e di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	-	-
	Curve di livello (10 m)	Vettoriale	Scala di bacino	NASA Shuttle Radar Topography Mission	Estrazione curve di livello da SRTM	-

Di seguito vengono riportate solo alcune delle mappe create e utilizzate nelle diverse attività di tesi. Georeferenziando e digitalizzando le varie mappe cartacee fornite dal Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement (DGPRE, 2018) è stato possibile ricostruire lo spessore dell'acquifero freatico della valle del Bao Bolong (Figura 17).

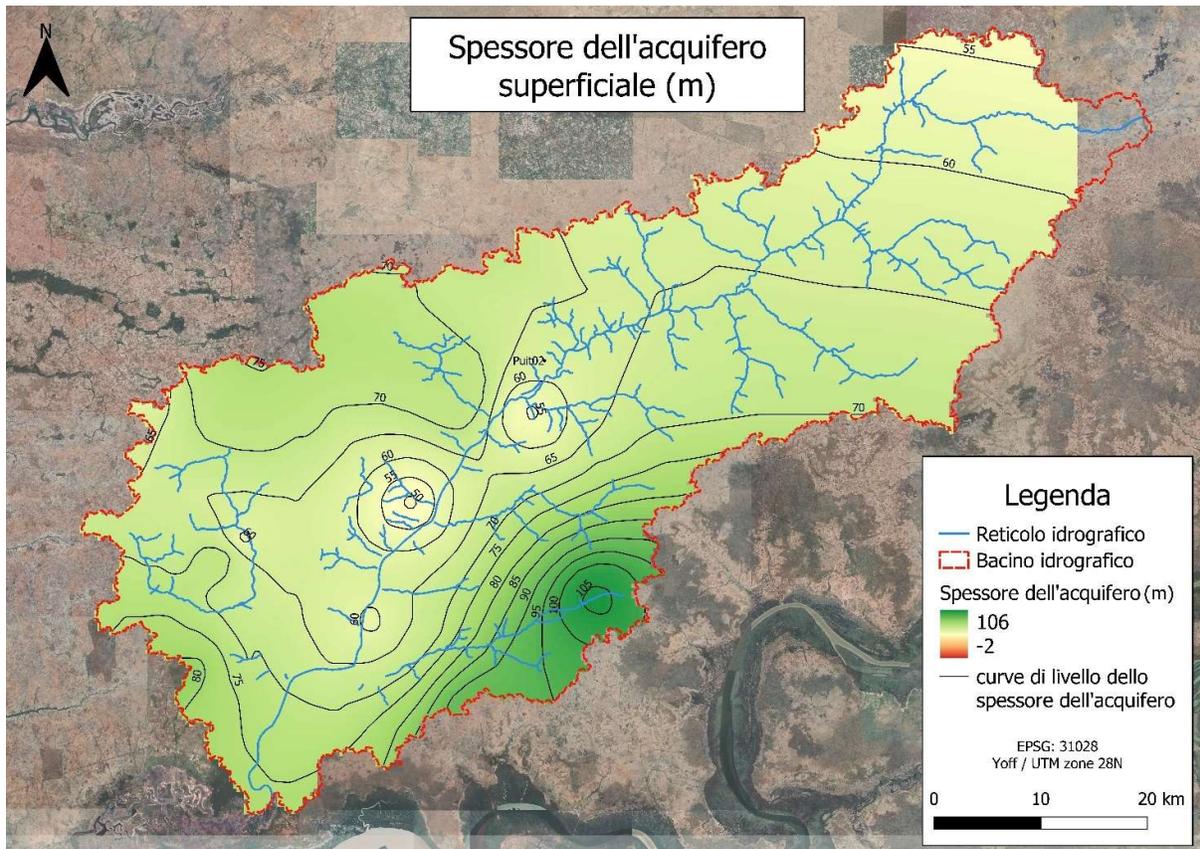


Figura 17. Spessore dell'acquifero superficiale

Dall'immagine si può notare che lo spessore dell'acquifero all'interno dell'area di studio è compreso tra 49 e 106 m, con un progressivo ispessimento nella zona sud-est del bacino idrografico, dove si osservano i valori massimi. Nella zona in cui sono stati effettuati i monitoraggi, lo spessore dell'acquifero è inferiore a 70 m, ad eccezione della parte nord-ovest, in cui comunque resta al di sotto dei 75 m di spessore. Sempre nell'area di studio si trovano i valori di spessore minimi del bacino, che corrispondono a 49 m.

Lo spessore dell'acquifero è un dato fondamentale per la gestione delle risorse idriche sotterranee, per la valutazione della potenzialità del loro utilizzo e per la valutazione dell'impatto antropico sulle risorse (Todd & Mays, 2005). Inoltre, dato che il fiume Bao Bolong è soggetto a risalita di acqua di

mare dal fiume Gambia, conoscere lo spessore dell'acquifero risulta fondamentale per la valutazione dell'entità della salinizzazione dello stesso.

La Figura 18 mostra la riclassificazione dell'uso del suolo corretta sulla base delle immagini satellitari del 2022 di Google grazie alle quali è stato possibile aggiornare e integrare le informazioni che non erano presenti nelle mappe fornite dall'Inspection des Eaux et Forêts – IREF (per esempio le aree boscate). In base a questi dati le superfici coltivate ricoprono un'area di 2597 km², l'84.9% dell'area del bacino idrografico del Bao Bolong, le superfici boscate occupano 325 km², il 10.6% dell'area del bacino, le aree protette occupano il 3.4% della superficie del bacino, con un'estensione di 105 km², mentre gli agglomerati, costituiti per lo più da villaggi rurali, costituiscono la categoria con la superficie minore, di 2.4 km², ossia 0.08% della superficie del bacino. Secondo Muller et al., 2018, la conoscenza dell'uso del suolo è importante per la definizione di politiche di protezione e conservazione dell'ambiente, per la gestione delle risorse idriche e dei disastri naturali, infatti, cambiamenti nell'uso del suolo sono spesso associati a cambiamenti nell'idrologia in termini sia quantitativi che qualitativi.

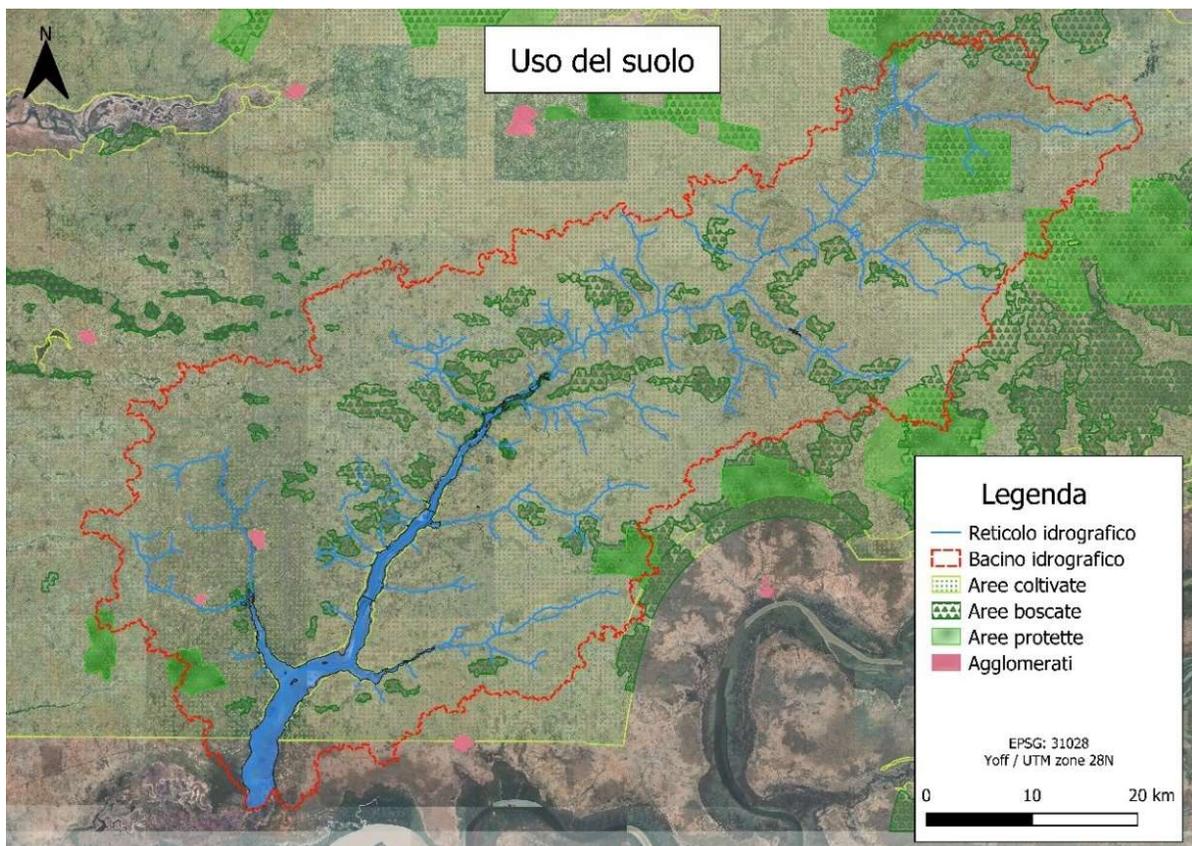


Figura 18. Uso del suolo

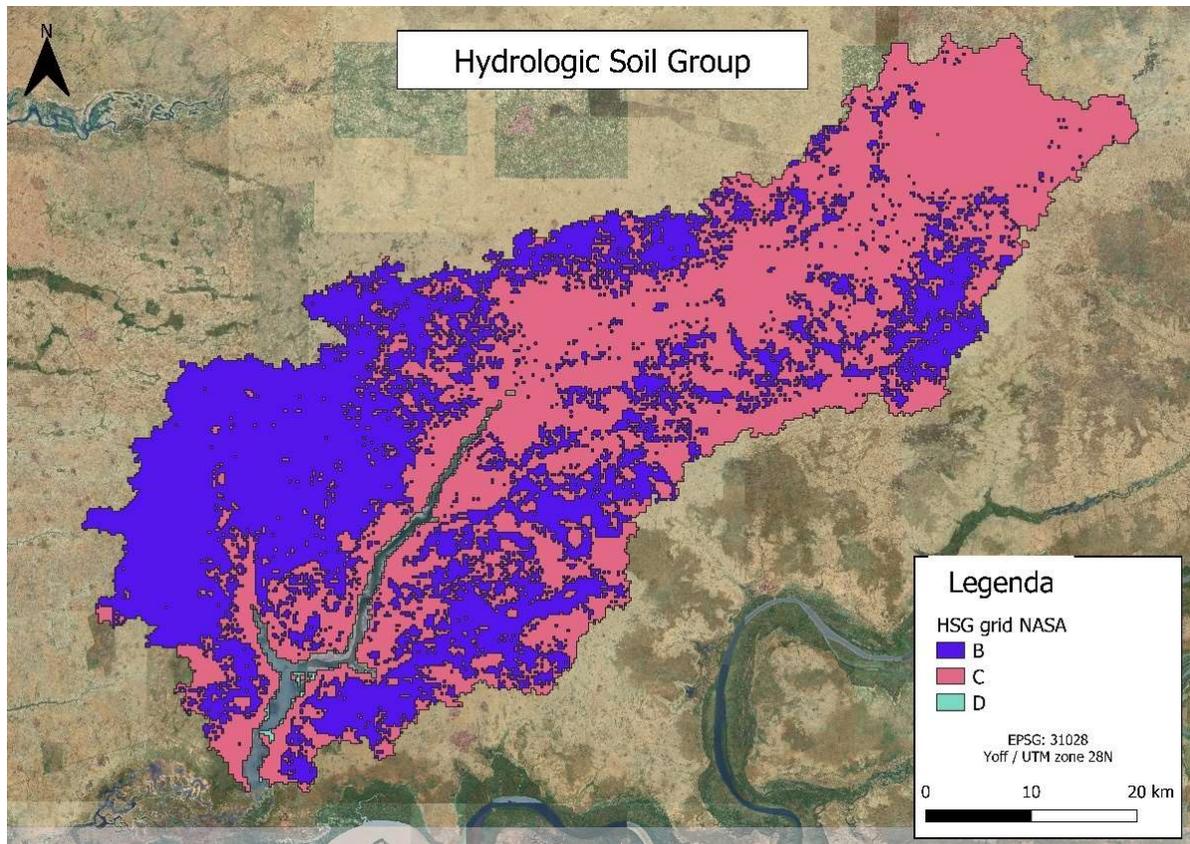


Figura 19. Hydrologic Soil Group NASA

Per le proprietà idrologiche dei suoli si sono utilizzati i dati di *hydrologic soil group* (HSG) della NASA (Figura 19). Per hydrologic soil group si intende una classificazione dei suoli in base al loro comportamento idrologico entro quattro categorie (A, B, C e D) che viene definita a partire da dati di precipitazione, ruscellamento ed infiltrazione. Al gruppo A appartengono i suoli con una tessitura formata da più del 90% di sabbia o ghiaia, che ne determina un basso potenziale di ruscellamento. In questa classe di suoli l'acqua di precipitazione presenta un'alta tendenza all'infiltrazione. Il gruppo B include i suoli con un potenziale di ruscellamento moderatamente basso quando sono prossimi a saturazione d'acqua, questi suoli sono caratterizzati da una tessitura con percentuali di argilla comprese tra il 10-20% e di sabbia comprese tra il 50-90%. I suoli del gruppo C, invece, hanno un potenziale di ruscellamento moderatamente alto quando si trovano a saturazione, questi sono composti da 20-40% di argilla e meno del 50% di sabbia. Nel gruppo D si hanno quei suoli con un alto potenziale di ruscellamento quando sono saturi, sono caratterizzati da tessiture argillose con percentuali di argilla maggiori del 40% e di sabbia minori del 50% (Mockus et al., 2007). Nella valle del Bao Bolong i suoli sono classificati quasi esclusivamente all'interno delle categorie B e C, infatti la copertura della classe C è di 1581 km², il 52% della superficie, quella della classe B corrisponde al 45 % della superficie, mentre la classe D è presente solamente in alcune aree, di dimensioni limitate,

che complessivamente costituiscono il 3% della superficie e si trovano in aree contigue all'alveo fluviale. La classe A, invece, è del tutto assente all'interno del bacino idrografico.

Dai risultati di analisi di distribuzione degli Hydrologic soil group si evince che all'interno del bacino una notevole porzione delle precipitazioni va incontro a infiltrazione, specialmente nelle aree che appartengono al gruppo idrogeologico B. Le aree che rientrano nel gruppo idrogeologico C, avendo percentuali di argilla superiori, tendono ad avere un potenziale di ruscellamento maggiore rispetto a quelle del gruppo B quando si trovano a saturazione d'acqua, essendo le precipitazioni distribuite nell'arco dei mesi tra giugno ed ottobre, l'eventualità che i suoli siano saturi d'acqua si può verificare soltanto in questo periodo. Per valutare questo aspetto si è ritenuto opportuno condurre un monitoraggio dei livelli della falda acquifera a fine della stagione delle piogge per valutare la soggiacenza e la condizione di saturazione.

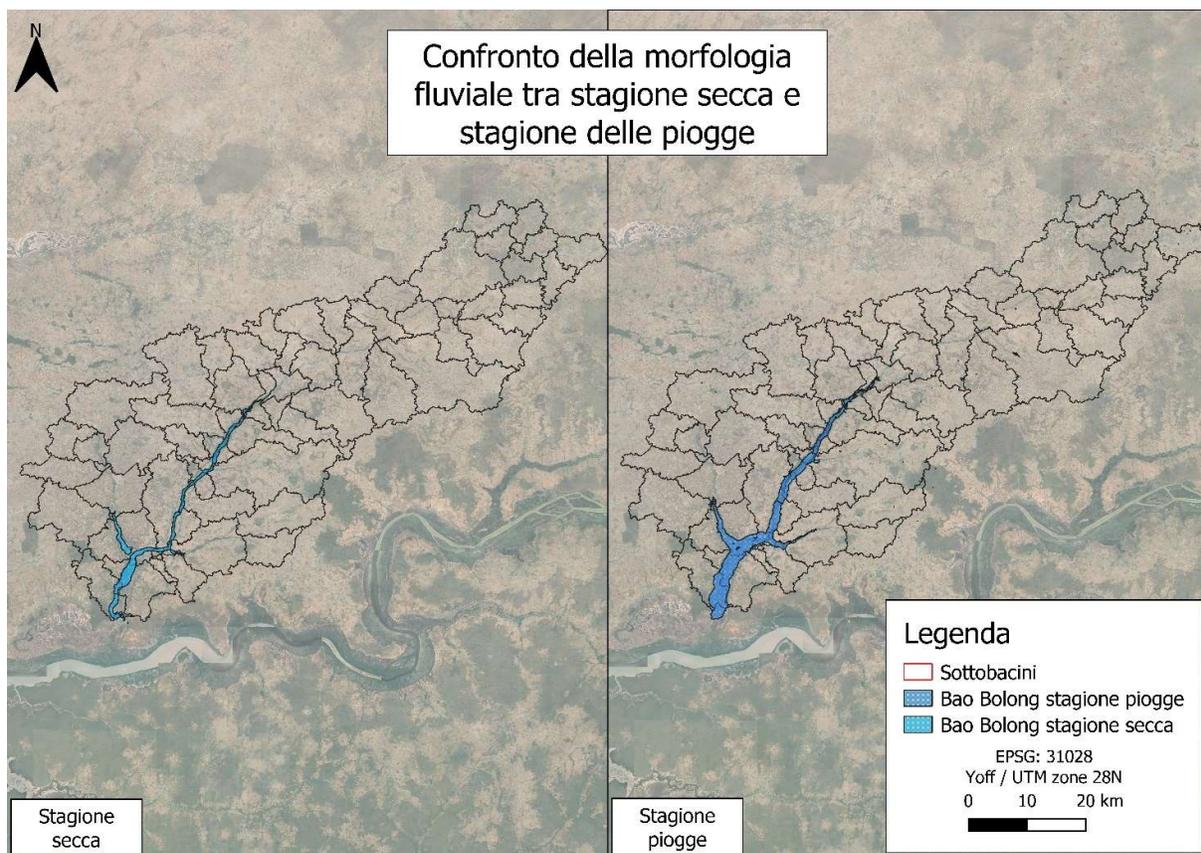


Figura 20. Confronto tra Bao Bolong nella stagione arida e nella stagione delle piogge

La Figura 20 mostra la larghezza dell'alveo del fiume Bao Bolong durante la stagione delle piogge e la stagione secca. Da questa immagine è possibile osservare notevoli differenze nella larghezza del fiume tra le due stagioni. Nella stagione secca la sezione fluviale, misurata nel punto di chiusura del bacino, ha una larghezza che si aggira attorno a 260 m, mentre nella stagione delle piogge il fiume,

nella stessa sezione fluviale supera i 2.470 m di larghezza. Dall'immagine è possibile notare anche la presenza di tratti ed affluenti effimeri del Bao Bolong, che rimangono asciutti durante la stagione arida, come l'affluente che si trova sulla sponda sinistra del fiume, nella parte sud del bacino idrografico. In Figura 20 è riportata anche la delimitazione dei sottobacini della valle, ottenuta come risultato di un processo di analisi con il software HEC-HMS, che è in grado di definire la suddivisione in sottobacini idrografici a partire dal DEM dell'area. Da questa analisi sono emersi in totale 66 sottobacini, che in media hanno una estensione di 46.2 km², il sottobacino con dimensioni maggiori ha un'area di 104 km².

4.2. RILIEVI TOPOGRAFICI

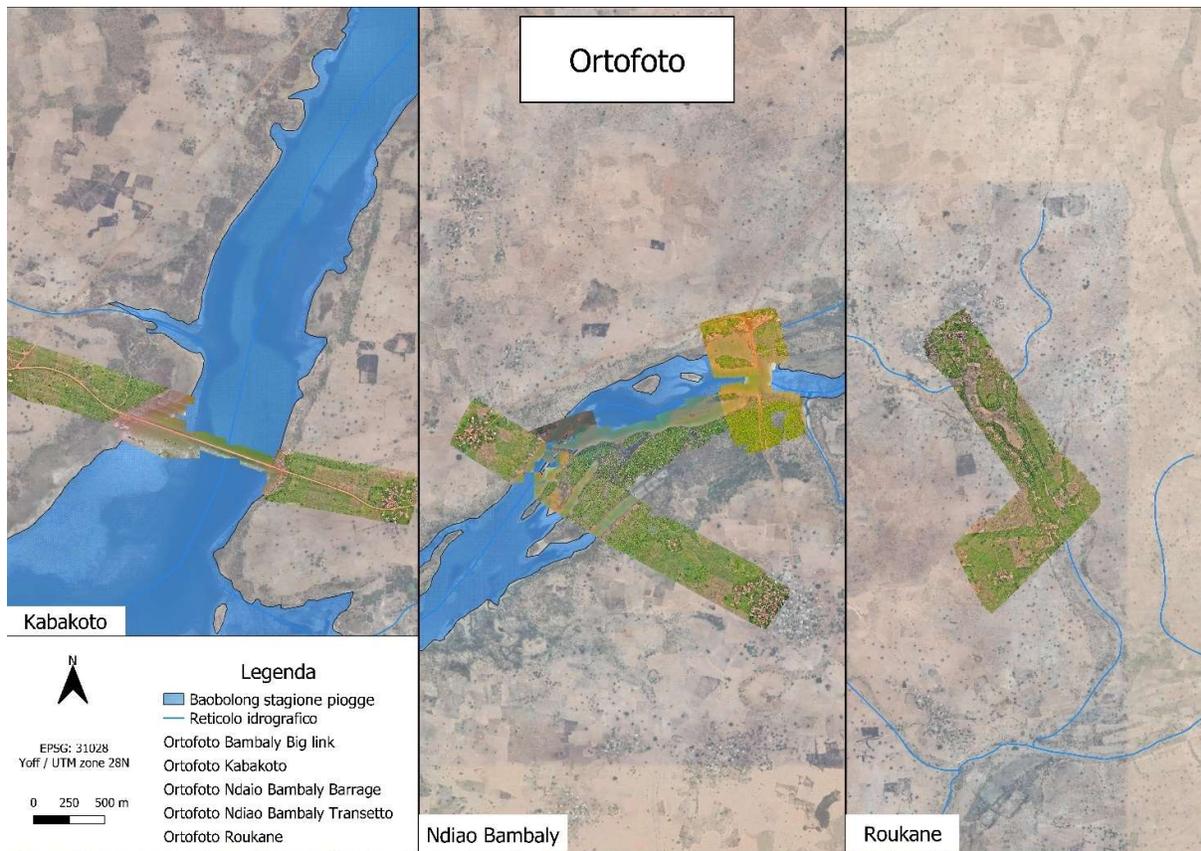


Figura 21. Ortofoto rilievi UAV

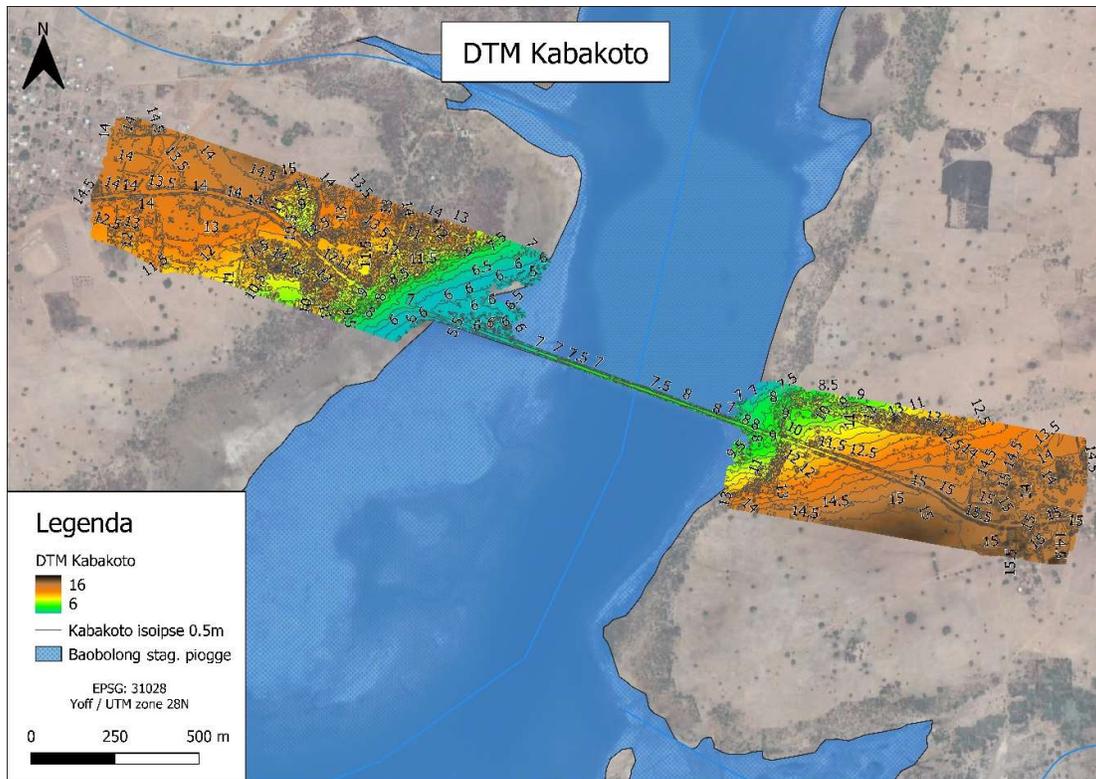


Figura 22. DTM Kabakoto

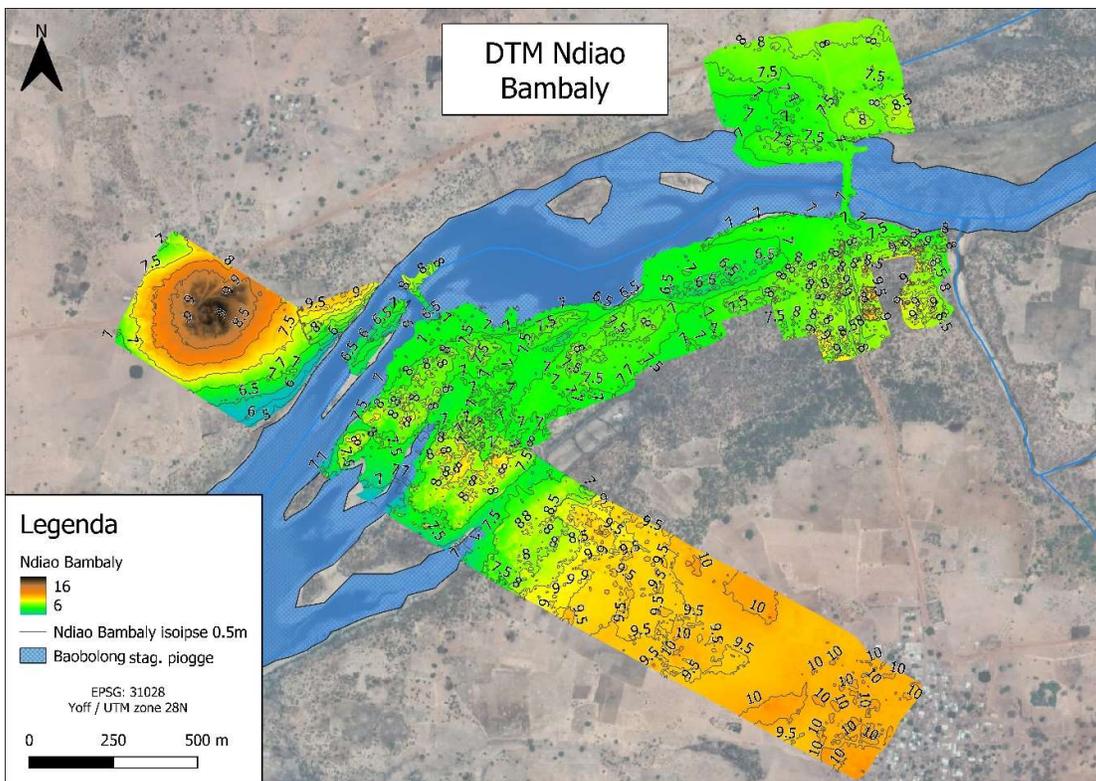


Figura 23. DTM Ndiao Bambaly

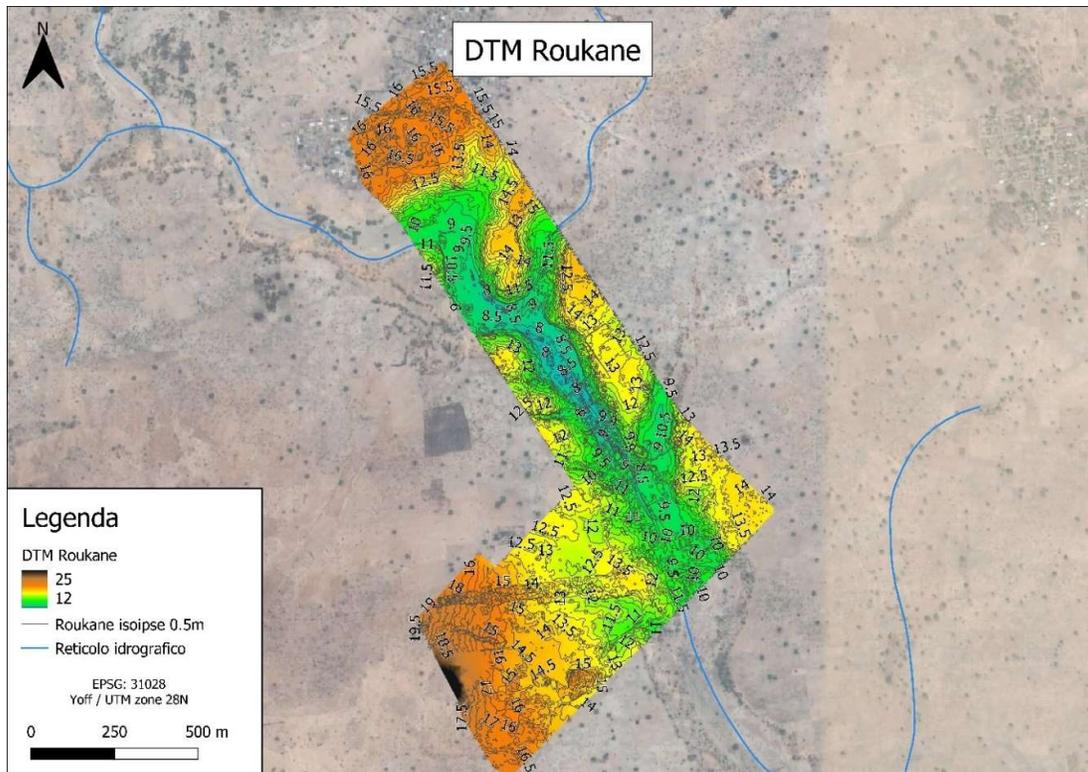


Figura 24. DTM Roukane

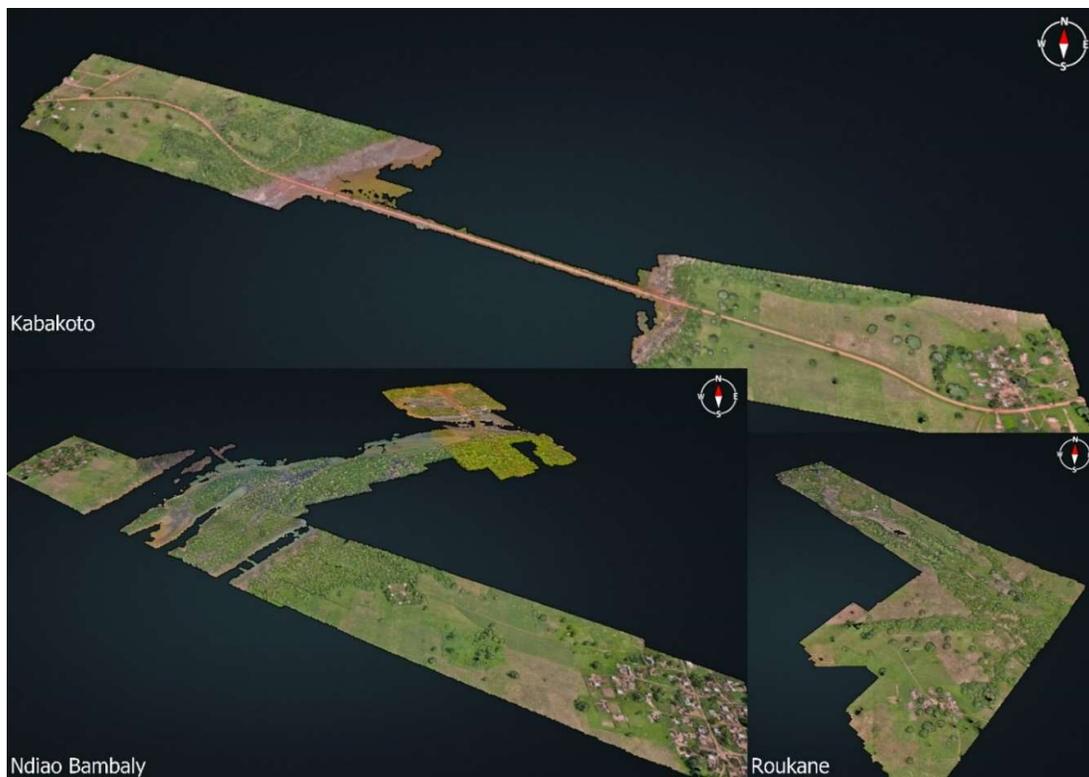


Figura 25. Modelli 3D

Tabella 3. Dati del quality report di Pix4D

	Area [km ²]	Numero immagini geolocalizzate	Errore di riproiezione medio dei [pixels]	Accuratezza media della geolocalizzazione [m]			RMS error [m]		
				X	Y	Z	X	Y	Z
Ndiao Bambaly	2023	5618	0.109	1.12	1.12	2.25	0.71	0.84	1.71
Kabakoto	0.994	1542	0.110	0.96	0.96	2.40	0.94	0.60	2.03
Roukane	1020	3029	0.096	1.19	1.19	2.49	0.44	0.44	0.81

Le Figure da 21 a 24 mostrano rispettivamente le ortofoto e i DTM ottenuti a partire dai rilievi UAV.

Dal DTM di Kabakoto (Figura 22) è possibile notare che le quote nell'area del rilievo vanno da valori massimi di 15.5 m a.s.l., che si trovano nelle aree più distanti dall'alveo fluviale, fino ai valori minimi di 5 m a.s.l. che si trovano in corrispondenza delle sponde del fiume, la striscia del DTM che interseca il fiume, che ha una quota media di 7.5 m a.s.l., superiore rispetto alle quote delle sponde del fiume, costituisce il barrage di Kabakoto. Nel DTM di Ndiao Bambaly (Figura 23), analogamente a quello di Kabakoto, le quote minime raggiunte sono di 5 m a.s.l. in prossimità del fiume, mentre le quote massime crescono progressivamente allontanandosi dal fiume, raggiungendo una quota massima di 16 m a.s.l. nella parte a sud-ovest del DTM, dove è possibile osservare un aumento di quota di 11 m a soli 260 m di distanza dalla riva destra del fiume. Il DTM Roukane (Figura 24) a differenza degli altri due non è stato costruito sul fiume Bao Bolong, ma su uno dei principali affluenti, la zona rilevata si trova più a nord ed ha quote maggiori rispetto a quelle degli altri due DTM. La quota minima rilevata nel DTM di Roukane è di 8 m a.s.l., si trova nella parte centrale del rilievo in prossimità del corso d'acqua, mentre la quota massima di questo DTM è di 28 m a.s.l. e si trova nella parte a sud-ovest dell'area, quindi si rileva una differenza tra la quota massima e la minima di 20 m, circa il doppio rispetto a quelle degli altri due rilievi, che corrispondono a 10.5 m a Kabakoto e 11 m a Ndiao Bambaly. A Roukane, la differenza di quote e la morfologia, hanno permesso la costruzione di un barrage che durante il periodo delle piogge raccoglie l'acqua piovana, creando un vero e proprio bacino superficiale che costituisce una risorsa idrica locale per almeno due mesi durante la stagione arida.

I dati riportati in Tabella 3 sono provengono dai quality report generati da Pix4D durante il processamento dei dati relativi ai rilievi UAV di ottobre 2022. Il RMSE sugli assi X e Y rimane al di sotto del metro per tutti e tre i modelli, per quanto riguarda l'asse Z, in Ndiao Bambaly e Kabakoto, si hanno valori di RMSE che superano il metro, e che sono rispettivamente 1.71 m e 2.03 m. Questi

risultati sono decisamente migliori rispetto a quelli del SRTM in banda X, che secondo Mukul et al., 2015, sul continente africano, ha un RMSE di 7 m. Confrontando la dimensione dei pixel dei modelli creati con i rilievi UAV (DTM, DSM e ortofoto) con il DEM SRTM, risulta che tutti i modelli costruiti con i rilievi UAV siano formati da pixel di 0.5 m, mentre i pixel del SRTM in banda X hanno pixel di circa 30 m (Mukul et al., 2015).

4.3. MONITORAGGIO ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE

Il fiume Gambia è soggetto ad un ciclo tidale semidiurno, caratterizzato da 2 alte maree e due basse maree con regime mesotidale, con escursioni di marea di 2-3 m, che a causa della topografia del fiume subisce l'intrusione di acqua salata dall'Oceano Atlantico (M'koumfa et al., 2018).

L'area di studio è soggetta alla risalita di acqua salata dal fiume Gambia, che risale lungo il suo immissario Bao Bolong, il cui gradiente topografico è riportato in Figura 26. Le quote massime raggiunte nella parte più a nord del bacino si attestano circa a 35 m a.s.l., mentre nel punto di chiusura del bacino idrografico il fiume si trova attorno a quote di circa 5 m a.s.l., considerando la lunghezza del fiume di 133 km il gradiente topografico in percentuale è di 0.023%. Il gradiente topografico è uno dei motivi per cui le onde di marea spingono l'acqua salata a risalire lungo in fiume Bao Bolong (Faye et al., 2018).

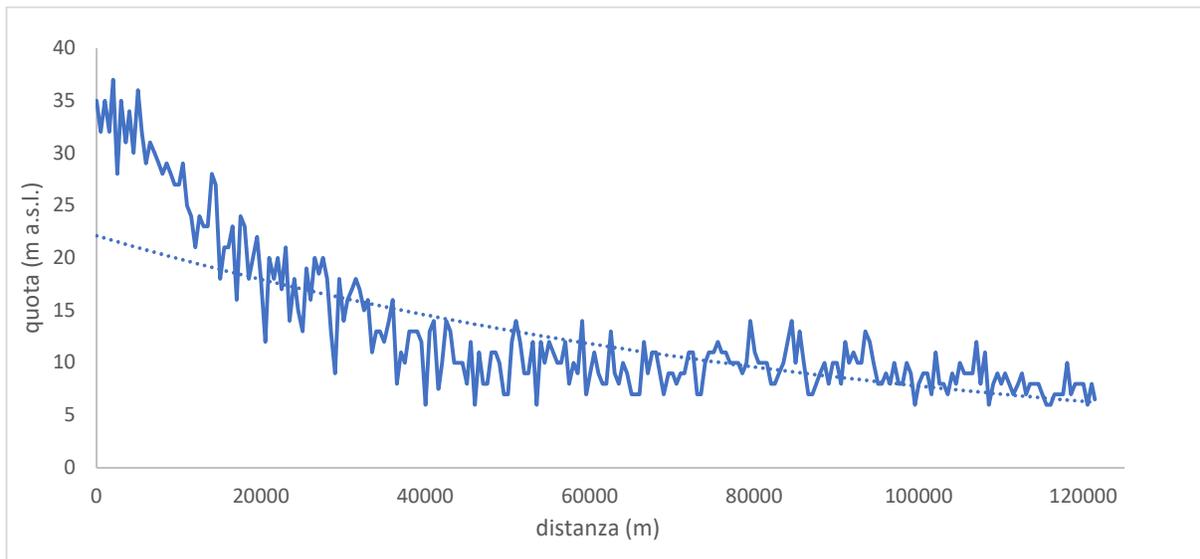


Figura 26. Gradiente topografico Bao Bolong, dalla sorgente alla sezione di chiusura del bacino idrografico, ricostruito a partire dal SRTM

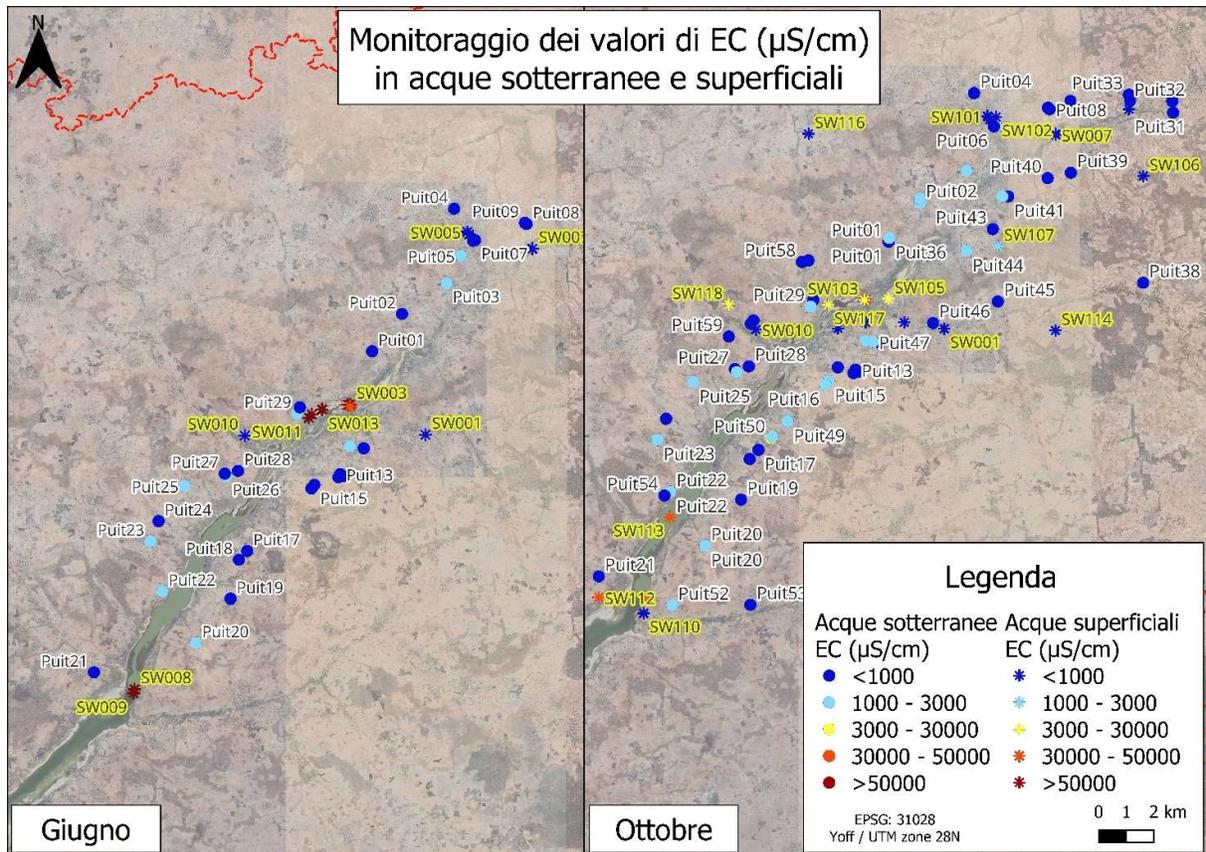


Figura 27. Valori di conduttività elettrica (EC in $\mu\text{S}/\text{cm}$) nelle acque superficiali e sotterranee

I dati raccolti durante le campagne di monitoraggio di giugno 2022 e ottobre 2022 delle acque superficiali e sotterranee sono mostrati in Figura 27 classificati in base alla Tabella 1.

Il monitoraggio delle acque superficiali in giugno mostra la presenza di acque con salinità maggiore o uguale all'acqua di mare, con EC a 25°C >50000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nei monitoraggi di giugno mostrati in Figura 27, tra le misurazioni effettuate sulle acque del fiume, i punti SW002, SW003 e SW004 avevano valori di EC a 25°C rispettivamente di 55000, 60000 e 49000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mentre i punti SW011, SW012 e SW013, avevano tutti valori di EC a 25°C pari a 70000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, fino a raggiungere i valori massimi presso il barrage di Kabakoto, in cui nei punti SW008 e SW009 sono stati registrati valori rispettivamente di 91000 e 92000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In media i valori di EC a 25°C delle acque superficiali di giugno hanno un valore di 42885 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valore prossimo alla salinità del mare, che è influenzato dai valori di EC delle acque dolci misurate presso le località di Roukane, Miù e Keur Djibi, in cui i valori registrati sono tutti inferiori a 231 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Ad ottobre le acque superficiali risultano avere una salinità inferiore. Il valore di EC massimo registrato nelle acque superficiali durante la campagna di ottobre 2022 è di 34343 $\mu\text{S}/\text{cm}$, è stato

rilevato a Kabakoto, visibile nella parte sud della mappa in Figura 27. Il valore minimo è di 34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e il valore medio è di 11119 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nei monitoraggi di giugno delle acque sotterranee, sono state effettuate 30 misurazioni, da cui è emerso un valore medio di EC di 877 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valore minimo di 105 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e un massimo di 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, quindi è stata rilevata presenza soltanto di acque dolci all'interno della falda, 7 delle quali con valori di EC superiori a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ che le rendono non idonee al consumo umano, ma utilizzabili per l'irrigazione.

Nel monitoraggio di ottobre delle acque superficiali i punti monitorati sono stati 59, il valore medio di EC misurato nei pozzi a livello superficiale è di 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, che corrisponde con il limite che separa le acque dolci dalle acque meno dolci ma adatte a scopi irrigui (Tabella 1). Il valore massimo rinvenuto nel monitoraggio di ottobre è di 3222 $\mu\text{S}/\text{cm}$, che rientra tra le acque salmastre, mentre il valore minimo è di 128 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Nella Figura 28 sono mostrati i risultati di interpolazione dei valori di TDS registrati per le acque superficiali e sotterranee durante le campagne di giugno 2022 (a sinistra) e di ottobre 2022 (a destra), classificati con scala cromatica in base ai valori della Tabella 1. Nella campagna di giugno l'area di studio dei valori superficiali di TDS è di 191 km^2 , mentre per ottobre, avendo un maggior numero di punti di monitoraggio, l'area di studio è maggiore, con un'estensione di 275 km^2 .

Come precedentemente mostrato nella Figura 27, anche dai risultati di interpolazione dei valori di TDS rilevati a giugno emerge che il fiume ha una salinità maggiore o uguale a quella dell'acqua di mare, con valori superiori a 35000 mg/l . Questi valori di salinità sono dovuti all'aumento della concentrazione dei sali nell'acqua del fiume ad opera dell'evaporazione (alte temperature) ed alla mancanza del contributo di acqua dolce delle precipitazioni (ultime precipitazioni avvengono a inizio ottobre). Nel mese di ottobre, al termine della stagione delle piogge, il fiume risulta comunque salato nella zona più a sud dei monitoraggi, ma con un TDS inferiore a quello dell'acqua di mare ($19500 < \text{TDS} < 35000 \text{ mg}/\text{l}$), mentre spostandosi a nord, si ha una diminuzione di salinità, fino ad avere acque salmastre (1950-19500 mg/l) nella parte centrale e acque dolci (< 1950) nella parte nord dell'area di studio.

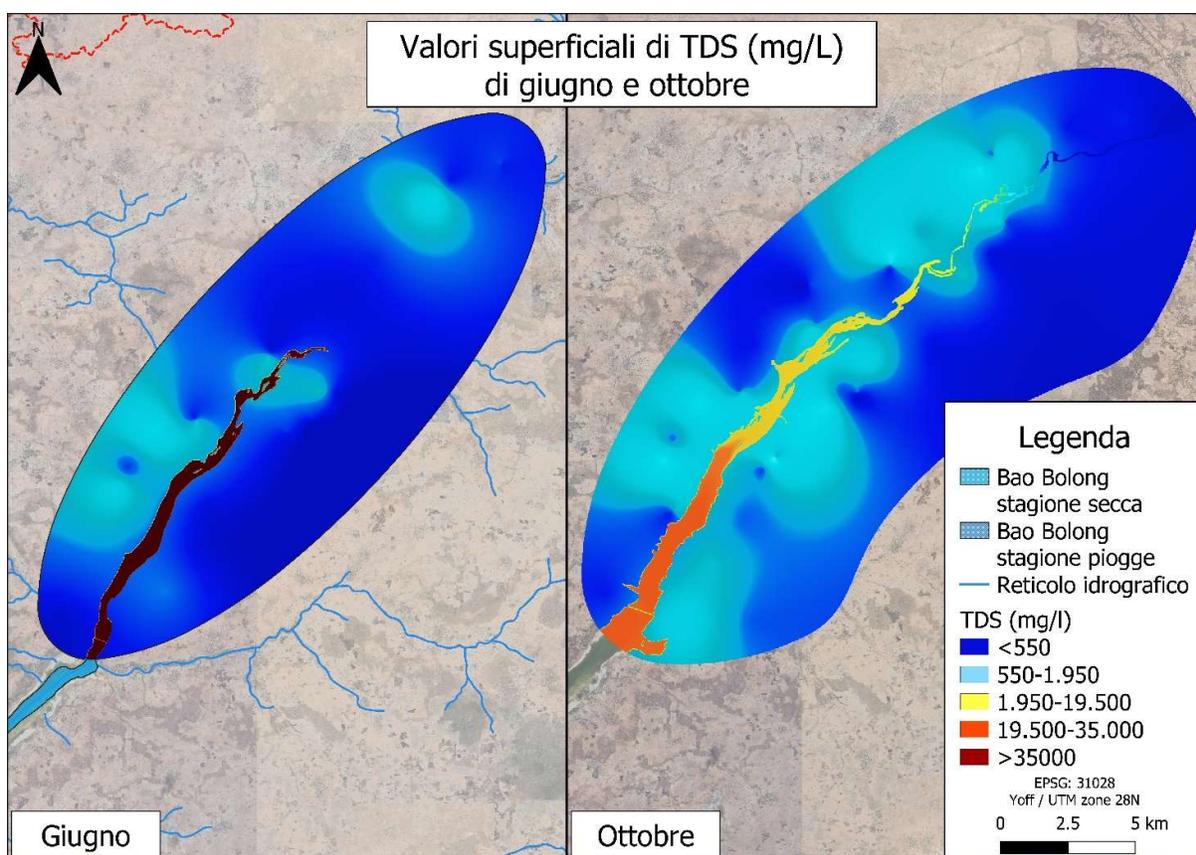


Figura 28. Confronto tra i valori di TDS (mg/l) della tavola d'acqua a giugno e ottobre 2022 e lungo il fiume

Confrontando le acque superficiali del fiume riportate all'interno delle due mappe in Figura 28 emerge una diminuzione di salinità tra giugno ed ottobre, attribuibile all'effetto di diluizione provocato dalle precipitazioni durante la stagione delle piogge e ad un aumento di portata del fiume che svolge un'azione di contrasto alla risalita dell'acqua di mare.

Per quanto riguarda le acque sotterranee nella mappa di giugno è possibile osservare, in gran parte dell'area di studio, valori di TDS inferiore a 550 mg/l. Sono presenti alcune aree, in cui le acque sotterranee tendono ad avere una salinità maggiore, che rientrano comunque all'interno delle acque dolci, ma nell'intervallo di TDS compreso tra 550 e 1950 mg/l. Queste aree in cui l'acqua risulta essere dolce, ma adatta per scopi irrigui, si trovano specialmente in prossimità del fiume, in particolare sulla sponda destra e nella parte più a nord dell'area monitorata.

Nella Figura 28, nel mese di ottobre, nonostante la falda presenti sia principalmente dolce, si nota un leggero aumento dell'area in cui sono presenti valori di TDS compresi nell'intervallo 550-1950 mg/l. In particolare, l'area in cui sono state rilevate acque appartenenti alla classe di TDS di 550-1950 mg/l a giugno corrisponde al 18% dell'area studiata, mentre ad ottobre tale area interessa il 41% dell'area

di studio di ottobre. Questi dati sono confermati dalle misurazioni effettuate in loco durante la campagna di ottobre, in cui è stato rilevato un valore medio di TDS nelle acque sotterranee pari a 650 mg/l, e in cui in un pozzo è stata riscontrata la presenza di acqua salmastra con un valore di 2094 mg/l, che costituisce il valore massimo rilevato nella falda a livello superficiale. A giugno, invece, il valore medio di TDS rilevato è di 437 mg/l, mentre il valore massimo è di 1290 mg/l.

Questo piccolo aumento è da imputare ai seguenti fattori:

- L'utilizzo di strumentazione diversa: a giugno le misurazioni sono state effettuate con un conducimetro vecchio, mentre ad ottobre è stata utilizzata una nuova sonda multiparametrica con un processo di calibrazione e di controllo della stabilizzazione del dato migliore.
- L'utilizzo di metodi di acquisizione delle misure diversi durante le due campagne: nella campagna di giugno le misurazioni sono state effettuate da un campione di acqua superficiale prelevato dal pozzo mediante un secchio, mentre ad ottobre la sonda è stata immersa direttamente all'interno dell'acqua dei pozzi.
- Durante la stagione secca si formano grandi depositi di sale sui suoli lungo tutto il corso del fiume a causa dell'evaporazione dell'acqua salata (Figura 29) che vengono dissolti durante il periodo delle piogge, quando le acque infiltrano e percolano nell'acquifero, contribuendo all'aumento della salinità della falda superficiale.
- La natura acida dell'acqua piovana che, a causa della presenza di acido carbonico formato dalla reazione tra anidride carbonica e acqua, è in grado di dissolvere i sali minerali presenti nel terreno (es. Ca, Mg, K) e trasportarli in soluzione con conseguente aumento della salinità che si rileva al pelo libero della falda (Baldantoni et al., 2007).



Figura 29. Foto aerea scattata a giugno 2022 presso il barrage Kabakoto in cui sono evidenti i depositi di sale sulle sponde

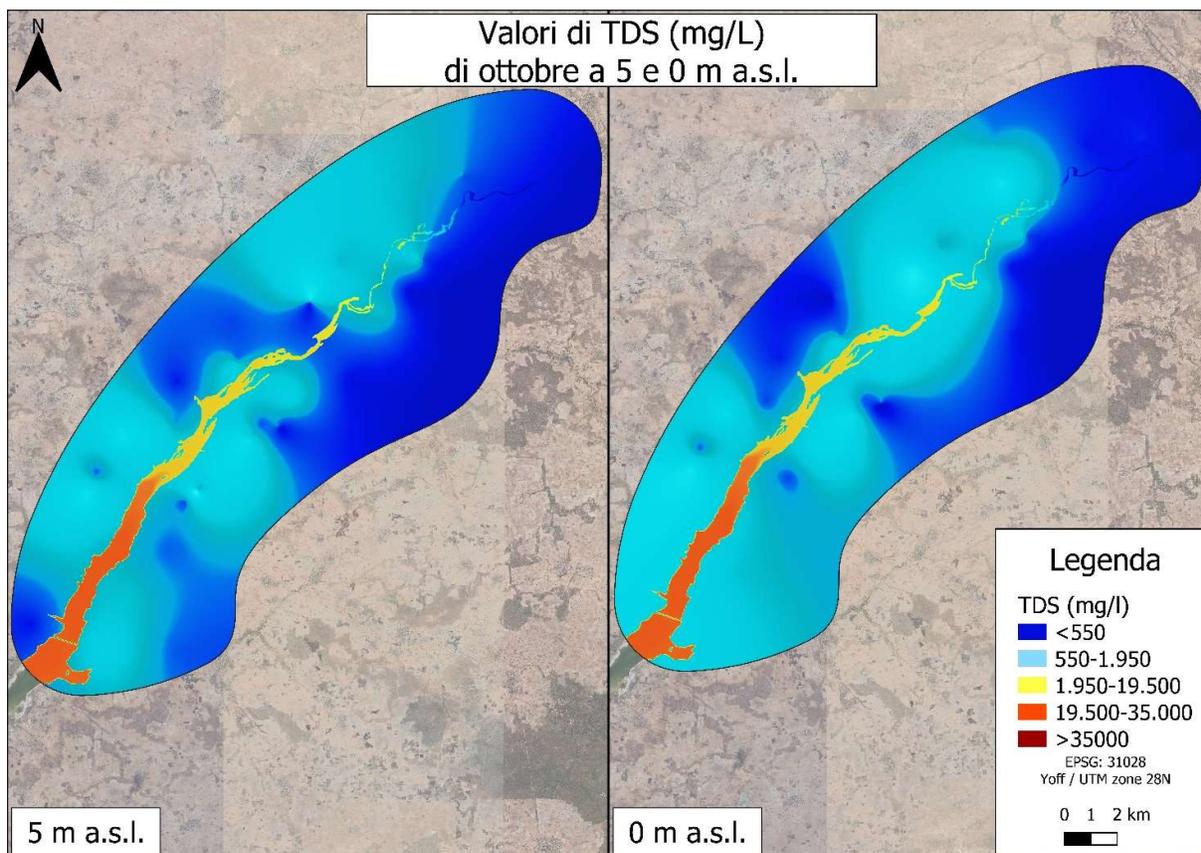


Figura 30. Confronto dei valori di TDS (mg/l) di ottobre a 5 e 0 m a.s.l. nelle acque sotterranee e lungo il fiume

Nella Figura 30 è riportata la distribuzione della salinità delle acque sotterranee a due quote diverse: 5 e 0 m a.s.l. Dall'immagine emerge che nella falda freatica, in corrispondenza di entrambe le quote l'acqua è dolce, seppur con proporzioni diverse tra l'estensione di acqua dolce con TDS <550 mg/l e quella con TDS compreso tra 550 e 1950 mg/l. In diverse aree, in cui nella mappa relativa alla salinità rilevata a 5 m a.s.l., si hanno valori di TDS minori di 550 mg/l (colore blu), nelle stesse posizioni, alla quota di 0 m a.s.l. è possibile osservare un aumento della salinità, che raggiunge valori compresi all'interno dell'intervallo 550 – 1950 mg/l (colore celeste), le maggiori differenze si possono osservare nella parte sud-ovest, nella parte sud-est e nella parte centrale dell'area di studio. Confrontando le superfici interessate da acqua con valori di TDS compresi tra 550 e 1950 mg/l, queste hanno estensioni inferiori per la quota di 5 m a.s.l. rispetto a quelle relative alla quota 0 a.s.l., infatti, a 5 m a.s.l. l'estensione di queste acque è di 125 km², mentre a 0 m a.s.l. è di 148 km², rispettivamente il 53% ed il 63% dell'area di studio della salinità.

Questi risultati sono spiegati dal fenomeno della stratificazione delle acque, dovuto alle diverse densità dell'acqua. La salinità è un parametro che, insieme alla temperatura, determina la densità dell'acqua, di conseguenza ne determina un fenomeno di stratificazione, che si verifica quando l'acqua con maggiore salinità, più densa, tende a depositarsi negli strati sottostanti rispetto all'acqua più dolce (Schmitt & Zindler, 2013).

Tabella 4. Statistica generale del monitoraggio delle acque sotterranee.

		Temperatura (°C)	EC °25C (µS/cm)	TDS (mg/l)	Quota SRTM (m a.s.l.)	Soggiacenza (m)	Quota falda (m a.s.l.)
GIUGNO	massimo	32.6	2500	1290	22.9	15.5	10.3
	minimo	28.9	105	50	8.0	3.2	-1.2
	media	30.5	897	447	14.0	9.7	4.3
	mediana	30.6	695	340	14.0	10.4	4.6
	deviazione std	0.7	675	347	2.9	3.2	2.9
OTTOBRE	massimo	33.6	3222	2094	22.9	22.7	13.6
	minimo	29.7	128	83	8.0	0.8	-1.1
	media	31.0	1000	650	14.4	7.1	7.3
	mediana	30.8	815	529	14.0	6.7	6.9
	deviazione std	0.8	719	467	3.2	3.8	3.3

Consultando i valori di EC e TDS mostrati in *Tabella 4*, è possibile notare che all'interno dei pozzi, in nessuno dei due monitoraggi è stata riscontrata la presenza di acqua salata. Il valore di TDS massimo misurato a giugno è di 1290 mg/l, che rientra nella categoria “acqua adatta all'irrigazione”

ed è stato misurato nel pozzo 25 a Keur Ndongo, mentre nel monitoraggio di ottobre è stata rinvenuta la presenza di acqua salmastra (TDS = 2094 mg/l) nel pozzo 49 presso la località di Ndimb Touba (Figura 27). Per quanto riguarda la temperatura delle acque sotterranee, dalla tabella emerge che a giugno si hanno valori minimi e massimi di 28.9 e 32.6°C, con un valore medio di 30.5°C, che non differisce molto da ottobre, in cui la temperatura media è di 31°C, con un valore massimo di 33.6°C e uno minimo di 29.7°C.

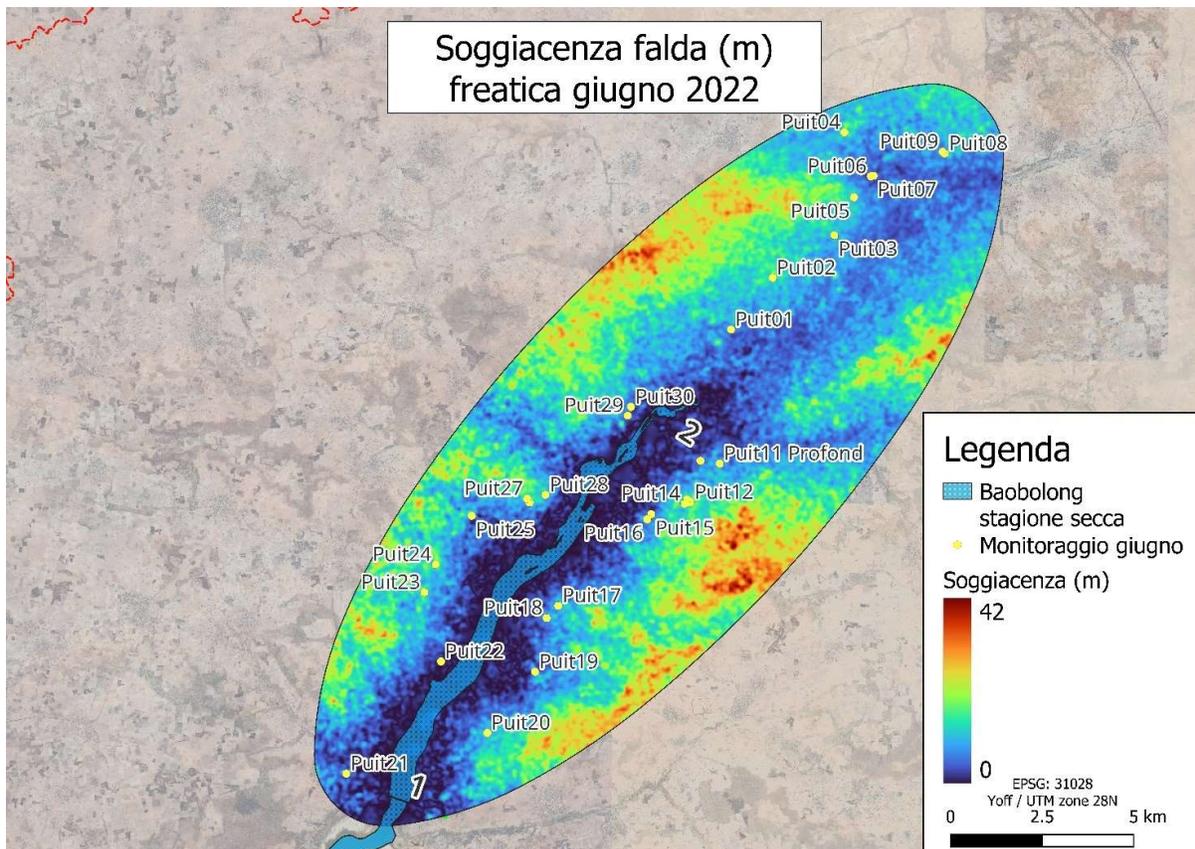


Figura 31. Soggiacenza falda freatica giugno 2022

La Figura 31 e la Figura 32 mostrano la soggiacenza della falda freatica nelle due stagioni. Confrontando le mappe di soggiacenza di giugno e ottobre, si può notare che in quella di ottobre, i valori di soggiacenza maggiori si trovano a distanze maggiori dal fiume rispetto a giugno, mentre le aree con soggiacenza minore (rappresentate in blu), ad ottobre, hanno un'estensione che si spinge più a nord nell'area di studio rispetto a giugno.

A giugno la soggiacenza minima è stata misurata all'interno del pozzo 22 a Darou Kaba, con un valore di 3.2 m, la massima è di 15.5 m misurata nella località di Bambaly nel pozzo 12, in media la soggiacenza rilevata a giugno è di 9.7 m.

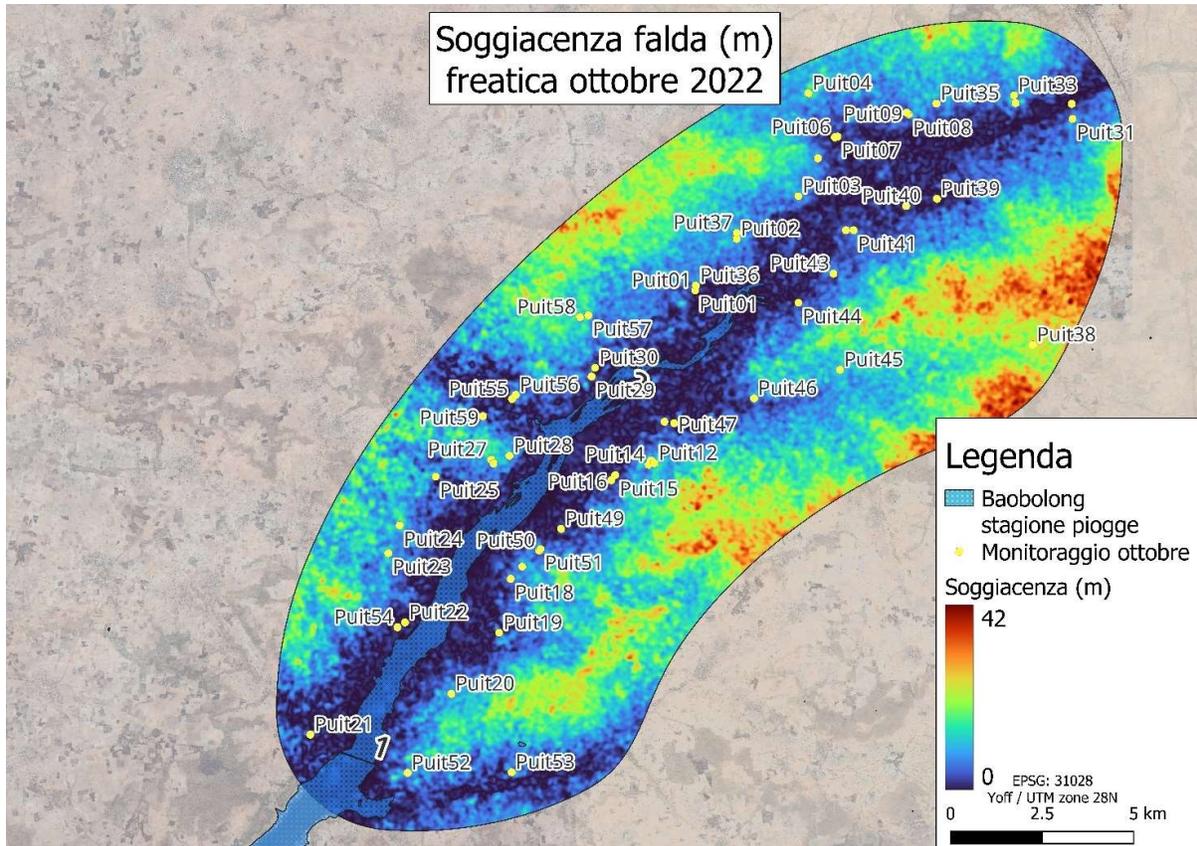


Figura 32. Soggiacenza falda freatica ottobre 2022

Nel monitoraggio di ottobre la soggiacenza media è di 7.1 m, minore di 2.6 m rispetto a quella di giugno; questa grande oscillazione della tavola d'acqua dimostra la grande capacità infiltrante del terreno che permette la ricarica dell'acquifero durante la stagione delle piogge.

Dalle interpolazioni della soggiacenza emerge che questa aumenta proporzionalmente alla distanza dal reticolo idrografico da valori uguali a zero in corrispondenza del fiume fino ad arrivare, nelle zone più lontane, a valori prossimi a 40-42 m. Questi valori massimi di soggiacenza sono da imputare ad errori dovuti al processo di interpolazione, infatti la maggior parte dei punti di monitoraggio si trova in prossimità del fiume, ad una distanza media di 1.48 km, mentre questi valori estremi si presentano man mano che ci si allontana dal fiume e sono dovuti alla mancanza di dati.

I dati che confermano la presenza di questo tipo di errore per i dati di ottobre si riferiscono ai pozzi 38 e 53, i quali rappresentano i punti di monitoraggio più distanti dal fiume. Questi pozzi si trovano in prossimità dei valori massimi di soggiacenza presenti all'interno dell'interpolazione mostrata nella Figura 32. In particolare, il pozzo 38 si trova a una distanza di 5.78 km dal fiume e presenta un valore di soggiacenza di 22.7 m, mentre il pozzo 53 si trova a una distanza di 4.06 km dal fiume e presenta un valore di soggiacenza di 4.23 m.

4.3.1. TRANSETTI

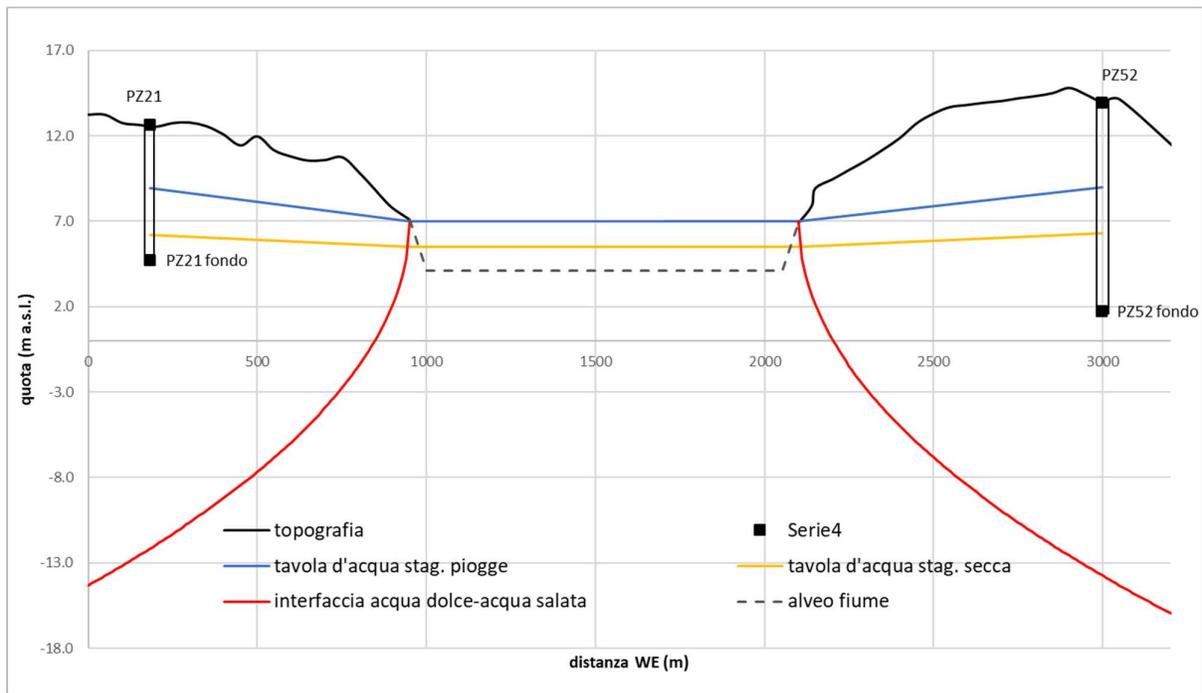


Figura 33 Modello concettuale idrogeologico lungo il transetto 1 (Kabakoto, Figura 14 per la posizione)

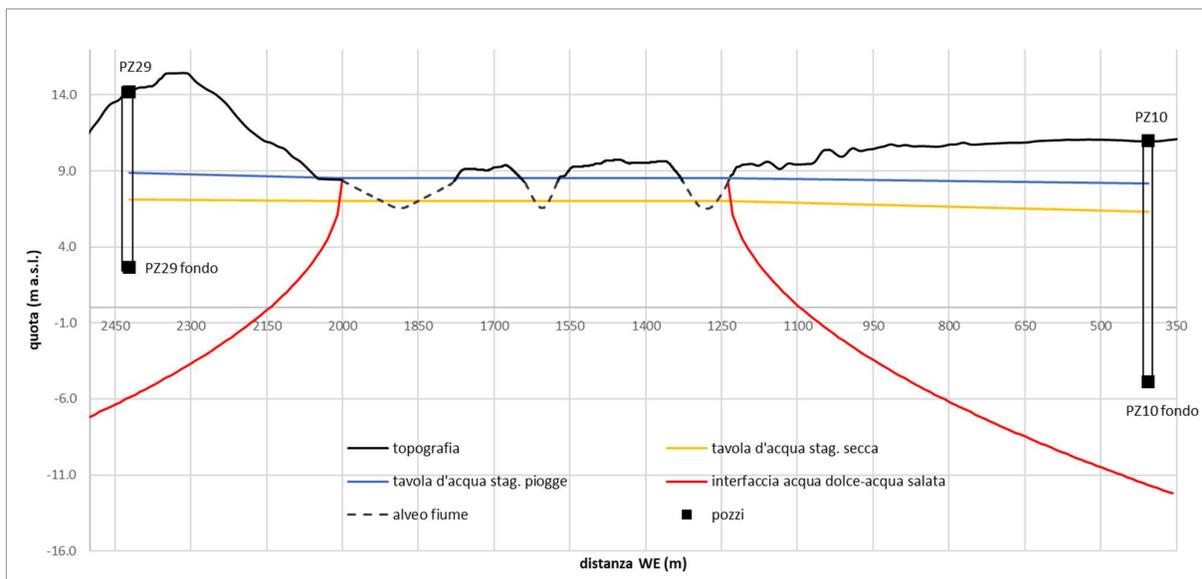


Figura 34 Modello concettuale idrogeologico lungo il transetto 2 (Ndiao Bambaly, Figura 14 per la posizione)

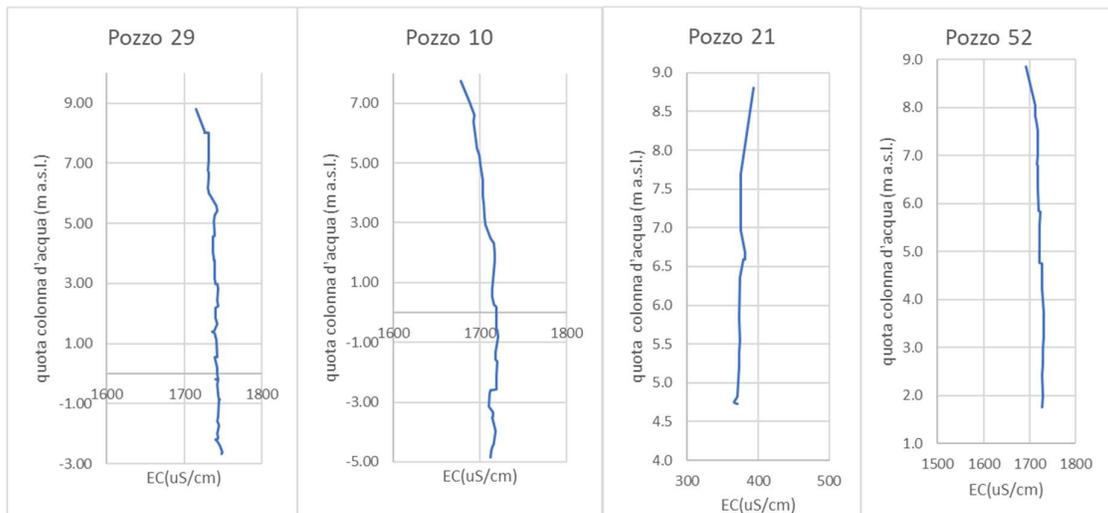


Figura 35. Profili verticali di EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$) nei pozzi 21 e 52 (trasetto 1) pozzi 29 e 10 (trasetto 2)

In Figura 33 e in Figura 34 sono riportate la topografia ricostruita dai rilievi UAV, la tavola d'acqua delle due stagioni monitorate, e l'interfaccia acqua dolce-acqua salata. Nel transetto 1 a Kabakoto (Figura 33) è evidente la differenza di profondità della tavola d'acqua tra giugno e ottobre e la presenza di una tavola d'acqua maggiore rispetto al livello del fiume. La differenza maggiore tra la quota della falda e quella del fiume si ha ad ottobre, a fine del periodo delle piogge, che in questo transetto è di 1.9 m rispetto al pozzo 21 e 2 m rispetto al pozzo 52. Per quanto riguarda giugno le differenze di quota tra la tavola d'acqua ed il fiume corrispondono a 0.7 m rispetto al pozzo 21 e 0.8 m rispetto al pozzo 52, quindi, il gradiente idraulico è di minor entità rispetto ad ottobre.

Questo dato indica la presenza di un modello idrogeologico nella stagione delle piogge in cui la falda acquifera, che viene ricaricata dalle precipitazioni, contribuisce mediante deflusso di base alla ricarica del fiume. Infatti, nel caso di un acquifero non confinato in cui la quota dell'acquifero è maggiore di quella del livello dell'acqua del fiume, si ha un flusso di base che dall'acquifero ricarica il fiume contribuendone alla portata (Girma, 2013) come nel caso del “*gaining stream*” illustrato in Figura 36 (A).

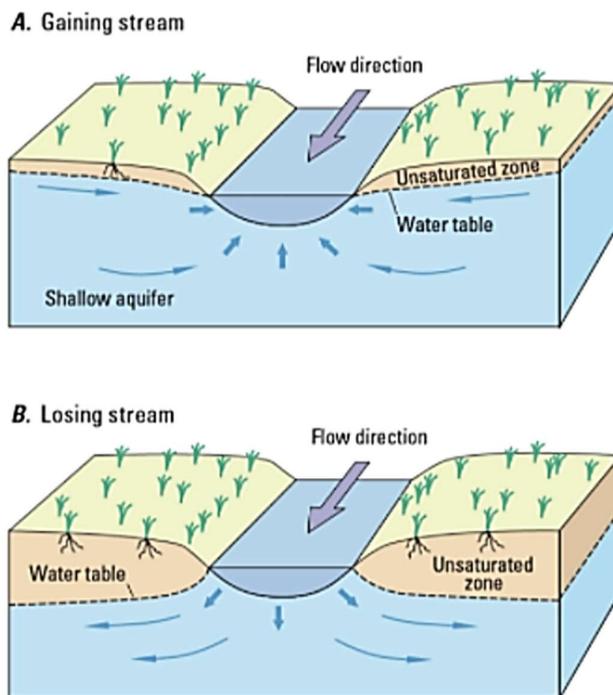


Figura 36. Illustrazione di due sistemi di scambio tra acquifero e fiume: (A) flusso da falda a fiume; (B) flusso da fiume a falda (fonte: Girma, 2013)

Nel transetto 2 a Ndiao Bambaly (Figura 34) si nota un comportamento leggermente differente rispetto al modello del transetto 1. Analizzando la tavola d'acqua di ottobre, intercetta sulla sponda destra il pozzo 29 ad una quota pari a 8.87 m a.s.l., mentre il fiume si trova ad una quota di 8.5 m a.s.l., quindi su questa sponda del fiume, come nel precedente transetto si ha la ricarica del fiume da parte della falda freatica, mentre sulla sponda sinistra la falda freatica di ottobre si trova ad una quota di 8.15 m a.s.l., cioè 35 cm al di sotto del livello del fiume. In questo caso quindi si ha un flusso dal fiume verso l'acquifero. Lo stesso andamento è registrato anche in giugno, seppur con una minore differenza tra il livello del fiume e la profondità della tavola d'acqua misurata nei pozzi. In questo caso, a differenza di quanto avviene nel transetto di Kabakoto e sulla sponda destra del transetto di Ndiao Bambaly, sulla sponda sinistra si ha una situazione di “*losing stream*” (Figura 36 B), in cui si ha un flusso dal fiume verso l'acquifero (Fleckenstein et al., 2010; Girma, 2013).

Le interfacce tra acqua dolce ed acqua salata per i transetti 1 e 2 sono mostrate in rosso in Figura 33 e Figura 34. All'interno del transetto 1 di Kabakoto (Figura 33), l'interfaccia raggiunge quote minime di -16 m a.s.l. per la sponda sinistra e -14 m a.s.l. per la sponda destra. Questa assume una quota di -12 m a.s.l. in corrispondenza del pozzo 21, il cui fondo si trova ad una quota di 4.7 m a.s.l., in

corrispondenza del pozzo 52 l'interfaccia tra acqua dolce e salata si trova ad una quota di -14 m a.s.l., 15.7 m al di sotto del fondo del pozzo.

Nel transetto 2, di Ndiao Bambaly (Figura 34), l'interfaccia raggiunge delle quote minime che corrispondono a -7.2 m a.s.l. per la sponda destra e -12.2 m a.s.l. nella sponda sinistra. In corrispondenza del pozzo 29, il cui fondo ha una quota di 2.7 m a.s.l. l'interfaccia si trova ad una quota di -5.7 m a.s.l., mentre in corrispondenza del pozzo 10, il cui fondo si trova ad una quota di -4.9 m a.s.l., l'interfaccia ha una quota di -11.6 m a.s.l.

Osservando la Figura 35, che mostra i profili verticali dei valori di EC a 25°C misurati ad ottobre nei pozzi lungo i transetti, si può notare che in tutti e quattro i pozzi è presente acqua dolce. In particolare, il pozzo 21 presenta l'acqua più dolce, con valori di EC compresi tra 350 e 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mentre gli altri tre pozzi hanno valori di EC compresi tra 1650 e 1750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dai risultati dei monitoraggi dei parametri chimico-fisici e dai modelli costruiti lungo i transetti si può concludere che in nessuno dei pozzi sia presente acqua salata, poiché nessuno dei pozzi ad ottobre interseca l'interfaccia tra acqua dolce e salata.

L'interfaccia riportata all'interno dei grafici è riferita al periodo delle piogge, calcolata utilizzando una densità di $1009.7 \text{ kg}/\text{m}^3$ che corrisponde ad un EC a 25°C di $27.5 \text{ mS}/\text{cm}$ (acqua salmastra). L'interfaccia tra acqua dolce e salata per il periodo secco non è stata riportata in quanto non sono ancora disponibili i dati per calcolarla (la cui raccolta è prevista per la seconda missione del progetto Global South). È possibile però fare delle previsioni tenendo in considerazione l'equazione 2.1 (paragrafo 3.3.1) per il calcolo della profondità dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata. Nella stagione secca, in assenza di precipitazioni, la variabile q (ricarica dell'acquifero per unità di superficie) diminuisce, mentre la salinità del fiume aumenta a causa dell'evaporazione e della concentrazione dei sali in acqua. A giugno, i valori di salinità raggiungono livelli superiori a quelli dell'acqua di mare, provocando un aumento della densità dell'acqua del fiume. In questo scenario, secondo la formula di Ghyben-Herzberg-Dupuit, si ha una risalita dell'interfaccia tra acqua dolce e salata, con la possibilità che questa possa essere intercettata dai pozzi.

Il Sesto Rapporto di valutazione (AR6) dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) prevede un innalzamento del livello medio del mare a Dakar compreso tra 44 e 86 cm rispetto ai livelli preindustriali entro la fine del secolo (IPCC, 2022). Considerando queste proiezioni ci si attende, in futuro, un aumento della risalita di acqua di mare lungo il fiume, con conseguente aumento della densità dell'acqua del fiume e risalita dell'interfaccia tra acqua dolce e salata, con possibili

conseguenze di salinizzazione delle acque sotterranee, soprattutto durante la stagione arida in cui la quota della tavola d'acqua si abbassa notevolmente.

Oltre ai cambiamenti climatici, un altro problema che ha conseguenze sulla salinità delle acque risiede nella gestione dell'acqua. Infatti, manca una definizione chiara delle responsabilità dei vari enti sul territorio che si occupano della risorsa acqua (Dia et al., 2020). La carente gestione dell'acqua è testimoniata dalla situazione in cui versano i barrages, strutture con la funzione di regolamentare le piene che permettono, oltre che al bloccaggio della risalita dell'acqua salata, anche di trattenere l'acqua del fiume per essere impiegata nell'agricoltura. I barrages sembrano non essere gestiti da nessuna delle molteplici autorità, alcuni vengono abbandonati e perdono la loro funzionalità a causa della degradazione da parte dagli agenti atmosferici (Figura 37 A), in altri di costruzione più recente le paratoie che servono a regimare il flusso sono spesso bloccate dalle incrostazioni di ruggine e lasciate aperte (Figura 37B).



Figura 37.(A) Barrage diroccato per mancanza di manutenzione (B) Barrage con paratoie bloccate a causa del meccanismo arrugginito

4.4. BILANCIO IDROLOGICO

Tabella 5. Bilancio idrologico 2022

mese	Precipitazioni (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	DP (mm) = R (mm)	ΔS
Gen	0.0	146.8	0.0	0.0	0.0
Feb	0.0	151.4	0.0	0.0	0.0

Mar	0.0	195.0	0.0	0.0	0.0
Apr	0.0	249.7	0.0	0.0	0.0
Mag	51.8	247.1	26.5	25.3	0.0
Giu	68.7	225.3	35.2	33.5	0.0
Lug	173.4	211.2	88.8	84.6	0.0
Ago	165.6	166.1	84.8	80.8	0.0
Set	305.8	151.8	151.8	154.0	0.0
Ott	108.1	187.7	55.3	52.8	0.0
Nov	0.1	164.7	0.1	0.0	0.0
Dic	0.3	143.3	0.2	0.1	0.0
Tot	873.8	2240.0	442.6	431.3	0.0

La Tabella 5 riporta i dati utilizzati per il bilancio idrologico del bacino idrografico del fiume Bao Bolong relativo all'anno 2022. Le precipitazioni sono concentrate nel periodo da maggio a ottobre durante il quale si hanno i valori massimi di evapotraspirazione reale e percolazione profonda. Il mese con il valore massimo di precipitazione è settembre, che è l'unico mese in cui i mm di precipitazione sono maggiori di quelli di evapotraspirazione potenziale, in questo mese si hanno anche i valori massimi di ETR, di 151.8 mm e di percolazione profonda, di 154 mm.

È da considerare che per il calcolo del bilancio idrologico del bacino del Bao Bolong non si ha a disposizione un dataset completo; perciò, il bilancio idrologico riportato in questo lavoro di tesi non risulta del tutto esaustivo. I dati di precipitazione sono riferiti ad una sola stazione meteo localizzata nella città di Kaffrine (a nord del bacino del Bao Bolong), e non si può ricostruire la variazione di distribuzione delle precipitazioni, che nel caso di un bacino come quello in esame, che si estende per 3050 km² e in cui il fiume ha una lunghezza di circa 133 km, potrebbe risultare significativa. I dati di percolazione profonda sono stati calcolati a partire dai dati di soggiacenza che hanno una copertura spaziale limitata rispetto all'area del bacino. Invece per l'evapotraspirazione reale si è notato che diversi metodi, tra cui quello di Turc, tendevano a sovrastimare i valori di evapotraspirazione, i quali eccedevano i valori di precipitazione. Tuttavia, nonostante sia stato necessario introdurre alcune approssimazioni per il calcolo dei parametri del bilancio idrologico, i risultati di evapotraspirazione reale non sono complessivamente dissimili dai dati riportati nello studio condotto per lo stesso bacino da M. Abou DIA, 2019 su una serie temporale di dati climatici dal 1991 al 2017, in cui si riportano valori totali di ETR di 374 mm, riferiti però ad un dato di precipitazione annuo di 615 mm.

I valori di ETR del bilancio idrologico, presentano dei pattern temporali paragonabili a quelli riportati da Ndehedehe et al., 2018 e raffigurati in Figura 38. Sia dal bilancio in Tabella 5, che dalla Figura 38 emerge che il trimestre con evapotraspirazione maggiore è quello di luglio, agosto e settembre. Nel

trimestre ottobre-novembre-dicembre si osserva una diminuzione dell'ETR, che in Tabella 5 riporta un valore di 55.3 mm in ottobre e valori prossimi a 0 mm in novembre e dicembre (0.1 e 0.2 mm). Nei mesi tra gennaio e marzo l'evapotraspirazione risulta essere prossima a 0 mm in Figura 38 e uguale a 0 mm nel bilancio. Infine, dalla Figura 38 si osserva un modesto aumento di evapotraspirazione nel trimestre compreso tra aprile e giugno, a cui corrispondono valori di ETR nella Tabella 5 di 0 mm per aprile, 26.5 mm per maggio e 35.2 mm per giugno.

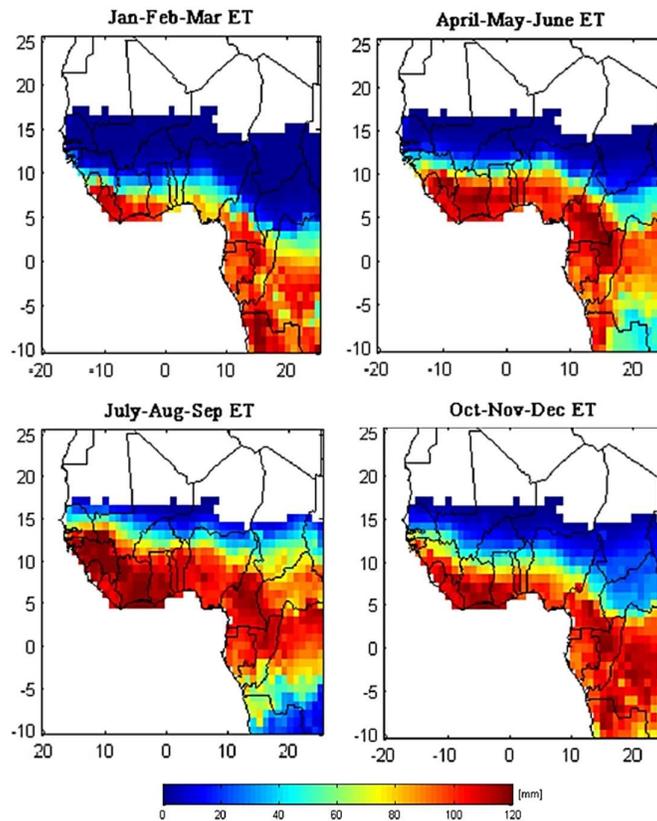


Figura 38. Pattern stagionali di evapotraspirazione con dati da MODIS/Terra Net Evapotranspiration Global 500 m SIN Grid per il periodo tra 2000 e 2014 (Fonte: Ndehedehe et al., 2018)

Per quanto riguarda la percolazione profonda, che è stata considerata insieme al ruscellamento, non sono presenti dati che confermano o meno i risultati di questo bilancio, tuttavia i valori di percolazione profonda del bilancio, che sono molto consistenti da luglio a settembre, con valori rispettivamente di 84.6 mm, 80.8 mm e 154.0 mm sono in linea con le ipotesi iniziali di una forte tendenza all'infiltrazione dell'acqua di precipitazione, basate sulla classificazione hydrologic soil group dei suoli della NASA (Figura 19, paragrafo 4.1).

5. CONCLUSIONI

L'obiettivo del progetto Global South, all'interno del quale si inserisce il presente lavoro di tesi, è quello di contribuire ad aumentare le conoscenze sul territorio del bacino idrografico del fiume Bao Bolong, nella regione di Kaffrine (Senegal), al fine di favorire lo sviluppo socioeconomico e il miglioramento ambientale dell'area, attraverso l'individuazione di soluzioni per l'approvvigionamento idrico e la gestione sostenibile delle acque. In particolare, l'obiettivo della tesi consiste nella caratterizzazione idrologica, idrogeologica e morfologica della valle.

Uno dei risultati più importanti ottenuti è stato la creazione del database GIS nel quale sono stati integrati, digitalizzati, validati ed elaborati tutti i dati forniti dalle autorità locali, che risultavano spesso incompleti, frammentari e in formato analogico. Il database costituisce uno strumento fondamentale per la pianificazione di nuove campagne di monitoraggio e lo sviluppo territoriale in linea con le esigenze sociali e territoriali e sarà donato alle autorità locali competenti per la gestione dell'acqua, al fine di supportare lo studio della valle e la sua gestione.

In merito alla salinità delle acque del fiume Bao Bolong, gli studi hanno evidenziato una forte salinità durante la stagione secca, causata dalla risalita di acqua di mare attraverso il fiume Gambia e il Bao Bolong, favorita dalla morfologia del territorio e dal gradiente topografico molto basso. Contribuisce a questa salinità anche il clima, con precipitazioni concentrate nei 5-6 mesi della stagione delle piogge (maggio-inizio ottobre) e un regime di evaporazione nel resto dell'anno che porta alla deposizione di sali sulla superficie del suolo e all'aumento della concentrazione di sale nelle acque già salate del fiume. Un altro fattore che concorre alla risalita dell'acqua salata nel bacino del Bao Bolong è la carenza di barrages lungo il fiume e la cattiva gestione e manutenzione di quelli presenti. I monitoraggi delle acque sotterranee hanno rilevato che l'acqua nei pozzi all'interno dei villaggi è generalmente dolce, anche se alcuni presentano valori di conduttività elettrica che la rendono incompatibile per il consumo umano. La presenza di acqua dolce è confermata anche dai modelli idrogeologici costruiti lungo i transetti perpendicolari al fiume, i quali indicano che i pozzi non intercettano l'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Tuttavia, considerando le prospettive climatiche che prevedono variazioni nella distribuzione temporale delle precipitazioni, aumento delle temperature e del livello del mare, è plausibile che la situazione della salinità all'interno dell'acquifero superficiale si aggravi in futuro, portando ad un aumento dell'intrusione salina e ad un innalzamento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata, con conseguente salinizzazione delle acque sotterranee, principale fonte di approvvigionamento per i villaggi locali. Pertanto, sono necessarie misure specifiche per ridurre il flusso di acqua salata che risale dalla foce del bacino.

Il limite principale riscontrato durante questo studio è stata la scarsità di dati e la difficoltà nel reperimento di quelli esistenti. Spesso si deve ricorrere a dati provenienti da regioni adiacenti, ad esempio nel caso delle precipitazioni che sono state misurate in una stazione esterna vicino all'area di studio. I dati disponibili per la valle del Bao Bolong si trovano principalmente nei documenti redatti dalle autorità locali che si occupano del monitoraggio e della gestione delle risorse idriche, ma i loro siti internet generalmente non funzionano o non hanno risorse disponibili online. Inoltre, i dati presenti nei report tecnici di queste autorità spesso sono approssimativi e mancano di riferimenti ai metodi di misurazione. Un'altra difficoltà nella ricerca è la vasta dimensione dell'area di studio, che copre una superficie di 3050 km². Questo, insieme alle condizioni della rete stradale non asfaltata, rende gli spostamenti difficili da un punto di vista logistico, ragione per cui i punti di monitoraggio sono stati principalmente concentrati nella parte centrale del bacino, dove si concentrano i villaggi.

I risultati di questo studio, insieme a quelli che il progetto Global South prevede, sono di grande importanza nel supportare le attività agrosilvopastorali della valle. All'interno del database sono presenti dati utili per identificare le aree a rischio di alluvioni e siccità, per supportare la gestione delle emergenze ambientali, per il monitoraggio delle risorse naturali come l'acqua e il suolo, per la pianificazione dello sviluppo territoriale e per lo sviluppo di politiche e pratiche agricole adatte ai diversi tipi di suolo e clima. Inoltre, i risultati dei monitoraggi dei parametri chimico-fisici sono uno strumento utile per le autorità responsabili della gestione dell'acqua perché costituiscono una conoscenza di base a scala di bacino che prima mancava. Questi risultati sono anche già stati utilizzati per diverse attività di sensibilizzazione della popolazione locale sulle buone pratiche di utilizzo dell'acqua.

In futuro, per ottenere una caratterizzazione più precisa del bacino idrologico del Bao Bolong, potrebbe essere valutato l'ampliamento della rete di stazioni di monitoraggio delle acque sotterranee, in modo da coprire maggiormente il territorio e raccogliere dati utili per la modellazione idrologica annuale del bacino da utilizzare in software come HEC-HMS (es. dati sulle colture e sull'immagazzinamento nella zona insatura). Sarebbe anche interessante estendere la caratterizzazione della qualità delle acque, includendo per esempio la componente microbiologica, in quanto spesso queste acque presentano parametri chimico-fisici incompatibili con il consumo umano, ma vengono comunque utilizzate dalle popolazioni locali senza alcun trattamento minimo di potabilizzazione o filtrazione.

Un ulteriore sviluppo potrebbe essere il miglioramento dei dati topografici, in quanto attualmente è disponibile solo il modello di elevazione SRTM, che presenta un RMSE di 7 m. In un bacino come il Bao Bolong, in cui il gradiente topografico e il gradiente idraulico sono molto bassi, avere una

buona precisione sulla quota altimetrica è fondamentale per sviluppare modelli idrogeologici corretti e possibili soluzioni di gestione. Per questo motivo, sarebbe necessaria una ricostruzione altimetrica dettagliata, ma al momento risulta difficile a causa dell'assenza di punti quotati su cui correggere le quote dei rilievi topografici, o reti e stazioni a terra per la correzione del dato satellitare misurato con GPS.

L'organizzazione di attività di formazione per la popolazione locale rappresenta una risorsa importante per lo sviluppo del territorio, e sarebbe opportuno ampliarle. Durante le missioni del progetto è stato possibile organizzarne solo in numero limitato, ma la loro efficacia potrebbe aumentare se venissero organizzate più frequentemente e in modo diffuso nella valle del Bao Bolong.

Infine, considerando l'attuale frammentazione delle istituzioni deputate alla gestione delle acque, un aspetto su cui concentrare futuri progetti potrebbe essere la definizione di un framework di gestione delle risorse idriche del bacino, nel quale vengano definiti in modo chiaro i compiti di ogni autorità e gli obiettivi di gestione a breve, medio e lungo termine, tenendo in considerazione le effettive risorse disponibili sul territorio.

6. ALLEGATO A

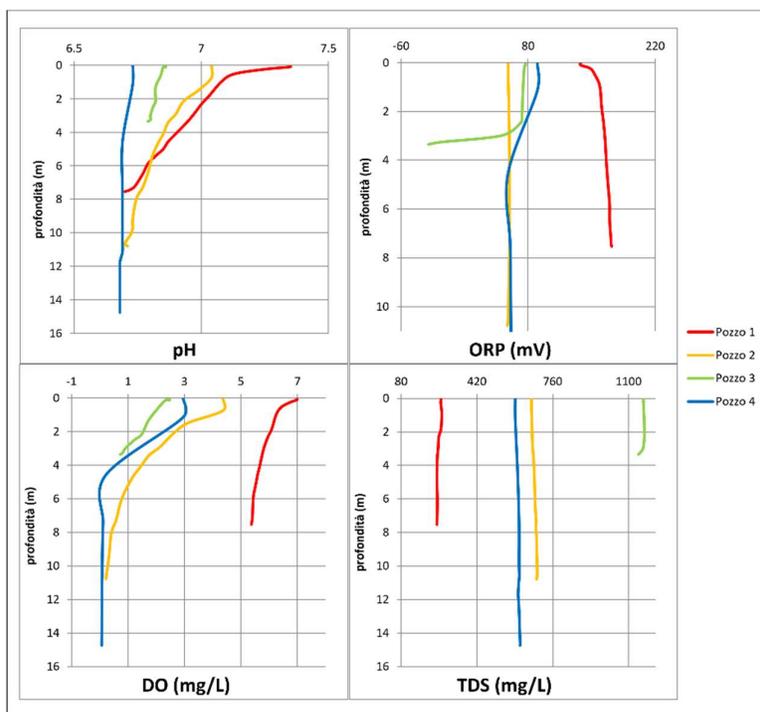


Figura 1A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 1,2,3,4

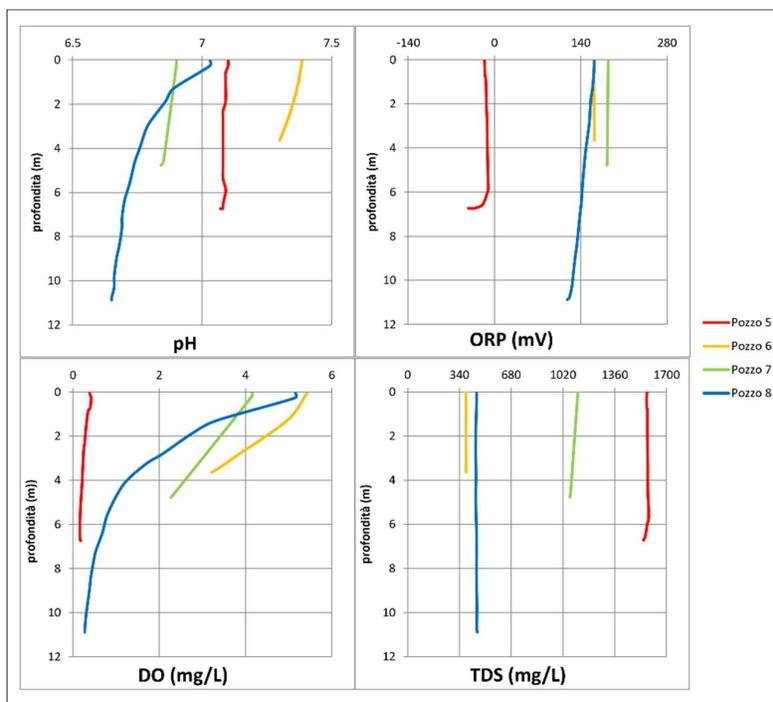


Figura 2A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 5,6,7,8

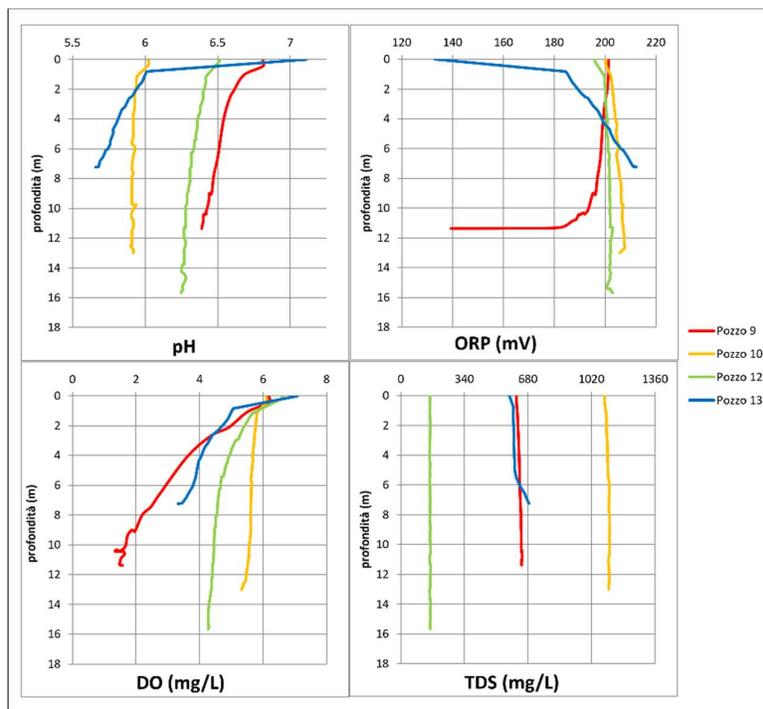


Figura 3A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 9,10,12,13

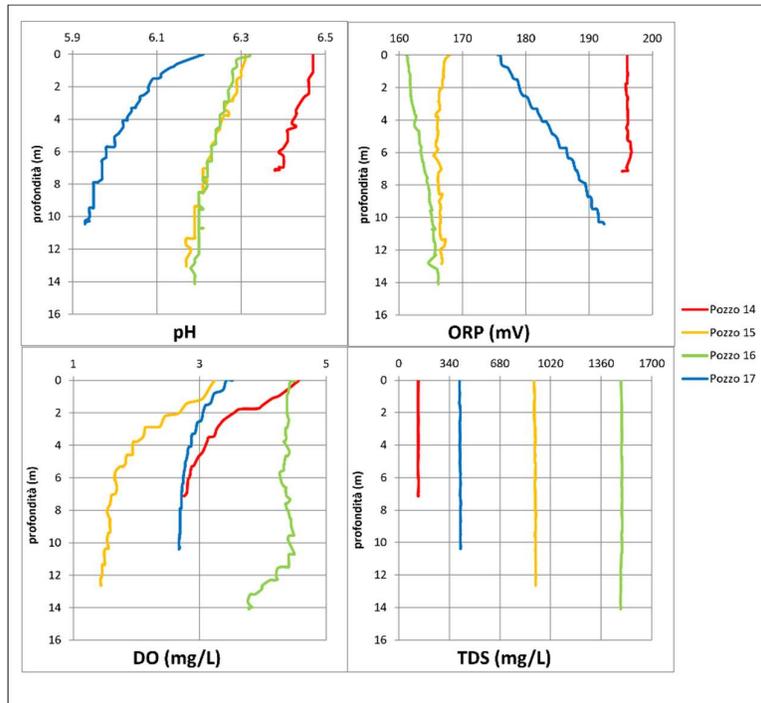


Figura 4A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 14,15,16,17

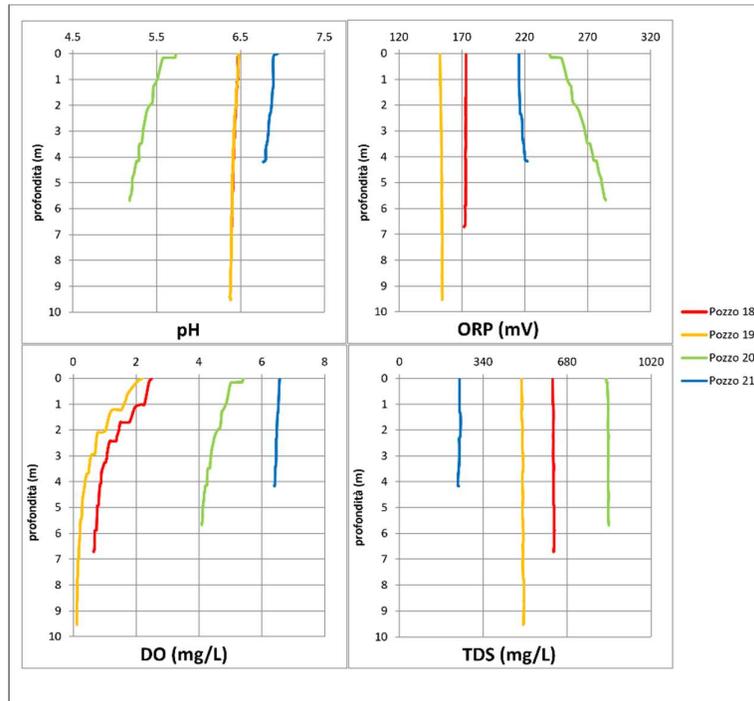


Figura 5A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 18,19,20,21

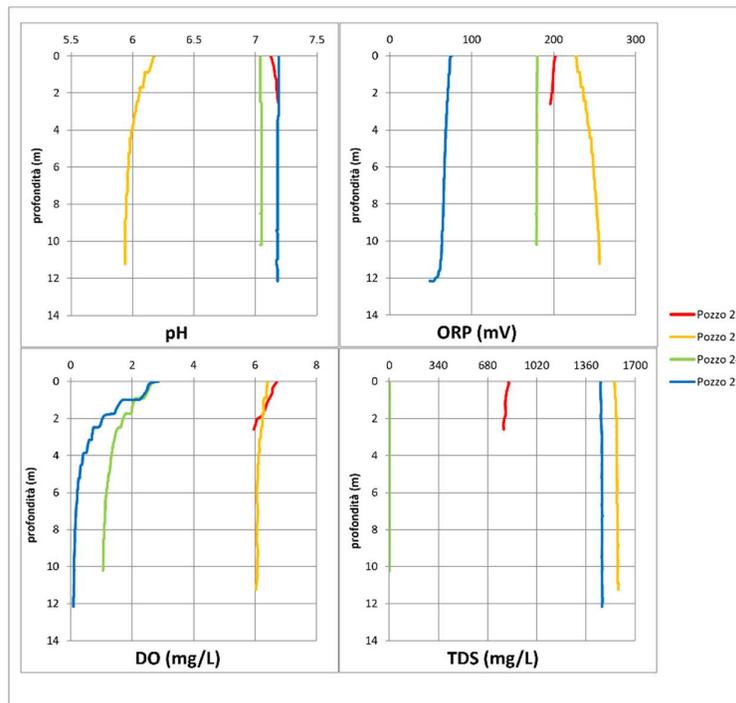


Figura 6A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 22,23,24,25

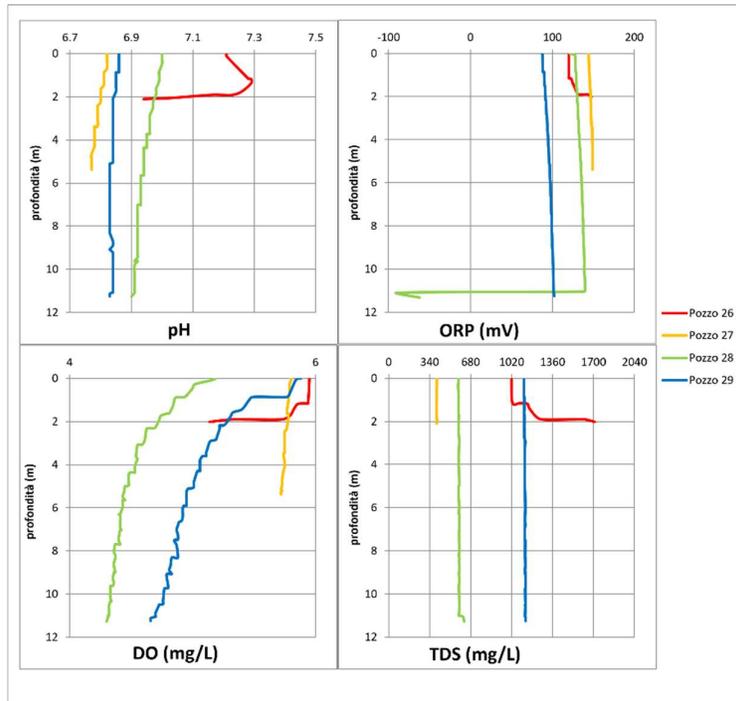


Figura 7A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 26,27,28,29

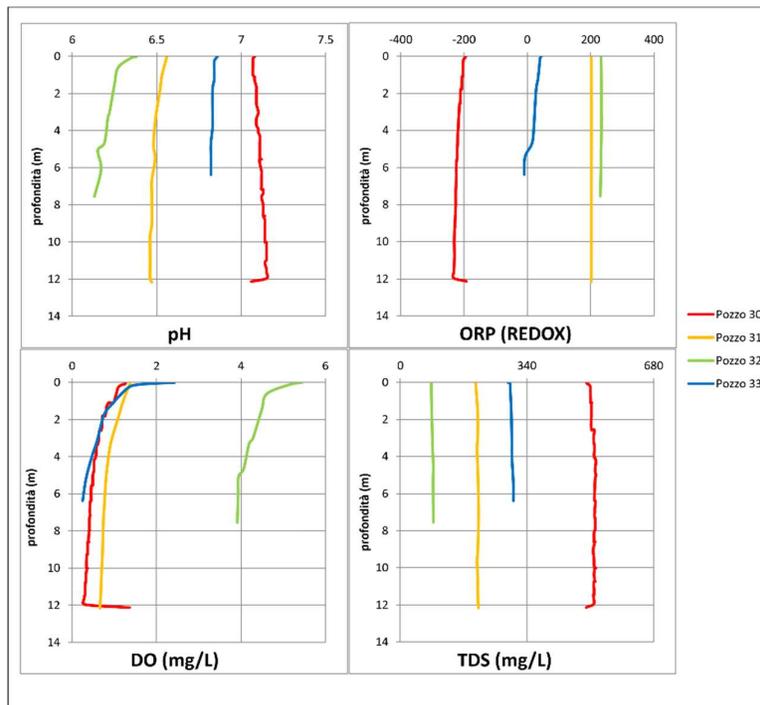


Figura 8A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 30,31,32,33

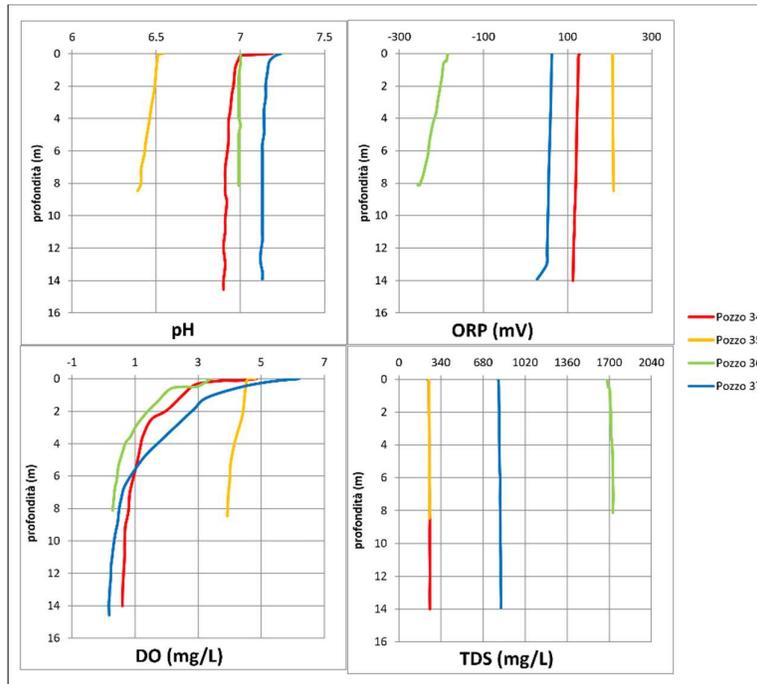


Figura 9A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 34,35,36,37

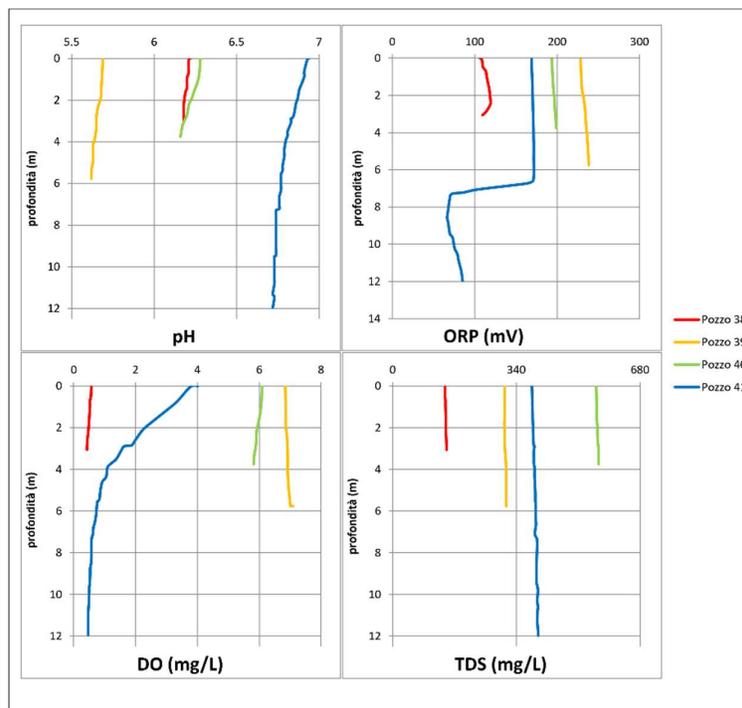


Figura 10A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 38,39,40,41

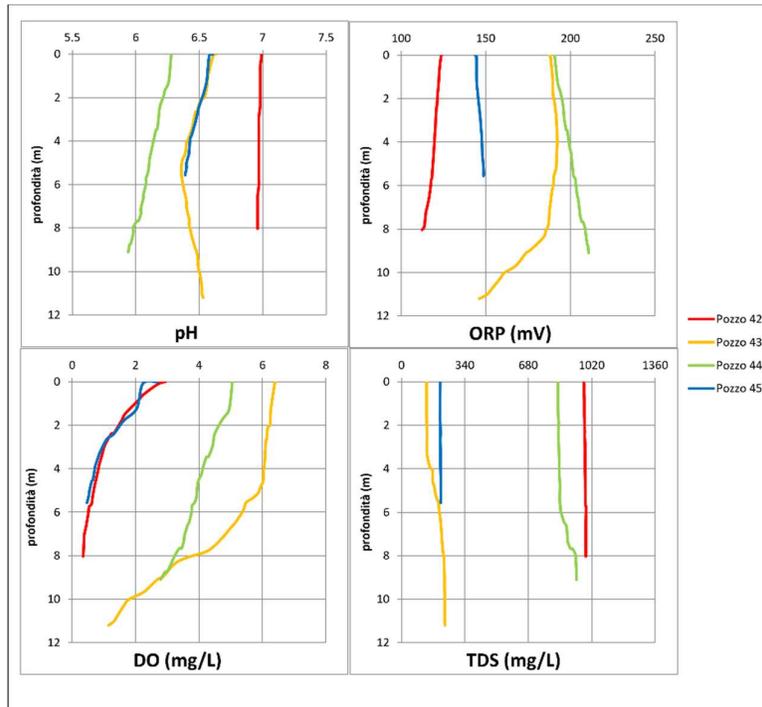


Figura 11A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 42,43,44,45

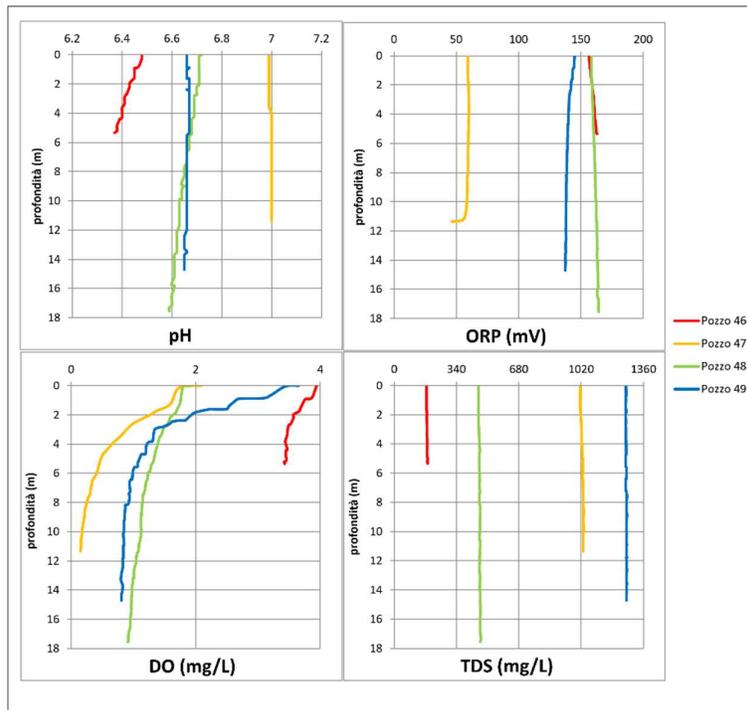


Figura 12A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 46,47,48,49

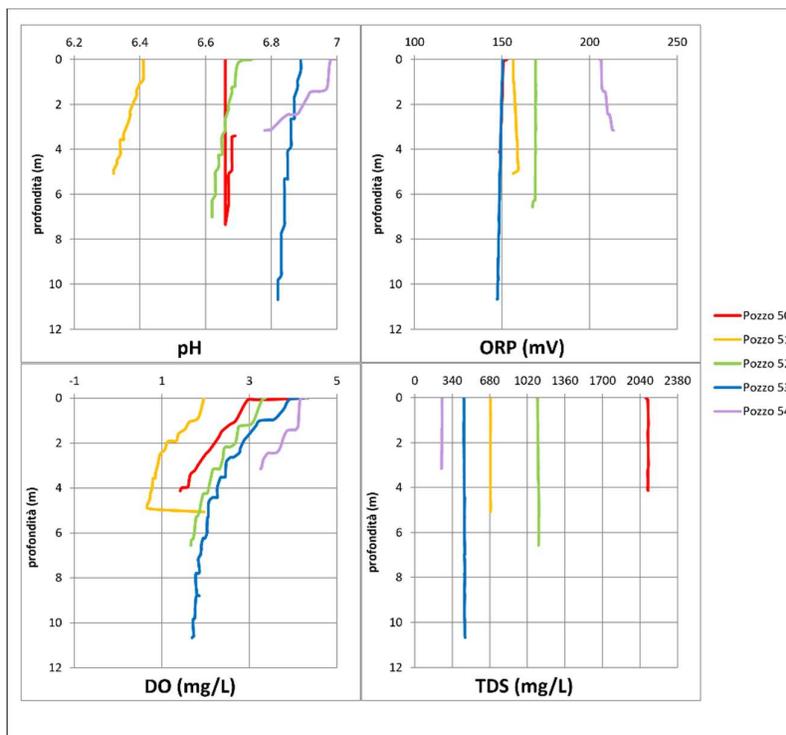


Figura 13A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 50,51,52,53,54

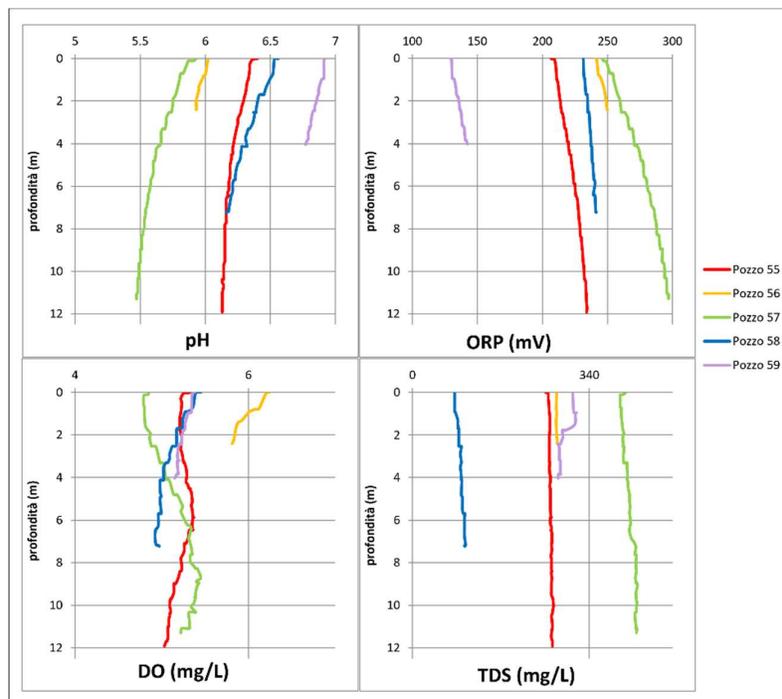


Figura 14A. Profili verticali dei parametri di pH, ORP (mV), DO (mg/l), TDS (mg/l) misurati durante i monitoraggi di ottobre 2022 per i pozzi 55,56,57,58,59

7. BIBLIOGRAFIA

- Allen, R. G., Tasumi, M., & Trezza, R. (2010). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 136(4), 210–221.
- Baldantoni D., Alfani A., and Virzo De Santo A. (2007). Acid rain and its ecological consequences. In: *Ecosystems Biodiversity* (pp. 213-236). Springer, Dordrecht.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2016). *The nature and properties of soils* (Pearson, Ed.).
- Cozzolino, D., Greggio, N., Antonellini, M., & Giambastiani, B. M. S. (2017). Natural and anthropogenic factors affecting freshwater lenses in coastal dunes of the Adriatic coast. *Journal of Hydrology*, 551, 804–818. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.039>
- DeMers, M. N. (2005). GIS fundamentals: a first text on geographic information systems. *XanEdu Publishing*.
- DGPRES. (2018). *Etudes hydrogéologiques des potentialités des nappes superficielles et intermédiaires en vue d'une dilution et/ou d'un transfert d'eau dans la zone du Bassin Arachidier*.
- Dia, S., Seck, O. K. K., Tigana, D., Thiaw, M. B., Fall, M., Ba, S., Diouf, I., Fall, C., & Ndiaye, F. G. (2020). *Plan national d'aménagement et de développement territorial (PNADT) horizon 2035*.
- Diouf, O. C., Weihermüller, L., Ba, K., Faye, S. C., Faye, S., & Vereecken, H. (2016). Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 110(1), 117–137. <https://doi.org/10.12895/jaeid.20161.417>
- FAO. (2015). *World reference base for soil resources*.
- FAO. (2005). *FAO AQUASTAT Rapports Profil de Pays –Senegal*.
- Faye, S., Dacosta Honoré, & Thierion Charlotte. (2018). *Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie*.
- Fetter, C. W. (2000). *Applied Hydrogeology* (IV Edition). Pearson College.
- Fleckenstein, J. H., Krause, S., Hannah, D. M., & Boano, F. (2010). Groundwater-surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources*, 33(11), 1291–1295. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2010.09.011>
- Girma, Y. E. (2013). *Modelling groundwater systems: Understanding and improving groundwater quantity and quality management*. CRC Press.
- Goutorbe, J. P., & Mahé, G. (1996). Comparison of methods for estimating potential evapotranspiration in the Sahelian zone. *Journal of Hydrology*, 180(3–4), 331–348.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B. M., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangguan, W., Wright, M. N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M. A., Vargas, R., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Leenaars, J. G. B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., & Kempen, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE*, 12(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748>
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. *Cambridge University Press*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi: 10.1017/9781009325844
- Kothawale, D. R., Bhate, J. S., & Kumar, K. K. (2018). Analysis of hydrological variables using water budget approach over the Godavari river basin. *Journal of Earth System Science*, 127(3), 1–14.
- M. Abou DIA. (2019). *Etude hydrologique du bassin versant du Baobolong*. UNIVERSITE' GASTON BERGER DE SAINT LOUIS.
- McLaughlin, J., & Wimmer, R. (2017). *The Complete Soil Survey Handbook*.
- MEDD. (2018). *Programme Pays 2018-2030*.

- Mockus, V., Werner, J., Woodward, D., Nielsen, R., Dobos, R., Hjelmfelt, A., & Hoefft, C. (2007). *Hydrology National Engineering Handbook*.
- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis (5th ed.)* (5th ed.). John Wiley & Sons.
- Mukul, M., Srivastava, V., & Mukul, M. (2015). *Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network*. <http://www.ias.ac.in/jess/aug2015/supp/Mukul.pdf>
- Muller, E. U., Kushlin, A. v., Linhares-Juvenal, Thais., Muchoney, Douglas., Wertz-Kanounnikoff, Shelia., & Henderson-Howat, David. (2018). *The state of the world's forests : forest pathways to sustainable development*.
- M'koumfida, B., Yaffa S, & Bah A. (2018). The Impacts of Saline-Water Intrusion on the Lives and Livelihoods of Gambian Rice-Growing Farmers. In Res. Rev. J Ecol. Environ. Sci. | (Vol. 6, Issue 1).
- Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O., Ferreira, V. G., & Agutu, N. O. (2018a). Exploring evapotranspiration dynamics over Sub-Sahara Africa (2000–2014). *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6780-6>
- Ndehedehe, C. E., Okwuashi, O., Ferreira, V. G., & Agutu, N. O. (2018b). Exploring evapotranspiration dynamics over Sub-Sahara Africa (2000–2014). *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6780-6>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, *6*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Pix4D SA. (2017). *Pix4Dmapper 4.1 USER MANUAL*.
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., & Mackay, D. (2020). *Groundwater in Our Water Cycle: Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source*.
- Ross, C. W., Prihodko, L., Anchang, J., Kumar, S., Ji, W., & Hanan, N. P. (2018). HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling. *Scientific Data*, *5*(1), 180091. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.91>
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *118*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Schmitt, R. W., & Zindler, C. (2013). On the role of salinity in ocean circulation. In *Progress in Oceanography* (Vol. 110, pp. 1–4).
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, *38*(1), 55–94.
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (Third edition).
- Travi, Y., Bacar, S. H., Hmeyade, B. L., Fall, N. K. S., & Fall, M. D. (2017). *Rapport du projet régional de coopération technique appuyé par l'AIEA raf/7/011 bassin sénégal-mauritanien*.
- UNESCO. (2018). *The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-based Solutions for Water*.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- World Bank Group. (2022).
- Zhang, M., Liu, Y., Liu, J., & Zhang, L. (2019). Application of GIS database in environmental analysis. In *International Conference on Education Technology Management and Humanities Science (ETMHS 2019)* (pp. 90–94). Atlantis Press.

8. SITOGRAFIA

Autel Robotics – Software Autel Sky per il controllo del Autel Robotics Evo II v2 RTK

https://www.autelrobotics.com/download/app_download.html (ultimo accesso 27/02/2023)

Climate Knowledge Portal - Senegal sommario del paese

<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/> (Ultimo accesso: 14/01/2023)

DJI – Differenza tra droni, UAS, UAV, SAPR

<https://www.dji-store.it/qual-e-la-differenza-tra-droni-uas-uav-e-sapr> (ultimo accesso 27/02/2023)

Drone Link – Software di controllo del SAPR DJi Mini

<https://www.dronelink.com/> (ultimo accesso 27/02/2023)

EPSG.io – Informazioni su sistemi di riferimento cartografici

<https://epsg.io/31028-8633> (Ultimo accesso: 16/02/2023)

ISO TC 211 – Informazioni Geografiche

<http://www.isotc211.org/2005/gmd> (ultimo accesso 21/02/2023)

NASA - Shuttle Radar Topography Mission

<https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> (ultimo accesso 27/02/2023)

ONU – Cambiamenti climatici.

<https://unric.org/it/che-cosa-sono-i-cambiamenti-climatici/> (ultimo accesso 15/12/2022)

ONU – Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile

https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf (ultimo accesso 17/12/2022)

QGIS – Documentazione per QGIS 2.8

https://docs.qgis.org/2.8/it/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html (Ultimo accesso: 16/02/2023)

Visual Crossing – Dati climatici storici

<https://www.visualcrossing.com/> (ultimo accesso 06/01/2023)

3Dfotogram – Ortofoto, ortomosaico e ortofotomosaico

<https://www.3dfotogram.it/ortofoto-ortomosaico-ortofotomosaico/> (Ultimo accesso: 16/02/2023)