

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

**Effetto del cambiamento di uso del suolo sulla
ricarica della falda costiera emiliano-romagnola**

Tesi di laurea in Idrologia ambientale

Relatore:

Prof.ssa Beatrice Maria Sole Giambastiani

Correlatore:

Prof. Marco Antonellini

Controrelatore:

Prof. Alessandro Buscaroli

Presentata da:

Natale Battaglia

Sessione Anno Accademico 2022-2023

“Qualunque cosa tu possa fare, qualunque sogno tu possa sognare, comincia.

L’audacia reca in sé genialità, magia e forza. Comincia ora.”

Johann Wolfgang von Goethe

Sommario

ABSTRACT	1
1. INTRODUZIONE	2
1.1 USO E CONSUMO DEL SUOLO	2
1.1.1 CONSUMO DI SUOLO NAZIONALE.....	3
1.2 CONSEGUENZE DEL CONSUMO DI SUOLO	6
1.3 OBIETTIVO DELLA TESI.....	7
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO	8
2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA DI STUDIO	8
2.2 CLIMATOLOGIA.....	11
2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA	11
2.3.1 SALINIZZAZIONE.....	14
2.4 PEDOLOGIA.....	15
2.5 USO DEL SUOLO	17
2.6 IDROLOGIA SUPERFICIALE	18
2.6.1 DRENAGGIO	19
3. METODOLOGIA.....	21
3.1 DATI METEOCLIMATICI	21
3.2 CAMBIAMENTO DELL'USO DEL SUOLO.....	22
3.3 CALCOLO DELL'INFILTRAZIONE.....	27
3.3.1 HYDRUS 1D.....	28
4. RISULTATI	32
4.1 DATI METEOCLIMATICI	32
4.2 CAMBIAMENTO USO DEL SUOLO	35
4.3 CALCOLO INFILTRAZIONE – HYDRUS 1D	46
5. DISCUSSIONE	53
5.1 CALCOLO INFILTRAZIONE	55
6. CONCLUSIONI.....	57
7. BIBLIOGRAFIA	59
8. SITOGRAFIA	66
RINGRAZIAMENTI	67

ABSTRACT

In questo lavoro di tesi è stata eseguita l'analisi dell'evoluzione dell'uso del suolo per stimare le variazioni della ricarica dell'acquifero freatico costiero in relazione alla variazione dell'uso del suolo avvenuta nel tempo per il territorio costiero dell'Emilia-Romagna.

La metodologia utilizzata ha previsto uno studio del territorio tra il 1943 e il 2018, considerando le carte dell'uso del suolo del 1943, 1976, 1982, 1998, 2005, 2017 e 2018 fornite dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna; i dati meteorologici sono stati estrapolati dal database Dexter di ARPAE. Con l'utilizzo di strumenti GIS (*Geographic information system*) sono stati elaborati e valutati i cambiamenti dell'uso del suolo in due fasi: i) la prima, a scala di tutto l'acquifero costiero dal 1976 al 2018; ii) la seconda, in una fascia di 1.5-2 km dalla linea di costa considerando i singoli intervalli di tempo (1943-1982; 1982-1998; 1998-2005; 2005-2018). Nello specifico si è valutato il tasso di urbanizzazione, le modifiche delle aree agricole e dell'estensione delle dune costiere nel tempo. Il tasso di infiltrazione è stato calcolato con il modello HYDRUS-1D per le diverse tipologie di suolo dominanti lungo costa: Cerba, San Vitale e Pirottolo.

Tra il 1943 e il 2018 l'infiltrazione si è ridotta del 69 % nelle aree agricole e del 88 % nelle dune costiere a seguito della riduzione di $3 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ dei campi agricoli e di $1.26 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ delle dune costiere. L'urbanizzazione è la principale causa del cambiamento dell'uso del suolo, in particolare dal dopoguerra in poi. La conseguente impermeabilizzazione ha fortemente compromesso l'infiltrazione delle acque piovane, modificando l'idrologia locale e la disponibilità di acqua dolce. Questa tesi ha quindi contribuito ad una ulteriore valutazione delle problematiche che caratterizzano l'acquifero freatico costiero, evidenziando la forte antropizzazione del territorio e contribuendo, con le medesime informazioni, alle future scelte di ricerca e gestione.

1. INTRODUZIONE

1.1 USO E CONSUMO DEL SUOLO

Il suolo è considerato una risorsa estremamente limitata, i tempi di formazione sono molto lunghi e per questa ragione può essere considerato una risorsa non rinnovabile, quindi un bene da trattare in maniera opportuna (ISPRA, 2015). Si tratta di un ecosistema essenziale, complesso, multifunzionale e di notevole importanza. Per quanto riguarda gli aspetti ambientali e socioeconomici, fornisce servizi vitali per la popolazione ma anche per la sopravvivenza degli ecosistemi (Parlamento Europeo,2021).

Il suolo in condizioni naturali fornisce all'uomo i servizi ecosistemici necessari al proprio sostentamento (Kumar et al., 2012):

- servizi di approvvigionamento (prodotti alimentari, biomassa, materie prime);
- servizi di regolazione (clima, stoccaggio del carbonio, fenomeni idrologici);
- servizi di supporto (habitat delle specie, conservazione della biodiversità);
- servizi culturali (patrimonio naturale, paesaggio, servizi ricreativi).

L'uso del suolo (Land use) rappresenta il risultato delle interazioni tra l'uomo e il suolo stesso, costituisce quindi la descrizione di come questo venga, o possa essere, impiegato dalle attività antropiche (SNPA,2022). La direttiva 2007/2/CE definisce l'uso del suolo classificando il territorio in relazione alla dimensione funzionale o alla destinazione di utilizzo socioeconomico (residenziale, industriale, agricolo, commerciale ecc.). Forme significative di cambiamento di copertura del suolo possono apportare alterazioni al sistema (SNPA,2022). *Il degrado del suolo*, infatti, rappresenta il fenomeno di alterazione delle funzioni, dovuto alla riduzione o addirittura alla perdita di produttività biologica ed economica per cause derivanti principalmente dalle attività antropiche (Oldeman et al., 1990). Il consumo di suolo può essere definito come l'aumento di aree artificiali nel tempo (EEA, 2021). È un fenomeno strettamente legato a dinamiche insediative e infrastrutturali ed è causato principalmente dalla costruzione di nuovi fabbricati, dall'espansione delle città e da tutte le strutture utilizzate per soddisfare i bisogni degli abitanti di un luogo. In altri termini, il territorio viene modificato trasformando una copertura naturale (suolo non consumato) in una copertura artificiale (suolo consumato).

Per *copertura del suolo (Land Cover)* si intende la copertura biofisica di una superficie, comprendente zone artificiali, aree agricole, boschi e foreste, aree semi-naturali, zone umide e corpi idrici, come definita dalla direttiva 2007/2/CE. Un importante distinzione può essere fatta tra coperture artificiali permanenti, costituite da strutture non facilmente removibili e opere di tipo reversibile. In questo ultimo caso sono state effettuate operazioni di rimozione dello strato vegetativo, asportazione o compattazione del terreno; queste sono dovute alla realizzazione di infrastrutture, cantieri, depositi, aree estrattive non rinaturalizzate o ad altre coperture che possono essere facilmente removibili (SNPA, 2022).

1.1.1 CONSUMO DI SUOLO NAZIONALE

In Italia, il consumo di suolo è in continuo aumento e trasforma il territorio nazionale con elevata velocità. Negli ultimi anni (2020-2021) le coperture artificiali hanno riguardato ulteriori 69.1 km², ovvero, circa 19 ettari al giorno di suolo modificato dall'uomo (SNPA,2022). Il consumo del suolo registrato negli anni 2020 e 2021 evidenzia valori massimi che non si riscontravano dal 2012 con una perdita di suolo di 17,3 ettari al giorno (SNPA,2022). Questi dati allontanano il Paese dagli obiettivi di azzeramento del consumo netto di suolo, evidenziando in modo preoccupante la situazione. La morfologia del territorio italiano non permette un utilizzo ben distribuito del suolo, solo il 59,55 % della superficie nazionale è utilizzabile per le costruzioni o per altri servizi; per questo motivo questa porzione di suolo presenta alta densità di sfruttamento con valori di 3,13 m² per ettaro (SNPA,2022).

Lo studio SNPA (Sistema nazionale per la protezione ambientale) evidenzia che la copertura artificiale nazionale corrisponde a 21.500 km² a cui devono essere aggiunti altri 624 km² costituiti da coperture di altro tipo, non permanenti. La Pianura Padana evidenzia il maggior grado di copertura, in particolare nel Veneto e in Lombardia; il fenomeno rimane comunque intenso lungo la costa adriatica (Figura 1).

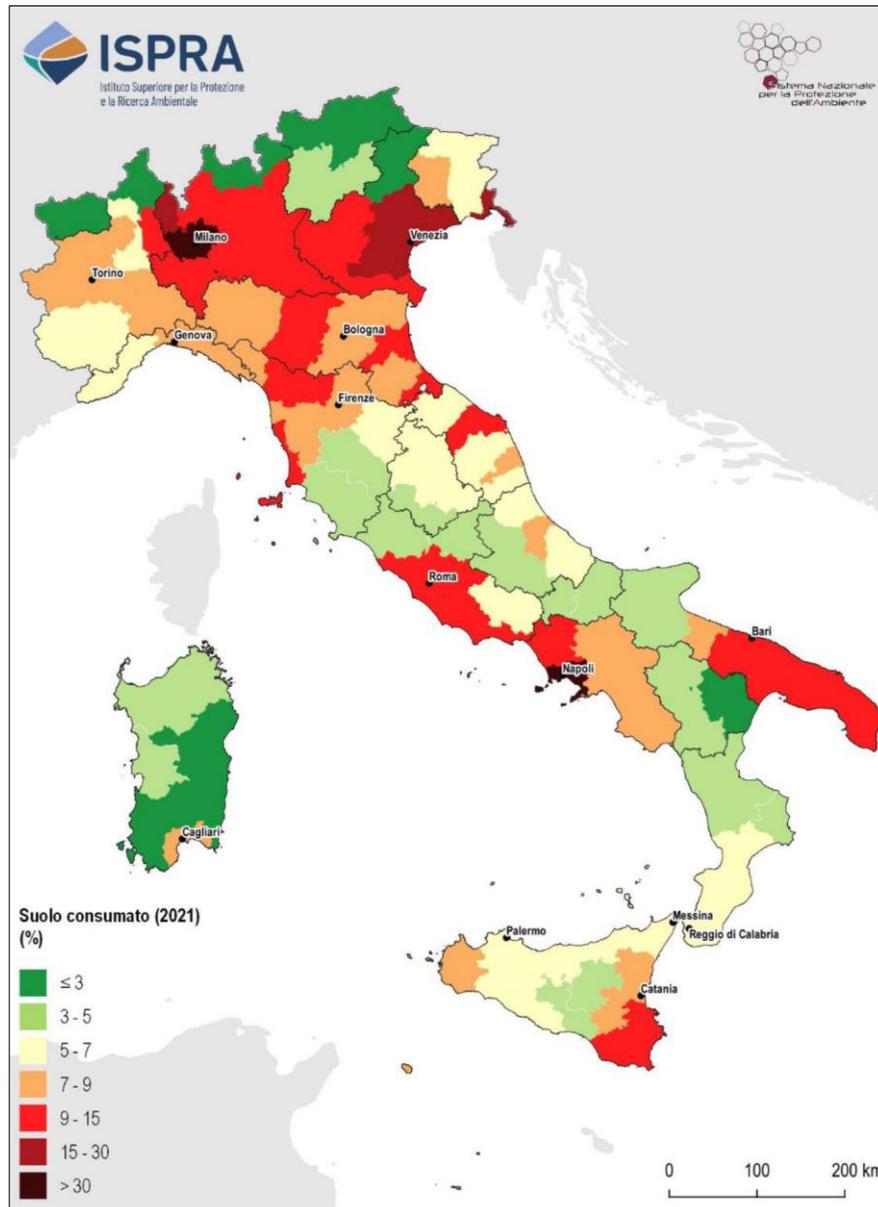


Figura 1. Suolo consumato a livello provinciale (SNPA, 2022).

Nel rapporto SNPA (2022), i dati dell'Emilia-Romagna evidenziano un consumo di suolo di circa l'8,90%, rispetto alla superficie totale (Figura 2). I dati regionali superano la media nazionale, e presentano un incremento di consumo di suolo pari a 658 ettari in più rispetto al 2020. In termini di incremento percentuale si evidenzia un andamento superiore alla media nazionale, con valori di 0,30% (SNPA, 2021).

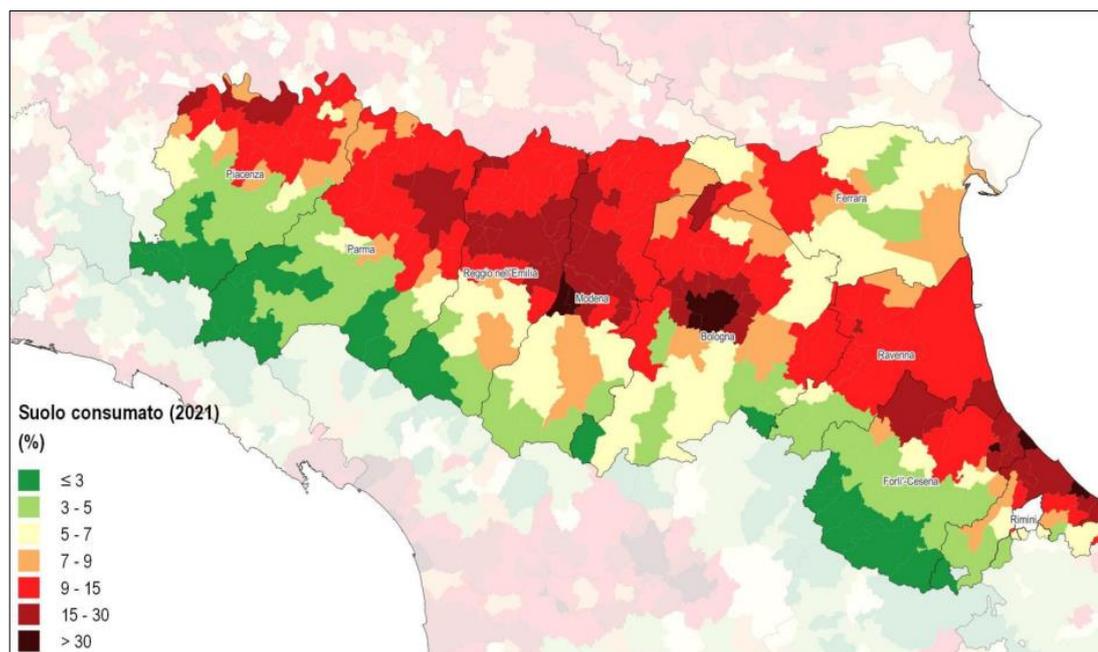


Figura 2. Suolo consumato a livello provinciale (SNPA, 2022).

Anche nella zona costiera emiliano-romagnola si riscontra la medesima problematica, con una distribuzione diversa a seconda delle località a cui facciamo riferimento e alla realtà che le costituisce. La parte meridionale è ampiamente urbanizzata, questo è stato causato dal turismo iniziato dopo il 1950. Oltre al turismo, il cambiamento dell'uso del suolo è stato causato dallo sviluppo delle industrie petrolifere e chimiche, situate in particolare nelle vicinanze del porto di Ravenna (Sekovski et al., 2015).

Sicuramente l'aumento demografico ha comunque contribuito all'evolversi della situazione. Nel grafico (Figura 3) si osserva che la provincia di Ferrara rientra tra le aree con minor utilizzo di suolo, seguita poi dalle località in direzione sud; Rimini presenta i valori più alti (<https://webbook.arpae.it/indicatore/Consumo-di-suolo-00001/?id=ef258eb9-6369-11e5-bf2c-11c9866a0f33>).

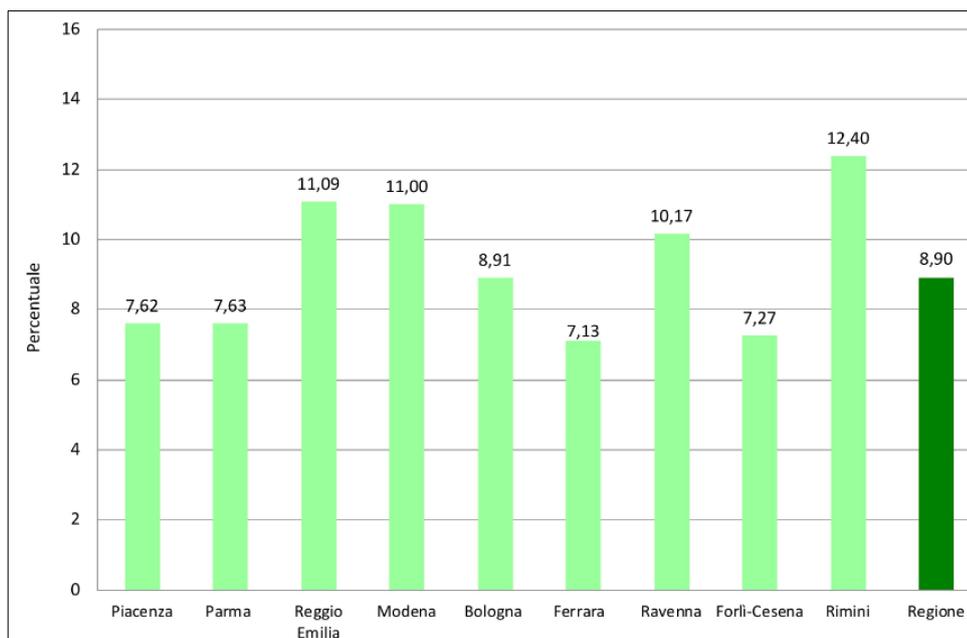


Figura 3. Percentuale di suolo consumato a livello provinciale (<https://webbook.arpae.it/indicatore/Consumo-di-suolo-00001/?id=ef258eb9-6369-11e5-bf2c-11c9866a0f33>).

1.2 CONSEGUENZE DEL CONSUMO DI SUOLO

Il suolo impiegato per l'urbanizzazione e la costruzione di strutture artificiali impermeabili, causa svariate problematiche ai servizi ecosistemici e quindi anche all'idrologia locale. Le coperture artificiali causano l'aumento del ruscellamento, la riduzione dell'infiltrazione e della ricarica dell'acquifero freatico con conseguente diminuzione della disponibilità di acqua dolce sia superficiale che sotterranea; inoltre, comporta l'aggravarsi di fenomeni di intrusione salina nella zona costiera (Sajikumar et al., 2015).

Il ruscellamento è strettamente legato al tipo di superficie che costituisce il bacino. A parità di intensità di precipitazione e di area si avrà un ruscellamento diverso in relazione all'uso del suolo. Un terreno impermeabilizzato per il 50% ha un tasso di deflusso cinque volte superiore rispetto ad un terreno naturale (Zullo et al., 2022). Un suolo perfettamente funzionante può immagazzinare fino a 3750 tonnellate di acqua per ettaro, ha una capacità che va da 100 a 300 l di fluido per m³ (Commissione europea 2012). Le modifiche apportate al suolo naturale riducono notevolmente la capacità di infiltrazione totale della superficie di un bacino avendo effetti negativi sulla ricarica degli acquiferi. Infatti, la portata di acqua infiltrata varia proporzionalmente al grado

di impermeabilizzazione (Zullo et al., 2022). Nei centri urbanizzati le superfici consentono infiltrazioni scarse o nulle, se non per parchi e giardini che hanno una maggiore capacità infiltrante; in ogni caso la ricarica degli acquiferi è compromessa. Anche la rimozione delle coperture vegetali riduce l'intercettazione delle acque piovane, la sostituzione della lettiera con superfici impermeabili o semi-permeabili causa fenomeni di ruscellamento ed evapotraspirazione compromettendo la ricarica della falda (Poelmans et al., 2010). Nella maggior parte dell'acquifero costiero emiliano-romagnolo, la tavola d'acqua è mediamente intorno a valori di 0 m s.l.m. con valori al di sotto del livello mare per ampie zone. La tavola d'acqua va da -6,1 a 2,4 m s.l.m., con valori minimi nella parte settentrionale e occidentale della provincia di Ferrara, e valori massimi nella parte meridionale della provincia di Rimini, con un valore medio di 1,7 m s.l.m. (Giambastiani et al., 2021).

Gli acquiferi situati in aree costiere, oltre a essere minacciati da una scarsa ricarica sono soggetti anche all'intrusione salina. Questo fenomeno avviene spontaneamente negli acquiferi costieri a causa della presenza di acqua salata, che essendo più pesante rispetto all'acqua dolce, si incunea verso l'interno dell'acquifero (Giambastiani et al., 2007). I due fluidi sono parzialmente miscibili costituendo zone di transizione o di diffusione con caratteristiche diverse a seconda dell'ampiezza dell'interfaccia (Tosi et al., 2011). Lungo la costa dell'Emilia-Romagna il progressivo aumento dell'attività antropica degli ultimi decenni ha destabilizzato, quasi del tutto, l'equilibrio idrostatico tra acqua dolce e acqua salata, provocando ovunque una risalita dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata (Antonellini et al., 2010).

1.3 OBIETTIVO DELLA TESI

Questa tesi vuole analizzare il territorio costiero dell'Emilia-Romagna al fine di riscontrare i cambiamenti antropici e naturali avvenuti dal 1943 al 2018 e capire come il cambiamento dell'uso del suolo, e nello specifico la riduzione delle aree agricole e la distruzione delle dune costiere, abbiano influito sull'infiltrazione e sulla ricarica efficace dell'acquifero freatico costiero. L'obiettivo principale è quello di dimostrare come la ricarica dell'acquifero costiero e il contenuto d'acqua nel suolo siano variati nel tempo come conseguenza del cambiamento del territorio.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO TERRITORIALE DELL'AREA DI STUDIO

L'acquifero costiero (Figura 4) si colloca ai margini della Pianura Padana e si estende per tutto il territorio costiero della regione Emilia-Romagna. L'area di studio si sviluppa dal delta del Po, nelle località di Goro, e si protrae in direzione sud fino a Cattolica. La superficie del territorio considerato misura $1.72 \cdot 10^6 \text{ km}^2$ con una lunghezza lungo costa di 135 km e una larghezza media di circa 15 km. I territori provinciali che ricadono al suo interno sono: Ferrara, Ravenna, Forlì-Cesena e Rimini.

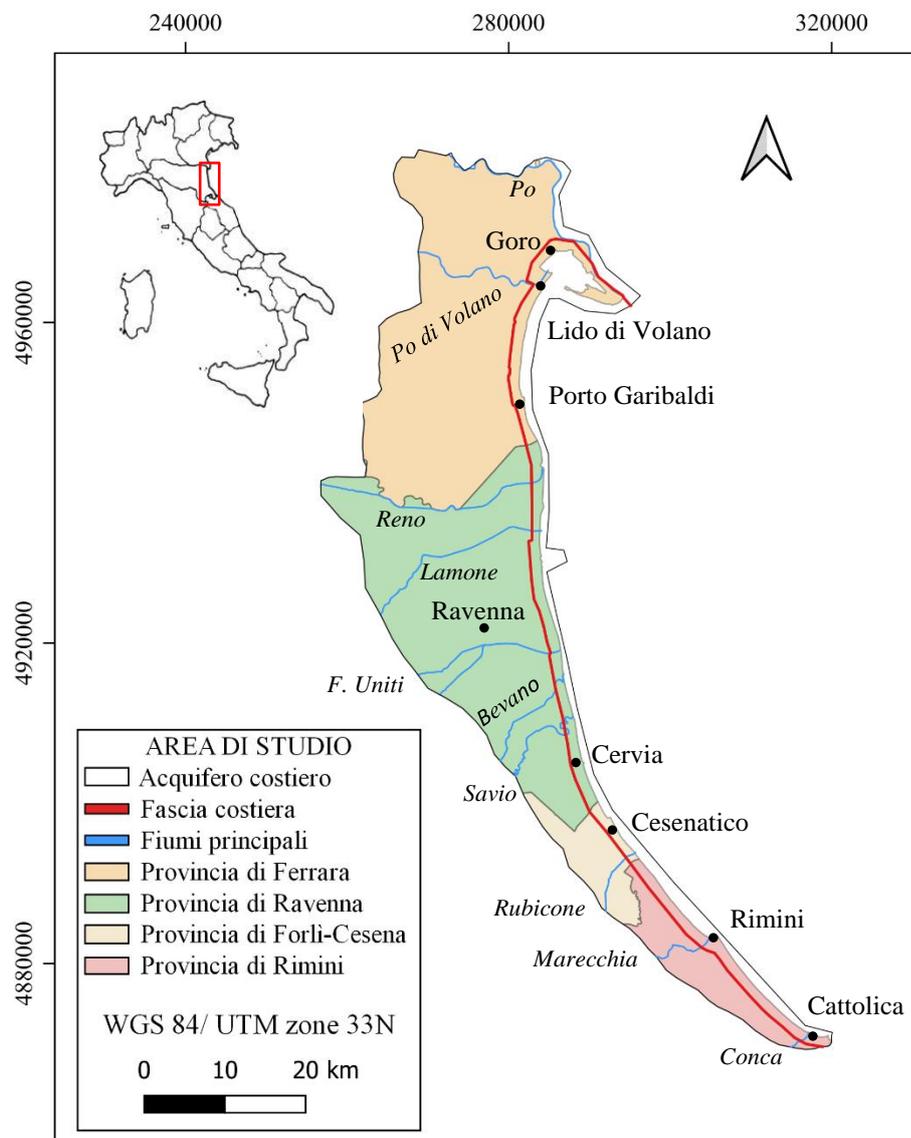


Figura 4. Inquadramento dell'area di studio.

Il litorale si affaccia sul bacino adriatico settentrionale ed è costituito da una costa bassa e sabbiosa, e da un sistema lagunare deltizio a sud del delta del Po. La topografia è prettamente pianeggiante; il territorio è costituito da quote altimetriche poco elevate e si riscontra la prevalenza di aree al livello medio del mare o al di sotto di quest'ultimo. Nell'area di studio la topografia varia da un minimo di -2 m s.l.m. ad un massimo di +3 m s.l.m. (Greggio et al.,2020). Le porzioni di territorio più elevate sono costituite dalle dune. In alcune zone, come Marina Romea, i dati LIDAR hanno rilevato che i cordoni dunosi delle pinete e del retroduna sono abbastanza elevati e raggiungono quote di 3 m sopra il livello del mare (Antonellini et al., 2010).

La topografia è compromessa dalla subsidenza che ha fortemente caratterizzato questo territorio soprattutto negli anni 1970 e 1980 durante i quali la pianura costiera emiliano-romagnola ha subito un importante abbassamento del territorio a causa del pompaggio di acque sotterranee e dall'estrazione di gas, con valori massimi di -110 mm/anno negli anni '70 e valori medi di -5/-10 mm/anno negli anni 80 (Teatini et al., 2005; 2006).

Attualmente la subsidenza totale media dell'area (naturale e antropica) è di -5 mm/anno (Gambolati & Teatini et al.,1998; Gambolati et al., 1991; Antonellini et al., 2019), con valori massimi di -15 mm/anno concentrati nella zona costiera intorno alla foce dei fiumi Uniti (ARPAE, 2018). La Figura 5 mostra i dati registrati tra il 2011 e il 2016.

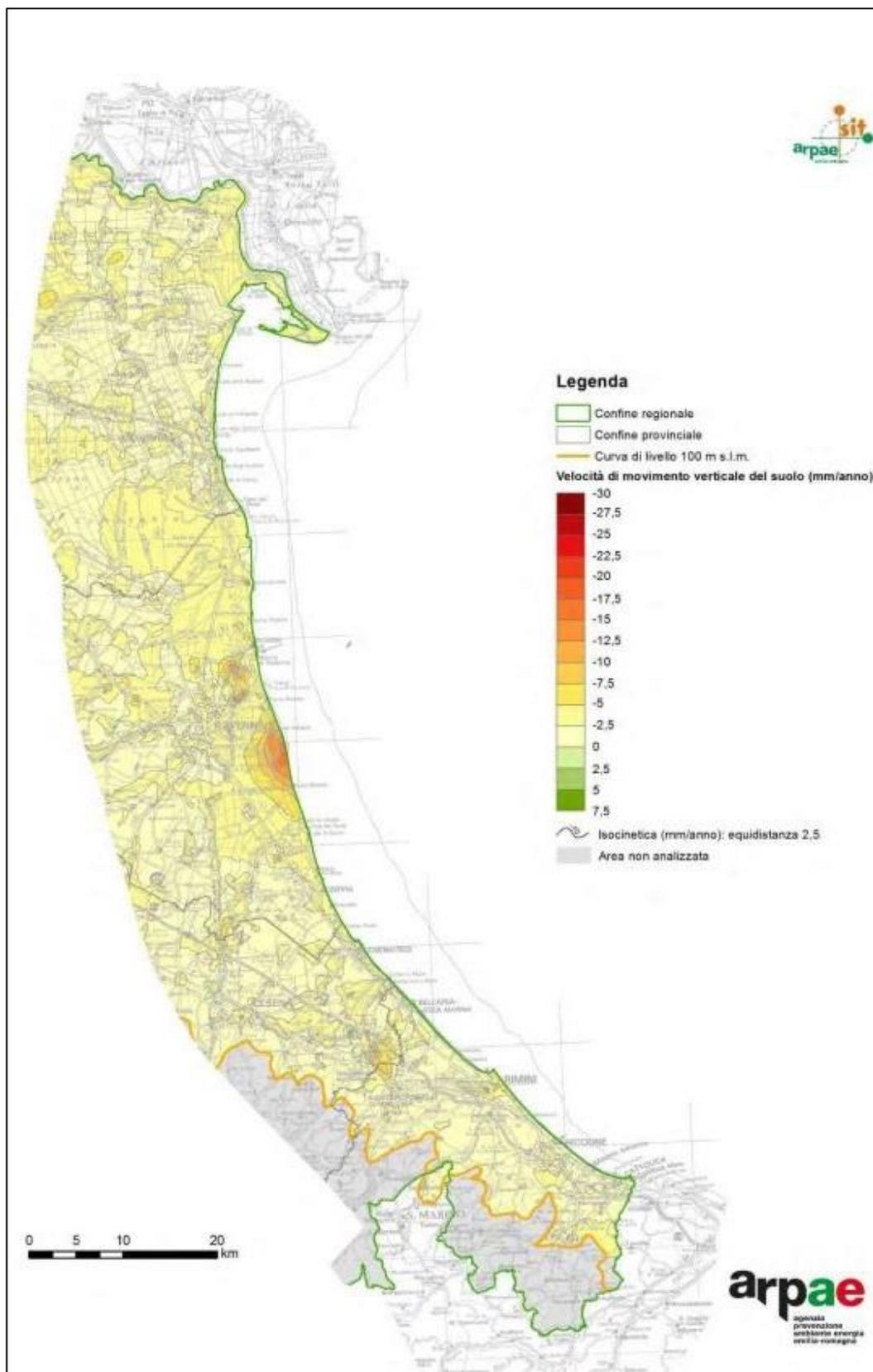


Figura 5. Subsidenza della zona costiera nel periodo 2011-2016 (ARPAE, 2018).

2.2 CLIMATOLOGIA

La zona costiera dell'Emilia-Romagna segue tre livelli disposti parallelamente da nord-ovest a sud-est con caratteristiche e conformazioni diverse che influiscono sul clima. Sulla base delle categorie climatiche di Köppen-Geiger il territorio costiero è caratterizzato da un clima subcontinentale (Nistor et al., 2016). Secondo la stessa classificazione il clima è identificato come *Cfa*; clima temperato umido con estati calde e inverni miti, di tipo mediterraneo (Mollema et al., 2015).

Nella zona costiera emiliano-romagnola (1989-2008) la precipitazione annuale media totale è stata di 635 mm, la temperatura media massima di 19 °C e la temperatura media minima di 8°C (Mollema et al., 2012).

2.3 CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA E IDROGEOLOGICA

L'assetto geomorfologico del margine orientale della Pianura Padana è strettamente legato alla sua evoluzione geologica che non è avvenuta in modo regolare, ma è attribuibile a numerosi fenomeni di sommersione ed emersione provocati dalle oscillazioni eustatiche del livello del mare. Questi continui fenomeni hanno generato un ambiente sedimentario costituito principalmente dall'alternanza di sedimenti continentali e marini; l'assetto geologico è quindi composto da sedimenti fluviali di origine alpina e appenninica, associati a sedimenti depositati dalle correnti lungo costa (Mollema et al., 2015).

Nel Periodo del Würmiano si verificarono una serie di regressioni che portarono il livello marino ad un centinaio di metri al di sotto di quello attuale, questi eventi trasformarono l'Adriatico settentrionale in una vasta pianura alluvionale (Giambastiani et al., 2007). Questa regressione è marcata da uno strato sedimentologico di circa 50 metri ed è costituito principalmente da limi argillosi con intercalazioni di sabbie e argille (Veggiani et al., 1974). Successivamente, intorno a 18000 anni fa, ebbe luogo una fase trasgressiva post-glaciale caratterizzata da una grande ingressione marina che ha raggiunto livelli massimi nel Flandriano (Trincardi et al., 1996), provocando un importante innalzamento delle acque.

La fase di alto stazionamento avvenne durante l'Optimum Climatico, quando si verificò un arretramento della linea di costa fino a 20 km verso l'interno rispetto alla

posizione attuale (Bondesan et al.,1995). Quest'ultimo evento seguito da regressione deposizionale ha prodotto un'ampia interdigtazione fra sedimenti marini e continentali (Amorosi et al., 2002).

I sedimenti superficiali della pianura emiliano-romagnola sono recenti, sono costituiti da deposizioni avvenuti negli ultimi 10000 anni e appartengono all'epoca olocenica. Parte di questi depositi costituiscono cordoni e dune sabbiose, risalgono a circa 2000 anni, e sono il risultato di oscillazioni minori del livello del mare (Amorosi et al.,1999).

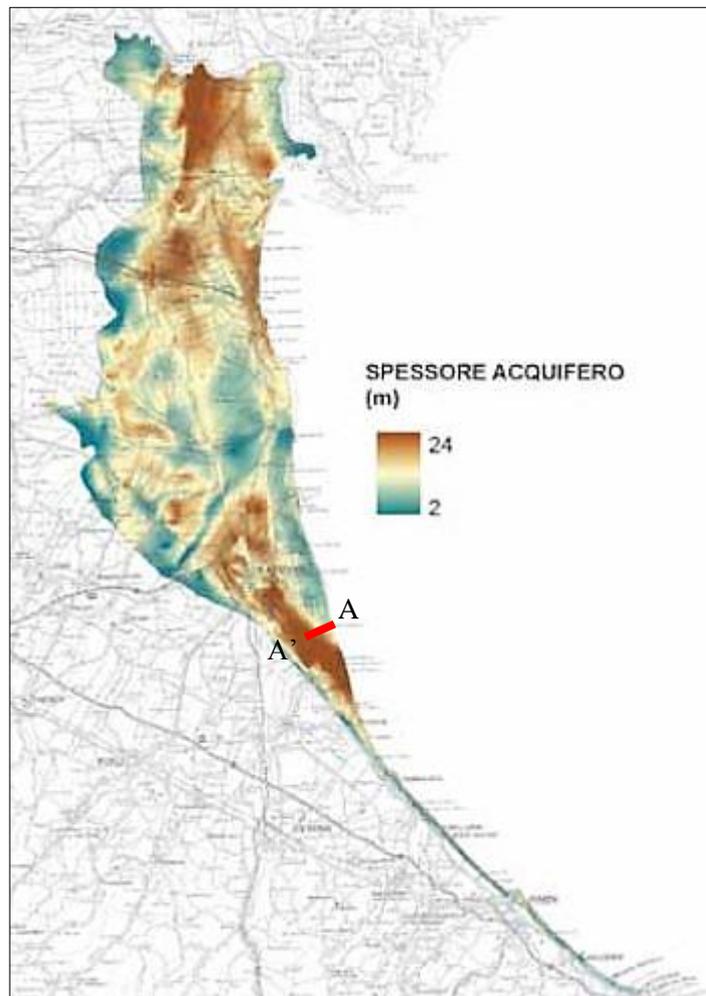


Figura 6. Acquifero costiero con sezione geologica riportata in Figura 7 (Bonzi et al., 2010).

L'acquifero costiero superficiale ha un'estensione di $1.72 \cdot 10^6 \text{ km}^2$; si sviluppa in direzione NS per circa 112 km e in direzione EO per 7 km e 27 km (distanza minima e massima) (Figura 6).

La sezione geologica dell'acquifero (Figura 7), orientata in direzione est-ovest, riporta gli strati litologici prospicienti alla foce del torrente Bevano, tra Lido di Dante e Lido di Classe.

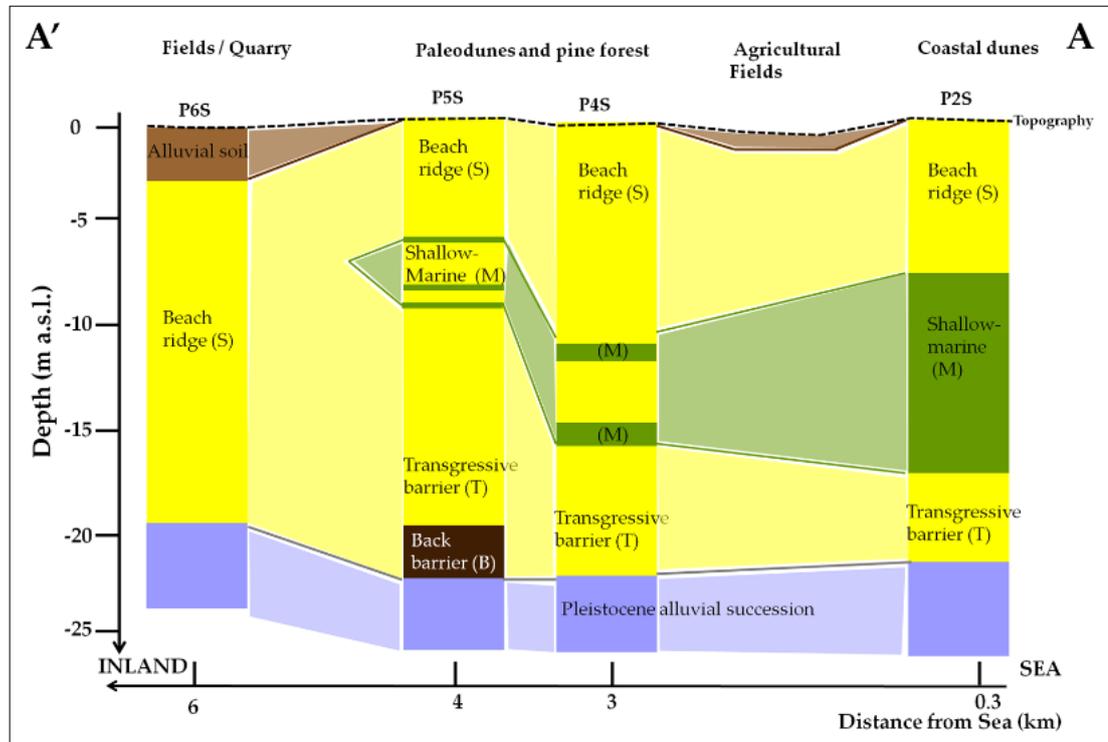


Figura 7. Sezione geologica dell'acquifero costiero superficiale (Greggio et al., 2020). Cfr. Figura 6 per la posizione del profilo.

L'acquifero è formato da due unità sabbiose principali. La prima (0 a -10 m s.l.m.) è costituita da un corpo sabbioso a grana media, corrispondente alla deposizione della dorsale di spiaggia. La seconda unità è sabbiosa ma a grana più fine (da -15 a -22 m s.l.m.) corrispondente alla deposizione trasgressiva. Al centro di queste è presente uno strato di 10 m di intercalazioni di argilla limosa, ricca di materia organica e corrispondente alla deposizione marina superficiale (Greggio et al., 2020). L'acquifero freatico costiero si trova principalmente all'interno delle sabbie litorali e nei depositi marini poco profondi (Giambastiani et al., 2021). La base dell'acquifero è situata sopra la successione alluvionale del Pleistocene con posizione media di -23 m s.l.m. (Greggio et al., 2020).

L'acquifero costiero (Figura 6) è propriamente freatico nel settore meridionale dove ha spessori minimi di 2 m, mentre nel settore centrale e settentrionale (verso ovest) è semi-confinato, con spessori massimi di 24 m; l'area in prossimità della costa è costituita da falda affiorante (Bonzi et al., 2010). Gli spessori presentano una notevole

variabilità. I massimi spessori si riscontrano nella zona centrale, in direzione nord-sud, nelle località prossime al fiume Po e tra Ravenna e Cervia. Spessori importanti sono presenti anche nella zona costiera in corrispondenza dei cordoni litoranei tra la foce del Fiume Reno e il Bosco della Mesola e in corrispondenza della cuspidè deltizia del Fiume Savio (Bonzi et al., 2010). Gli spessori minimi sono presenti principalmente nelle zone più a ovest, ma vengono riscontrati anche nelle località costiere orientali di Ravenna e Rimini (Bonzi et al., 2010).

2.3.1 SALINIZZAZIONE

L'acquifero costiero oltre alla complessità geologica, presenta delle problematiche a scala regionale legate ai fenomeni di salinizzazione delle acque superficiali e sotterranee che caratterizzano gran parte dell'acquifero costiero (Figura 8). Essendo al limite tra l'ambiente terrestre e quello marino, le acque costiere sono sede di mescolanza tra acqua dolce e salata (Greggio et al., 2020). Tra le principali cause si riscontrano: la topografia, il drenaggio, la subsidenza, la scarsa ricarica della falda acquifera e l'innalzamento del livello del mare.

Le acque dolci sono confinate nella parte più settentrionale lungo il fiume Po, a ovest di Ravenna, e nella zona più meridionale grazie alla ricarica dell'acquifero da parte dei corsi d'acqua principali (Po, Reno, Marecchia); il resto dell'acquifero presenta, in media, acque da salmastre a salate (Giambastiani et al., 2021). La porzione più salata coincide con le zone topograficamente più basse e i bacini costieri di bonifica tra Ravenna e Ferrara con valori medi di salinità di 33 mS/cm. La salinità è elevata (10-56 mS/cm) anche lungo la costa da Cervia a Cesenatico sia per la bassa topografia che per la risalita di acqua di mare lungo i canali portuali (Giambastiani et al., 2021).

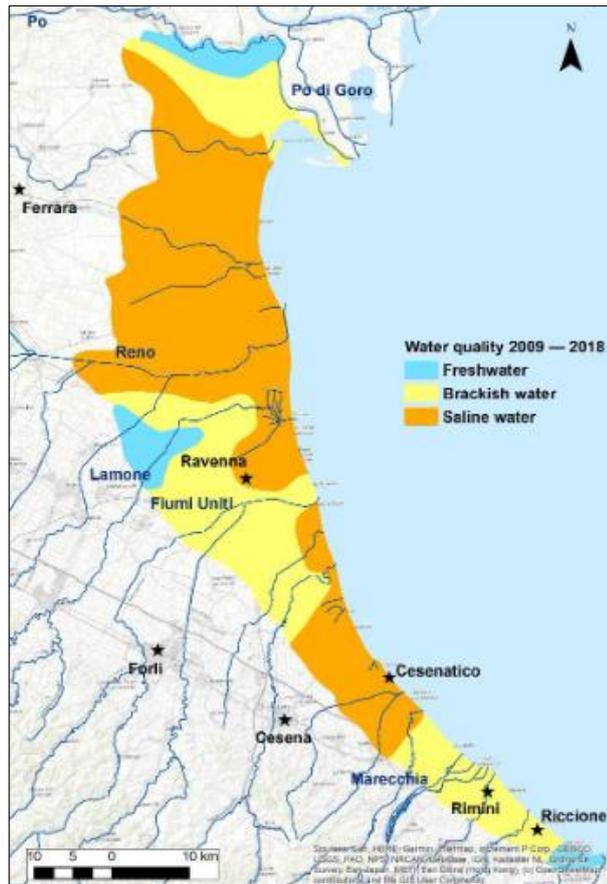


Figura 8. Mappa della distribuzione della salinità delle acque sotterranee nell'acquifero costiero emiliano-romagnolo. Per acque dolci si intendono acque con limite fino a 2,5 mS/cm, valori compresi tra 2,5 mS/cm e 10 mS/cm definiscono le acque salmastre, mentre le acque salate sono costituite da valori superiori a 10 mS/cm (Giambastiani et al., 2021).

2.4 PEDOLOGIA

Facendo riferimento alla Carta dei Suoli della Regione Emilia-Romagna in scala 1:50.000, l'area di studio è costituita da tipologie di suolo a tessitura variabile, da suoli argillosi-limosi a suoli sabbiosi con ubicazioni diverse a seconda del fenomeno naturale che li ha generati (Carta dei suoli RER,2021), (Figura 9).

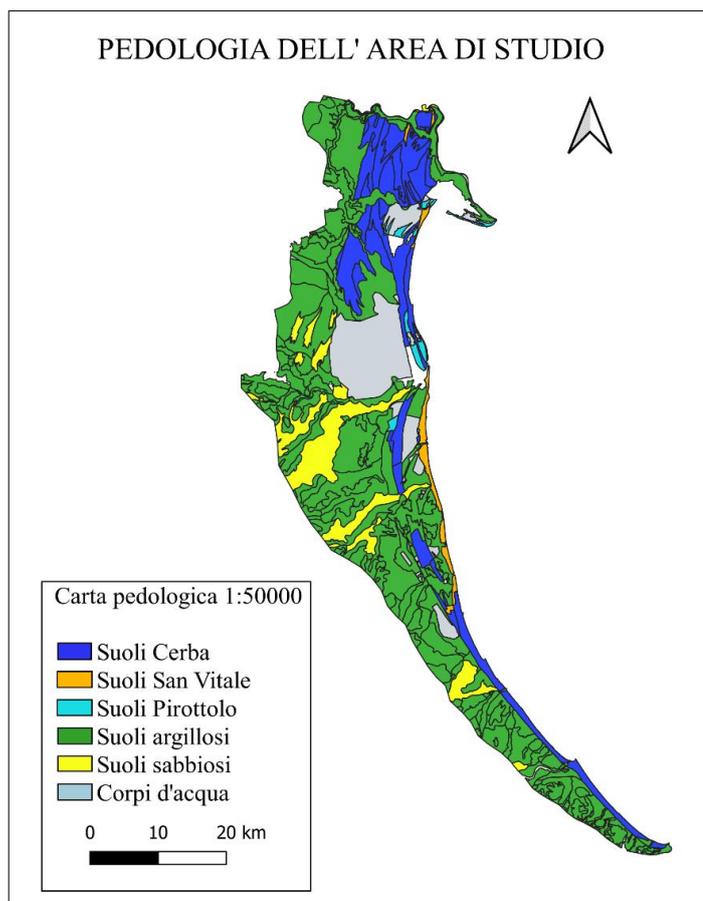


Figura 9. Carta pedologica modificata a partire dalla Carta dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (scala 1:50000, RER).

I suoli che costituiscono le aree di particolare interesse nel presente studio sono principalmente tre (Figura 10):

- *Cerba*: questi suoli rientrano nei *Endogleyic Arenosols (Calcaric)* secondo la classificazione WRB (2007) e nei *mixed, mesic Acquic Ustipsamments* secondo USDA (2010). Generalmente si trovano nella pianura costiera in zone morfologicamente intermedie dei cordoni dunosi; sono costituiti da tessitura prevalentemente sabbiosa, sono molto profondi e hanno un contenuto di calcare che varia da scarso a moderato. Il pH è neutro in superficie e poi alcalino negli orizzonti inferiori, mentre la sostanza organica è presente in forma limitata negli orizzonti superficiali. Il substrato è costituito da sedimenti marini a tessitura grossolana, nel complesso il suolo ha un'elevata capacità di accettazione delle acque piovane;
- *San Vitale*: sono classificati come *Haplic Arenosols (Calcaric)* secondo WRB (2007) mentre rientrano tra i *mixed, mesic Typic Ustipsamments* secondo

USDA (2010). Occupano la parte sommitale dei cordoni dunosi e hanno una tessitura prevalentemente sabbiosa. Questi suoli, in superficie hanno un contenuto scarso di calcare che tende ad aumentare in profondità, il pH varia da 7 a 8 e la sostanza organica è presente in buone quantità, specialmente in superficie. Anche i suoli San Vitale sono costituiti da un substrato marino a tessitura grossolana. Presentano alta capacità di accettazione delle piogge;

- *Pirottolo*: i suoli sono classificati come *Endogleyic Arenosols (Calcaric)* secondo WRB (2007) mentre vengono catalogati come *mixed, mesic Typic Psammaquents* secondo USDA (2010). Sono localizzati prevalentemente nelle zone di bassura e presentano una tessitura sabbioso fine. Sono suoli molto profondi, da scarsamente a moderatamente calcarei e il loro pH varia da 7.5 a 8.5. La sostanza organica risulta notevole in superficie e tende a diminuire in profondità, il substrato è costituito da sedimenti marini con tessitura grossolana. La capacità di accettazione delle piogge è alta, in questo tipo di suoli il livello della falda è alto e durante l'anno si possono osservare fenomeni di falda affiorante.

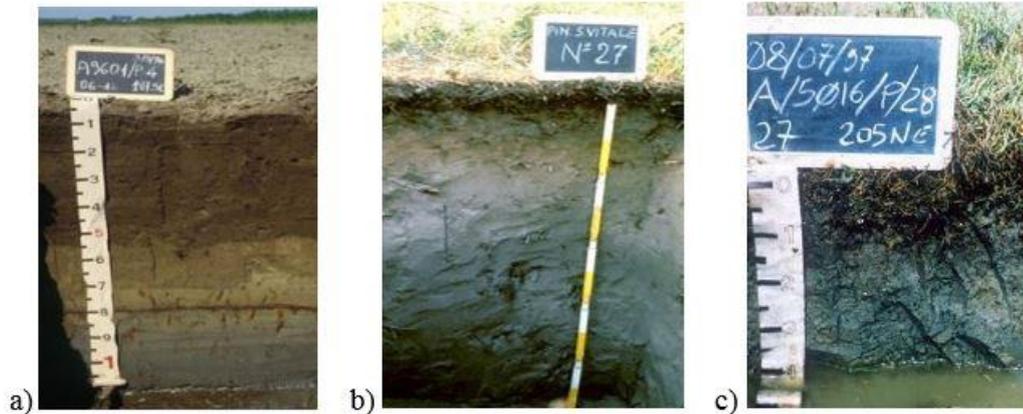


Figura 10. Profili rappresentativi dei suoli Cerba (a), San Vitale (b) e Pirottolo (c)

(https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=pedologia&bookmark=1%22).

2.5 USO DEL SUOLO

Il territorio costiero emiliano-romagnolo è costituito da un uso del suolo eterogeneo caratterizzato da superfici continuamente modificate dall'attività antropica. Nel 2005 circa il 29% del suolo era occupato da aree agricole eterogenee, il 33% da zone

urbanizzate, il 31% da aree naturali, il 5% da spiagge e solo il 2% da dune (RER, 2008). All'interno dell'abiotico artificiale prevale la componente impermeabilizzata che supera il 5% del territorio regionale, mentre le aree coltivate e naturali occupano il 57,27% (SNPA, 2022). Negli anni '60 l'eccessivo sviluppo costiero ha compromesso in modo rilevante il paesaggio e l'uso del suolo; la rapida urbanizzazione e i cambiamenti legati al boom del turismo sono le cause principali del consumo di suolo e della distruzione delle dune. La rapida crescita economica fece aumentare la domanda turistica e portò alla realizzazione di importanti infrastrutture (Sytnik & Stecchi et al.,2015).

Negli anni '80 si verificò una progressiva riduzione del cordone dunoso che nella maggior parte dei casi venne spianato per avere maggiore superficie adibita a spiaggia o per la costruzione degli stabilimenti (Perini et al., 2010). Tra le località costiere della regione, Marina di Ravenna fu quella che registrò il più alto livello di pressione dello sviluppo turistico sulle dune; nella stessa località, negli ultimi 60 anni, si stima una perdita di cordoni dunosi di circa 18 ettari (Sytnik & Stecchi et al.,2015).

Un'ulteriore modifica antropica del territorio è avvenuta a seguito della bonifica, per recuperare terreni agricoli (Mollema et al., 2013). A partire dal dopoguerra, le grandi bonifiche della pianura costiera hanno continuato a trasformare le aree naturali, allagate o semi allagate, in campi adibiti principalmente a seminativi, frutteti e vigneti. Anche in campo agricolo l'urbanizzazione continua ad essere una delle principali cause di cambiamento dell'uso del suolo.

2.6 IDROLOGIA SUPERFICIALE

La zona costiera emiliano-romagnola è costituita da un sistema idrografico molto articolato nel quale sono presenti corpi idrici naturali e canali artificiali. Lungo la pianura costiera oltre ai fiumi che sfociano nel Mar Adriatico, compresi quelli di natura torrentizia e i canali di scolo, sono presenti una serie di zone umide di notevole importanza naturalistica.

Il territorio costiero ferrarese e ravennate è costituito da un complesso sistema di canali artificiali che controllano il drenaggio del territorio e il deflusso delle acque a mare. I principali corpi idrici presenti nel territorio ferrarese sono: il fiume Po, che segna il confine regionale con il Veneto, il Po di Volano, il fiume Reno e le valli di Bertuzzi e

di Comacchio; aree umide di maggiore importanza sia in termini di estensione superficiale ma anche per aspetti ecologici e naturalistici.

Le Valli di Comacchio sono il più grande ecosistema lagunare del Delta del Po, le acque sono salmastre e hanno una profondità che varia da 0.5 a 1.5 m; il sistema è collegato al Mare Adriatico da due canali principali: il Porto Canale e il Logonovo (Munari et al., 2005). Il volume delle valli è di circa 10^8 m³ e il ricambio idrico è fortemente limitato, ciò comporta un tempo di permanenza di circa 115 giorni (Brath et al., 2000). Nella parte meridionale dell'area di studio il sistema fluviale è composto dal Reno, che ricade in parte nel territorio ravennate assieme al Lamone, Fiumi Uniti, Bevano, Savio, Rio, Mesola, Marecchia e da altri fiumi di natura torrentizia nel settore riminese. Tra le opere fluviali il Canale Emiliano Romagnolo (CER) è una delle più importanti strutture idrauliche, sia per la sua lunghezza che per l'importante funzione in quanto assicura l'approvvigionamento idrico alle province orientali della regione (<https://consorziocer.it/>).

Un altro corpo idrico che caratterizza la zona costiera ravennate è la Piallassa Baiona. Questa laguna salmastra, con un'estensione di circa 1100 ha, è costituita da aree semisommerse per gran parte collegate al mare e quindi sottoposte al naturale ciclo di marea. È costituita da una fitta rete di canali e chiari chiusi.

2.6.1 DRENAGGIO

Il territorio costiero emiliano-romagnolo, costituito da zone depresse, è drenato meccanicamente da impianti idrovori durante l'anno a seconda dei livelli stabiliti. Gli impianti hanno il compito di mantenere la falda freatica ad un livello prefissato (circa -1.5 m dal piano campagna) per garantire la coltivazione dei campi anche nelle aree più depresse e mantenere le radici degli alberi al di sopra della falda freatica costiera (Greggio et al., 2013). Questo tipo di intervento rappresenta un importante fattore che incide sulle dinamiche idrologiche dell'acquifero costiero, specialmente nelle aree in cui sono presenti maggiori criticità.

Il drenaggio causa una riduzione della ricarica efficace dell'acquifero costiero e riduce l'estensione delle lenti di acqua dolce che si formano lungo costa (Cozzolino et al., 2017; Soboyejo et al., 2021); spesso i volumi di acqua drenati artificialmente dagli impianti idrovori sono più grandi dei volumi di pioggia caduti nei singoli bacini costieri (Antonellini et al., 2010). La bonifica, oltre a controllare il livello della tavola

d'acqua, crea anche un gradiente verticale con conseguente risalita di acqua salata o ipersalina dal fondo dell'acquifero verso la superficie (Giambastiani et al., 2013; Giambastiani et al., 2021).

La subsidenza del territorio costiero va ulteriormente ad aggravare questa situazione, comportando un ulteriore incremento dei volumi drenati per compensare l'abbassamento del suolo, aumentando la vulnerabilità della zona costiera alla salinizzazione di acque e suolo.

3. METODOLOGIA

3.1 DATI METEOCLIMATICI

Per definire l'assetto meteoclimatico dell'area di studio, sono stati usati i dati giornalieri di precipitazione (mm) e temperatura (°C) per il periodo 1976-2018, accessibili dall'archivio online DEXTER di ARPAE (<https://simc.arpae.it/dext3r/>).

La raccolta dei dati è stata effettuata per le province di Ferrara (14 stazioni), Ravenna (3 stazioni) e Cattolica (6 stazioni).

Per la serie storica di Ravenna sono stati utilizzati i dati della stazione dell'Agenzia Sperimentale Marani (1976-2000); data la non continuità dei dataset delle tre province considerate i dati sono stati integrati utilizzando le stazioni meteo più vicine distribuite nell'area costiera (Figura 11). L'analisi complessiva ha lo scopo, oltre che di caratterizzare l'andamento meteoclimatico della zona costiera, anche di selezionare l'anno di riferimento medio, individuato grazie alla ricostruzione della curva *CRD - Cumulative Rainfall Departure Curve*.

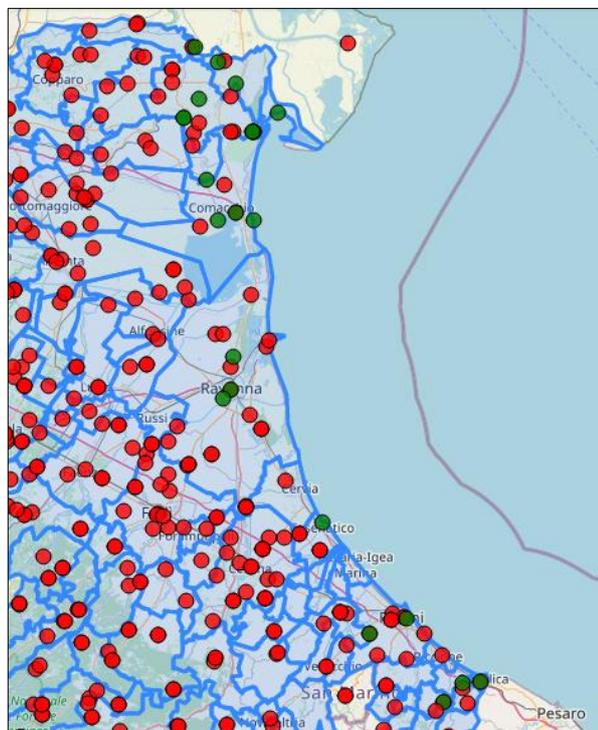


Figura 11. Stazioni meteo del database DEXTER di ARPAE; in colore verde le stazioni meteo costiere utilizzate nel presente studio.

La curva *CRD* è usata per caratterizzare le tendenze delle precipitazioni nel periodo di riferimento attraverso l'analisi distribuzionale dei periodi piovosi e secchi. Il grafico viene costruito utilizzando la media delle precipitazioni e la deviazione cumulativa dalla media (McCALLUM et al., 2009). Confrontando le precipitazioni annue e la media delle piogge dell'intero periodo è possibile individuare l'anno medio di riferimento da utilizzare per le simulazioni numeriche con Hydrus.

3.2 CAMBIAMENTO DELL'USO DEL SUOLO

Per determinare il cambiamento dell'uso del suolo dell'intera area di studio sono state utilizzate le carte dell'uso del suolo (1976 e 2017) fornite dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna.

Nella tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle cartografie utilizzate.

Tabella 1. Cartografia utilizzate per lo studio del cambiamento dell'uso del suolo a scala dell'intero acquifero costiero (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo>).

Anno	Anni di ripresa	Fonte	Minima unità cartografabile	Sistema di Classificazione	Livelli	Numero categorie
1976	1971- 1978 In prevalenza 1976	foto aeree a colori Scala 1:13.500	0.375 ha	Riclassificato secondo Corine Land Cover	3	29
2017	2017	ortofoto TeA 2017 a colori ed infrarosso Scala 1:10.000	0.16 ha	Corine Land Cover primi 3 livelli, CISIS per il 4°	4	90

I dataset dei due anni sono stati sovrapposti in modo da individuare i cambiamenti dell'uso del suolo; è stato quantificato il tasso di trasformazione con l'utilizzo delle cinque classi di uso del suolo (COD_1):

- CLASSE 1: Superfici artificiali (zone residenziali a tessuto continuo e discontinuo, zone industriali, commerciali ed infrastrutturali, zone estrattive, cantieri, discariche, zone verdi artificiali non agricole).

- CLASSE 2: Aree agricole (seminativi irrigui e non irrigui, colture permanenti, prati stabili e zone agricole eterogene);
- CLASSE 3: Territori boscati e semi-naturali (zone boscate, zone caratterizzate da vegetazione arbustiva o erbacea, zone aperte con vegetazione rada o assente);
- CLASSE 4: Zone umide (zone umide interne, zone umide marine);
- CLASSE 5: Corpi idrici (acque continentali e acque marittime).

Lo studio dell'uso del suolo è stato effettuato con strumenti GIS (*Geographic information system*). Entrambe le carte dell'uso del suolo (1976 e 2017) sono state analizzate con l'algoritmo SCP (*semi-automatic classification plugin*); questo strumento ha diverse applicazioni. In questo studio, il plugin è stato utilizzato per quantificare sia in termini estensionali che percentuali la superficie del territorio appartenente ad ogni classe di uso del suolo. Con questa metodologia il plugin ha sommato tutti i poligoni dello stesso colore presenti nelle carte dell'uso del suolo della RER, restituendo i valori estensionali (m²) e percentuali per le cinque classi di uso del suolo considerate.

Successivamente, lo stesso plugin è stato utilizzato per confrontare le carte di uso del suolo (1976-2017), analizzando il cambiamento dei poligoni e generando un nuovo stato informativo; questo riporta il cambiamento dell'uso del suolo secondo la seguente classificazione:

- INVARIATO: tutte le aree del territorio che non hanno subito modifiche di uso del suolo dal 1976 al 2017;
- DEFORESTAZIONE: tutte le aree di Classe 3 che sono mutate nelle Classi 2,4 e 5;
- FORESTAZIONE: tutte le aree che si sono trasformate in Classe 3;
- MODIFICA AREE AGRICOLE: tutte le aree che dalle Classi 1,4 e 5 sono passate alla Classe 2;
- URBANIZZATO: tutte le aree che vengono convertite in Classe 1;
- ALTRO: tutte le aree costituite dalle Classi 4 e 5.

I dati ottenuti sono stati elaborati tramite di fogli di calcolo Excel per produrre le tabelle con i valori percentuali degli usi del suolo e i relativi istogrammi. Per ciascuna delle cartografie è stata calcolata la percentuale costituente le 5 classi, mentre per

l'intervallo di tempo (1976-2017) sono state definite le variazioni totali e i tassi di variazione annua percentuale per ciascuna delle classi (Corticelli et al., 2010).

$$\Delta_{tot} = \frac{Classe_x(anno_1) - Classe_x(anno_0)}{Classe_x(anno_0)} * 100 \quad (1)$$

$$\Delta_{annuo} = \frac{\Delta_{tot}}{(anno_1) - (anno_0)} \quad (2)$$

Secondo lo stesso metodo è stato calcolato l'indice di artificializzazione percentuale totale e annuo, al fine di evidenziare l'aumento dell'urbanizzato (Classe 1) rispetto alla superficie totale dei due anni di confronto.

$$I_{art} = \frac{Classe1(anno_1) - Classe1(anno_0)}{Sup_{tot}} * 100 \quad (3)$$

$$I_{art\ annuo} = \frac{I_{art}}{(anno_1) - (anno_0)} \quad (4)$$

Dopo questa prima analisi, per determinare l'effetto del cambiamento di uso del suolo sulla ricarica dell'acquifero costiero si è passati ad uno studio di dettaglio della fascia costiera. Sono state utilizzate le carte dell'uso del suolo degli anni 1943, 1982, 1998, 2005 e 2018 (Tabella 2) realizzate dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna per lo sviluppo del Sistema Informativo del Mare e della Costa (<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/sistema-informativo-del-mare-e-della-costa-sic>). Nell'ambito dello sviluppo di tale sistema, la cartografia costiera è stata realizzata a scala di dettaglio (1:5000) per un'ampiezza pari a 1,5 km dalla linea di costa e per una lunghezza di 120 km compresa tra Goro e Cattolica (Uso Del Suolo dell'area Costiera RER, 2008), come mostrato in mostrato in Figura 4. Si tratta di cartografia tematica di base che rappresenta lo stato di utilizzo del territorio costiero, riportando importanti tematismi come l'assetto e la tipologia delle dune e la distribuzione degli stabilimenti balneari. L'interpretazione si fonda su 5 classi principali (superfici artificiali, agricole, boscate ed ambienti seminaturali, ambiente umido, e ambiente marino costiero) e si sviluppa per successivi livelli di

dettaglio fino a raggiungere 26 classi, identificative tra l'altro dell'assetto geomorfologico della spiaggia emersa (Tabella 3). Le carte sono state convertite tutte nel sistema di riferimento WGS 84/UTM zone 33N. Solo per la carta dell'anno 2018, non ancora ufficialmente pubblicata e validata dal Servizio Regionale, si è dovuti procedere ad un'integrazione delle geometrie relative ai cordoni dunosi. In alcuni casi si è resa necessaria la digitalizzazione e correzione di alcuni poligoni con il successivo ricalcolo delle aree tramite i tool di *Digitize* e *Fix geometry* in QGIS.

Tabella 2. Cartografia utilizzata per lo studio del cambiamento dell'uso del suolo (evoluzione delle aree agricole e dell'estensione delle dune costiere) per la fascia costiera (<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo>). Note: la carta del 2018 non è ancora ufficialmente pubblicata, gentile concessione della Regione Emilia-Romagna per questo studio.

Anno	Anno di ripresa	Fonte	Descrizione
1943	1943-1944	ortofotopiano Volo RAF	Immagini in scala di grigi da foto aeree in ortoproiezione digitale con pixel di 50 cm
1982	1982	ortofotopiano Volo Costa 1982	immagini a colori tra (RGB) da ripresa aerofotogrammetrica in ortoproiezione digitale con pixel medio di 70 cm
1998	1998 -1999	Ortofotopiano Volo IT2000 (Costa)	immagini a colori da foto aerea in ortoproiezione digitale con pixel medio di 1 m
2005	2005	ortofotopiano Volo Costa 2005	immagini a colori (RGB) da ripresa aerofotogrammetrica in ortoproiezione digitale con pixel di 50 cm
2018	2018	Ortofoto CGR 2018 IR	ortoimmagini a quattro bande visualizzabili a colori all'infrarosso con pixel medio di 30 cm

Tabella 3. Legenda utilizzata per la classificazione delle carte dell'uso del suolo dell'intera area costiera emiliano-romagnola (RER, 2008).

Superfici artificiali	Superfici agricole	Superfici boscate ed ambienti seminaturali	Ambiente umido	Ambiente marino costiero
Zona urbanizzata	Area agricola eterogenea	Vegetazione arborea	Zona umida inondata	Duna attiva
Area portuale	Meandro abbandonato coltivato	Vegetazione sparsa	Zona umida non inondata	Duna semi-stabilizzata
Terreni Rimaneggiati		Verde urbano	Laguna	Duna stabilizzata
Area di Cava		Argine e golena	Corpo idrico	Beach ridge
Argini artificiali			Corpo idrico di interduna	Spiaggia emersa libera
Foce armata			Darsena	Spiaggia con infrastrutture
			Corsi d'acqua	Ventaglio di Washover

Quest'analisi ha permesso di ricostruire la variazione areale delle aree agricole e delle dune costiere nei diversi intervalli di tempo. Per ciascun anno, infatti, si sono isolate e considerate solo le aree agricole, costituite dal territorio adibito ai vari usi agricoli con colture di diverso tipo, e i sistemi dunali, costituiti dalle dune con diversi livelli di maturità, tralasciando gli altri campi (Tabella 3). La scelta è stata motivata dal fatto che fra tutti gli usi del suolo, le aree agricole e i cordoni dunosi possono essere considerate le uniche aree dove avviene la ricarica efficace dell'acquifero freatico costiero (Cozzolino et al., 2017), ovvero dove le precipitazioni possono infiltrare e percolare attraverso la zona vadosa, fino a raggiungere la tavola d'acqua. Le superfici artificiali (urbanizzato, opere artificiali, etc.) sono zone di superficie impermeabilizzata, non idonea all'infiltrazione e alla ricarica della falda (Corretero & Kruse et al., 2017). Le zone boschive, che nel caso dell'area di studio sono costituite prevalentemente da pinete, riducono l'effettiva ricarica dell'acquifero a causa dell'evapotraspirazione e dall'intercettazione delle precipitazioni da parte della

chioma e del fogliame (Cozzolino et al.,2017). La traspirazione di un singolo albero, della maggior parte delle specie arboree, varia dai 10 ai 200 l/giorno di acqua; quella del pino (*Pinus Pinea*) è di 10-30 l/giorno (Mollema et al.,2013).

3.3 CALCOLO DELL'INFILTRAZIONE

Per il calcolo dell'infiltrazione sono state definite le aree di infiltrazione tramite un'analisi spaziale con il tool *Intersect* di QGIS che ha permesso di intersecare la cartografia dell'uso del suolo (estensione delle aree agricole e dei cordoni dunosi) dei diversi anni con la pedologia.

Per la finalità di questo studio, i suoli costieri (Figura 9) sono stati raggruppati in due categorie, suoli argillosi e sabbiosi. I suoli argillosi sono costituiti dalla frazione legante composta da particelle $< 2 \mu\text{m}$ e dalla frazione inerte con dimensioni $> 2 \mu\text{m}$ (Polidori et al., 2005). Le caratteristiche di microporosità, bassa permeabilità e alta ritenzione idrica non permettono un flusso ottimale delle acque verso la falda. I suoli sabbiosi, molto abbondanti nei primi chilometri di costa, invece, presentano un'alta permeabilità e permettono un'infiltrazione e percolazione ottimale verso la falda. Per queste caratteristiche sono gli unici suoli considerati nell'analisi dell'infiltrazione. Dai confronti effettuati le aree agricole e i cordoni dunosi sono costituiti principalmente dai suoli Cerba, San Vitale e Pirottolo; parte di queste classi ricadono su altri suoli che non sono stati considerati per il calcolo dell'infiltrazione (Figura 12).

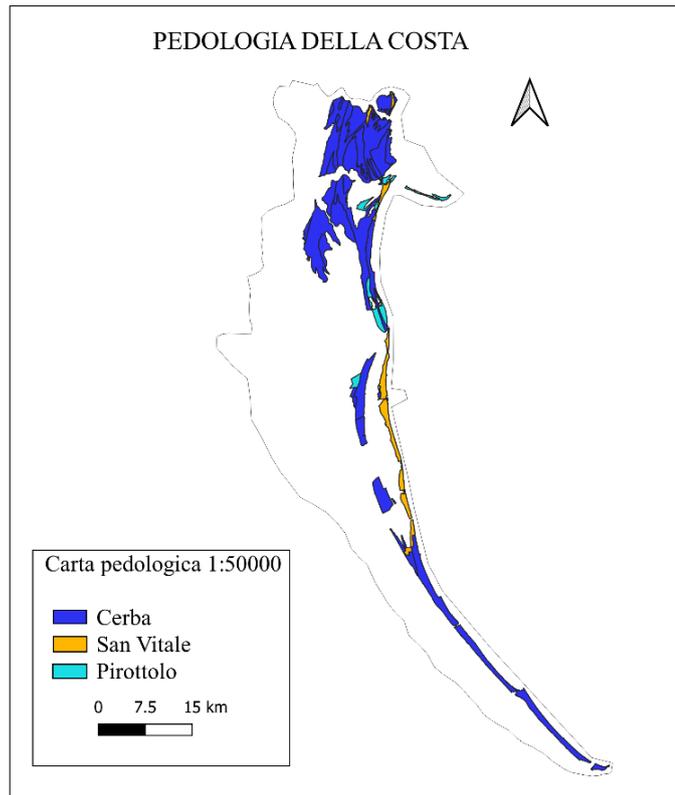


Figura 12. Carta pedologica modificata a partire dalla Carta dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (scala 1:50000, RER).

3.3.1 HYDRUS 1D

Per simulare e calcolare l'infiltrazione che avviene nei diversi suoli costieri considerati, si è utilizzato il codice numerico Hydrus-1D che permette la modellizzazione monodimensionale del flusso di acqua, di soluto o di calore in mezzi con caratteristiche variabili. Il programma risolve numericamente l'equazione di Richards per il flusso idrico saturo-insaturo e può essere utilizzata per mezzi porosi insaturi, parzialmente saturi o completamente saturi, per suoli uniformi o non uniformi (Manuale Hydrus-1D, 2013). In generale, le applicazioni considerano condizioni al contorno di breve o lungo periodo con particolare attenzione al calcolo del bilancio idrico del suolo e della ricarica delle acque sotterranee (Manuale Hydrus-1D, 2013). In questo studio si è simulato l'infiltrazione nella zona vadosa dei 3 suoli di riferimento: Cerba, Pirottolo e San Vitale. Ciascun suolo è stato discretizzato in colonne 1D (Figura 13) di materiale omogeneo e profondità variabile sulla base delle caratteristiche pedologiche dei suoli.

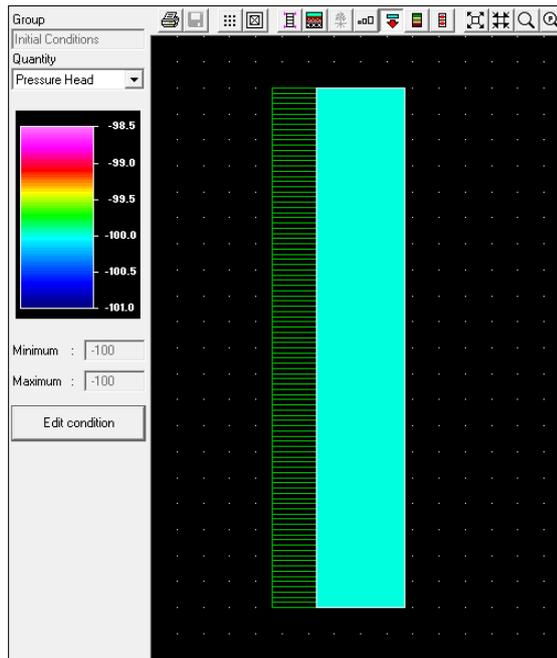


Figura 13. Profilo grafico 1D della colonna di suolo.

I principali parametri utilizzati come input per le elaborazioni sono riportati in Tabella 4; questi identificano le caratteristiche dei tre suoli e le condizioni climatiche al contorno.

Tabella 4. Parametri utilizzati per le elaborazioni Hydrus 1D. (Qr: Residual soil water content; Qs: Saturated soil water content; Alpha: Parameter a in the soil water retention function [L^{-1}]; n: Parameter n in the soil water retention function; Ks: Saturated hydraulic conductivity, K_s [LT^{-1}]; I: Tortuosity parameter in the conductivity function [-]).

Variabile	Suoli Cerba	Suoli San Vitale	Suoli Pirottolo
Spessore (cm)	100	90	65
Qr	0.045	0.045	0.057
Qs	0.43	0.43	0.41
α (1/cm)	0.145	0.145	0.124
n	2.68	2.68	2.28
Ks (cm/d)	313	1044.67	801.29
I	0.5	0.5	0.5
Tempo (d)	365		

Latitudine	44.5
Altitudine (m)	5
T. max (°C)	-1 ÷ 38
T. min (°C)	-7.3 ÷ 21.5
Umidità (%)	57 ÷ 81
Vento (km/d)	240 ÷ 312
Ore di sole	4.8 ÷ 12.9
Precipitazioni (cm/d)	0 ÷ 4.31

I flussi di evapotraspirazione sono stati valutati automaticamente dal programma attraverso l'utilizzo dell'equazione Penman-Monteith raccomandata dalla FAO e riconosciuta come evapotraspirazione di riferimento (Figura 14).

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (Rn - G) + \gamma (900 / T_k) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)}$$

ET_0 = evapotraspirazione di riferimento (mm d⁻¹)
 Δ = pendenza della curva che esprime la tensione di vapore saturo in funzione della temperatura (kPa °C⁻¹)
 Rn = radiazione netta (MJ m⁻² d⁻¹)
 T_k = temperatura assoluta media a 2 m dal suolo (°K)
 U_2 = velocità del vento a 2 m dal suolo (m s⁻¹)
 G = flusso di calore dal suolo (MJ m⁻² d⁻¹)
 $e_a - e_d$ = deficit di pressione di vapore dell'aria (kPa)
 γ = costante psicrometrica (kPa °C⁻¹)

Figura 14. Equazione Penman-Monteith per il calcolo dell'evapotraspirazione.

Per ciascuna simulazione il modello ha restituito come output il contenuto giornaliero di acqua al centro della colonna e alla sua base; questi punti di osservazione (nodi) sono stati stabiliti durante l'elaborazione (Figura 15). Inoltre, il modello ha restituito il valore cumulativo dell'infiltrazione a fine anno.

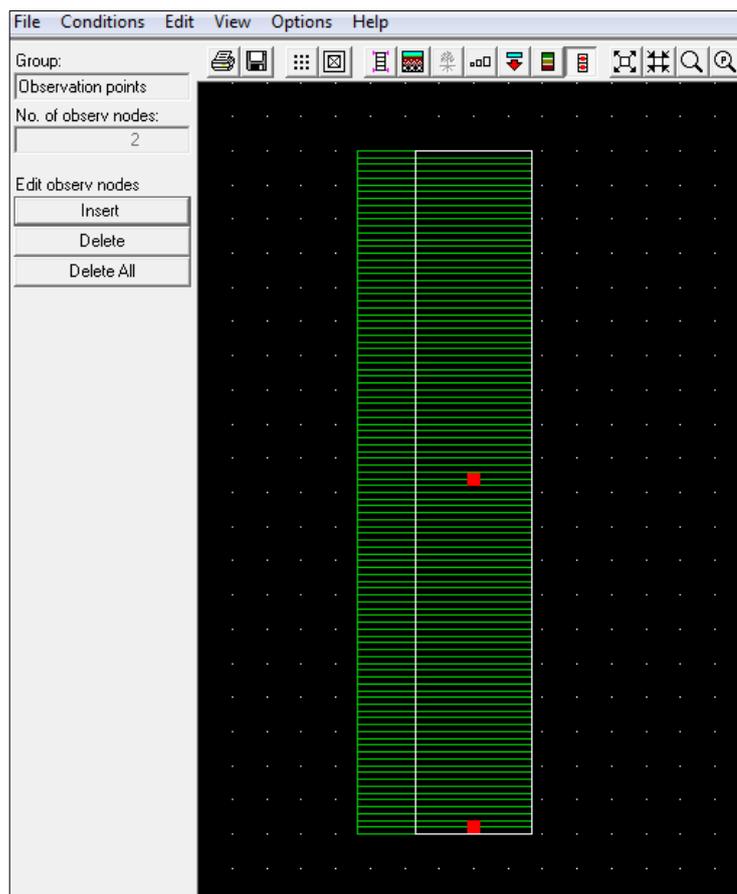


Figura 15. Punti di osservazione (Nodo 50 e nodo 100).

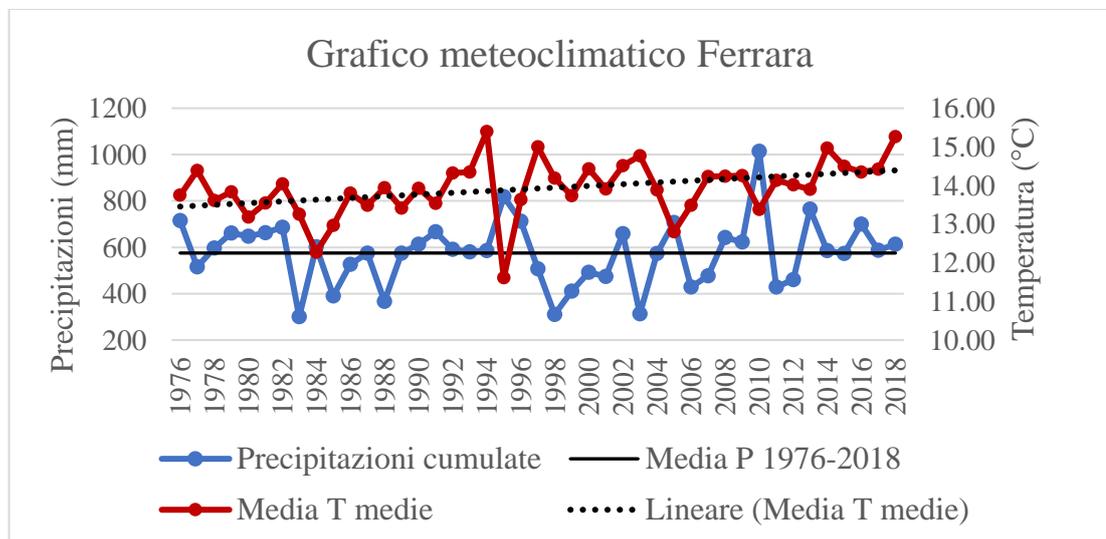
Per le simulazioni si è considerato un periodo di un anno con intervalli temporali di 10 giorni; per i dati di input delle precipitazioni e temperature si è considerato il 1992 come anno di riferimento poiché considerato l'anno medio sul periodo 1976-2018 come descritto nel paragrafo 3.1.

Infine, i valori di infiltrazione ottenuti per le 3 tipologie di suolo sono stati convertiti e moltiplicati per l'estensione areale dei cordoni dunosi e delle aree agricole per i singoli anni di riferimento, permettendo di calcolare la ricarica totale della falda costiera e la sua evoluzione nel periodo 1943-2018 in relazione al cambiamento dell'uso del suolo.

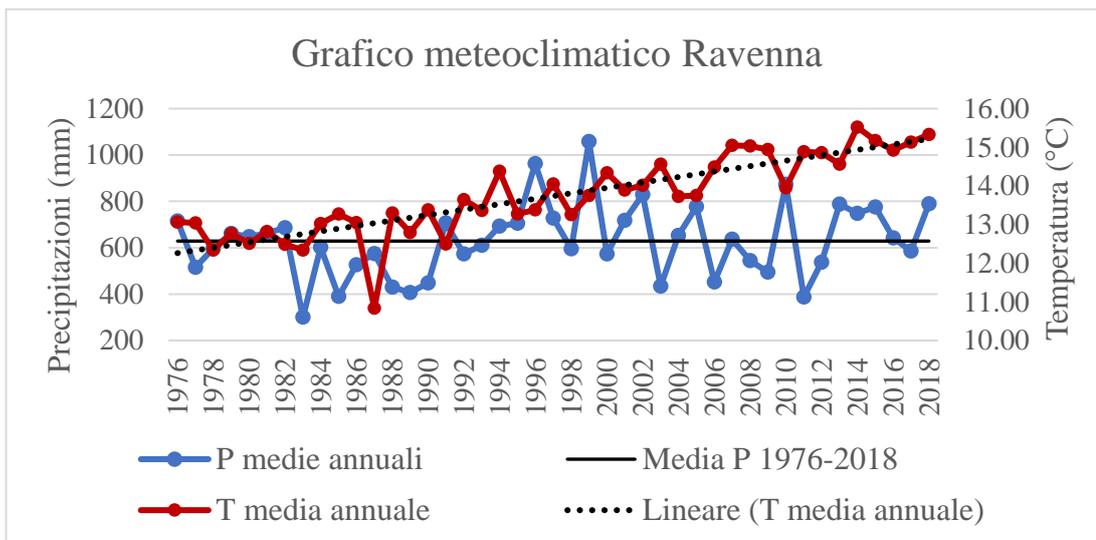
4. RISULTATI

4.1 DATI METEOCLIMATICI

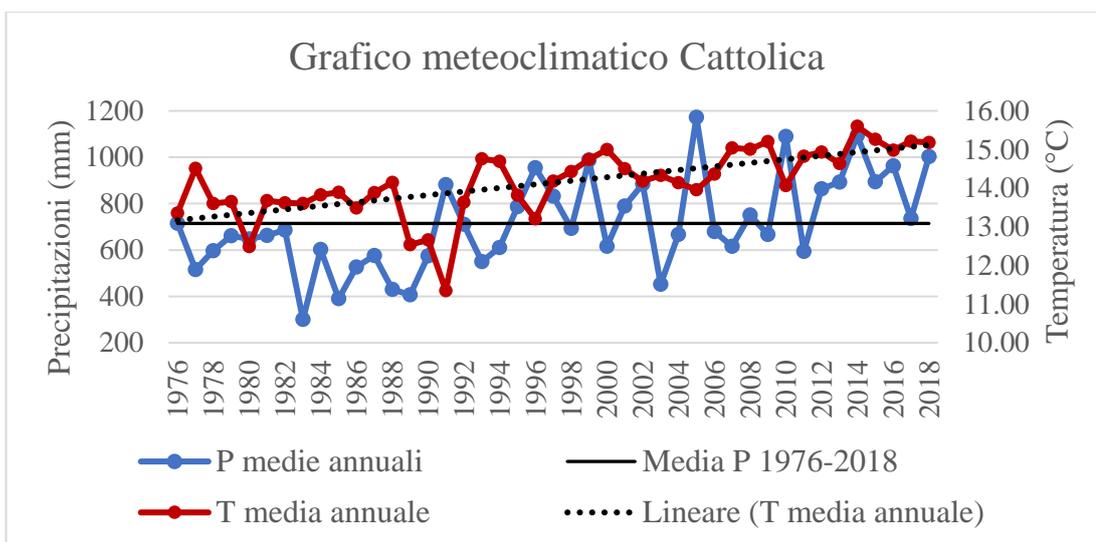
I dati meteorologici (Figura 16) mostrano l'andamento delle temperature e delle precipitazioni dal 1976 al 2018 nelle località di Ferrara, Ravenna e Cattolica dai quali emergono lievi eterogeneità dei valori ad eccezione delle precipitazioni del 1983. In questo anno, la mancanza di dati nelle località di Ferrara e Cattolica ha previsto l'utilizzo dei valori di Ravenna. Nella provincia di Ferrara si registra una temperatura media di circa 14 °C con un minimo di 11.6 °C nel 1995; le precipitazioni hanno un andamento che oscilla da un minimo di 300 mm nel 1983 ad un massimo di 1014 mm nel 2010, con un valore medio di 576 mm. Nel territorio ravennate si registra la medesima temperatura media con valore minimo di 11.6 °C nel 1987; le precipitazioni presentano un valore medio di 628 mm con un minimo di 300 mm nel 1983 e massimo di 1057 mm nel 1999. Cattolica ha registrato una temperatura media di 14.4 °C con un minimo di 11.3 °C nel 1991; la media delle precipitazioni è di 715 mm con valori massimi (1172 mm) registrati nel 2005 e un minimo di 300 mm nel 1983.



a)



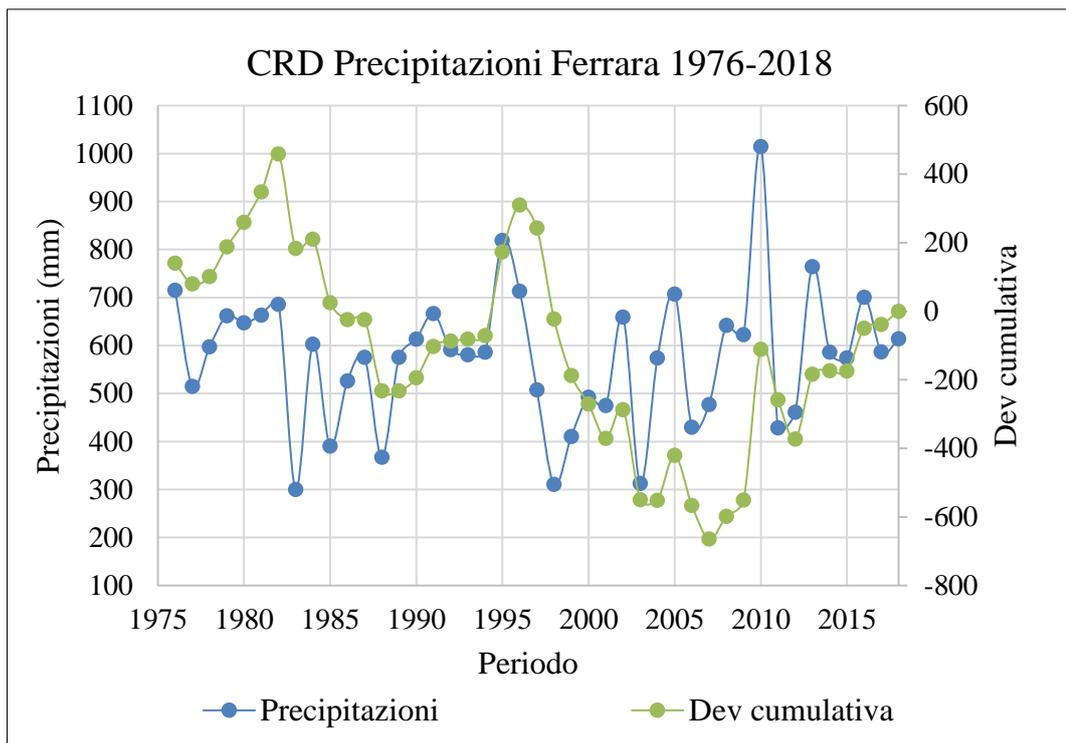
b)



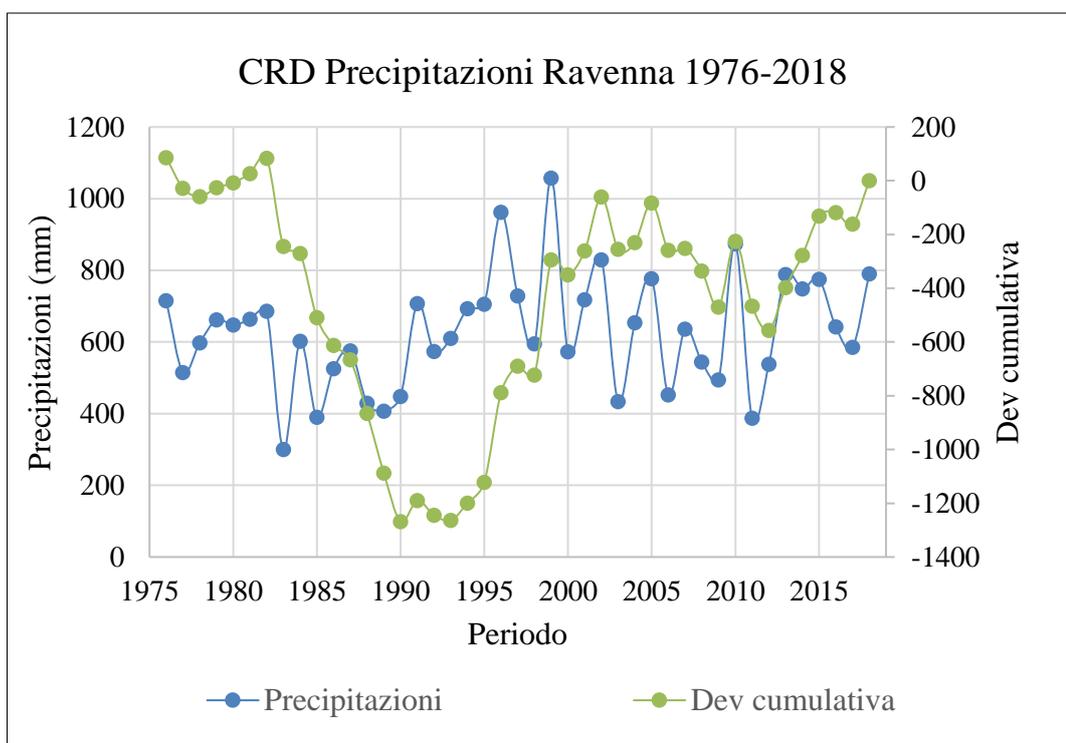
c)

Figura 16. Dati meteo climatici di Ferrara (a), Ravenna (b) e Cattolica (c).

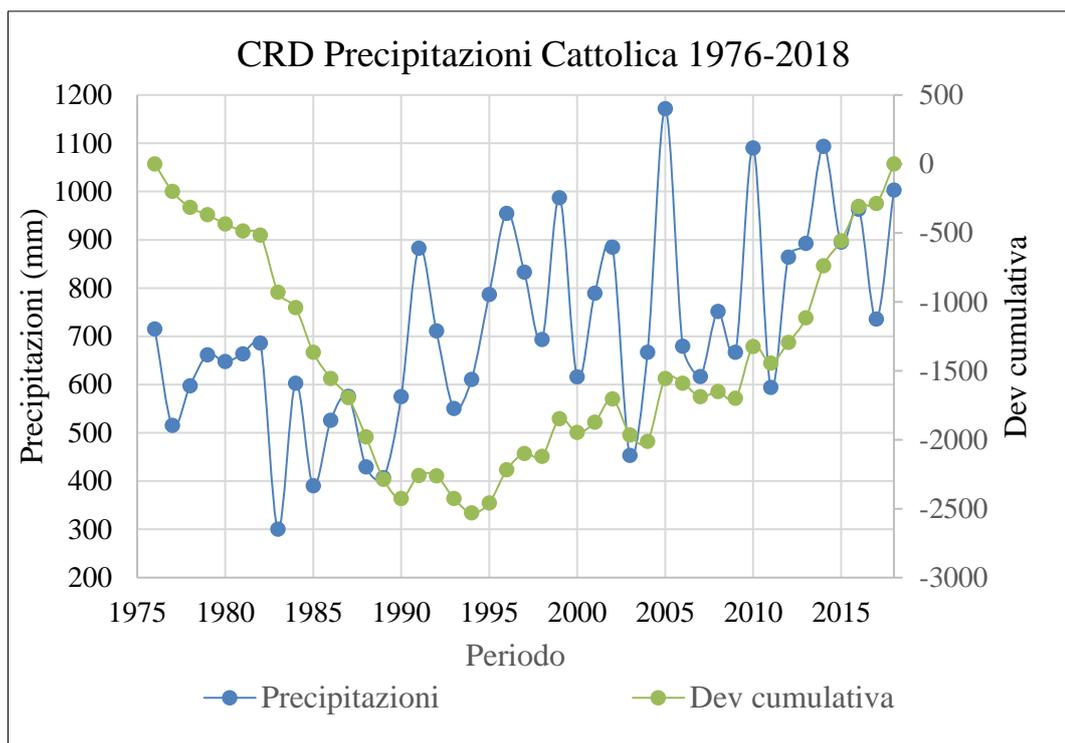
I grafici CRD (Figura 17) riportano la distribuzione delle precipitazioni cumulative annuali e la media delle precipitazioni dell'intero periodo, da questi emerge che la tendenza delle precipitazioni (Deviazione cumulativa) ha un andamento diverso nelle tre località.



a)



b)



c)

Figura 17. Distribuzione delle precipitazioni annuali e curve Cumulative Rainfall Departure di Ferrara (a), Ravenna (b) e Cattolica (c).

Fra gli anni che meglio caratterizzano le precipitazioni medie per tutte e tre le stazioni si è scelto il 1992.

L'anno 1992 è caratterizzato da una precipitazione annua di 574 mm e temperatura media di 13.7 °C; i dati giornalieri di precipitazione e temperatura sono stati utilizzati come input per le simulazioni dell'infiltrazione con HYDRUS-1D (par. 4.3).

4.2 CAMBIAMENTO USO DEL SUOLO

Il cambiamento dell'uso del suolo per l'intero acquifero costiero fra il 1976 e il 2017 è riportato in Figura 18.

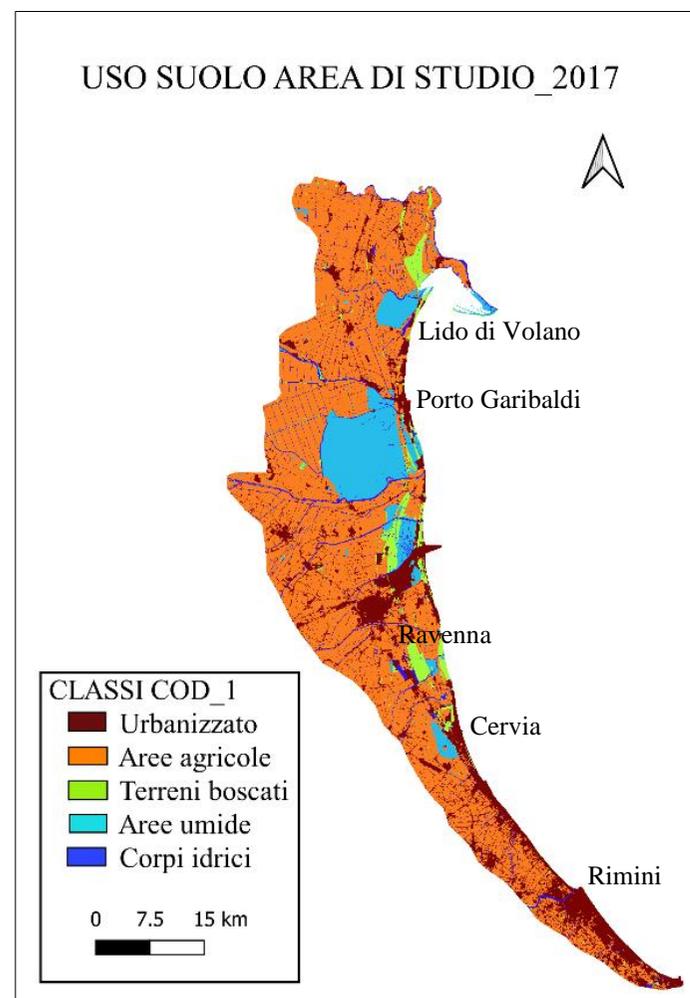
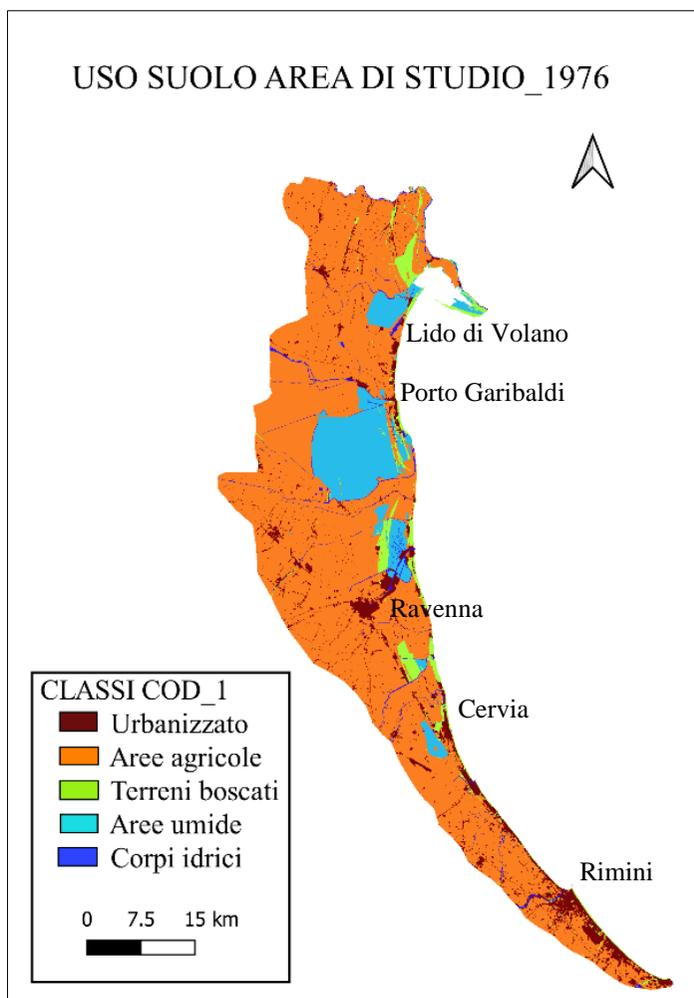


Figura 18. Uso del suolo per l'intero acquifero costiero del 1976 e 2017.

- Le aree antropizzate evidenziano un incremento del 9.5%, questo si riscontra principalmente nelle località di Porto Garibaldi, Ravenna e in direzione sud da Cervia a Cattolica;
- Le aree agricole hanno subito un decremento del 12 % distribuito nell'intera area di studio;
- I terreni boscati riportano un lieve decremento dello 0.11% che si concentra principalmente nelle località prossime a Lido di Volano e nelle località costiere in direzione sud;
- Le aree umide presentano un aumento di estensione dello 0.16% nelle aree in cui erano già presenti con maggiore incremento vicino al Delta del Po;
- I corpi idrici riportano un incremento estensionale del 2.7 %.

Nella Tabella 5 sono riportati in maggior dettaglio i dati risultanti dal confronto effettuato.

Tabella 5. Dati statistici ottenuti dal confronto delle cartografie.

1976			2017		
Classe	Area (m ²)	%	Classe	Area (m ²)	%
1	1.32E+08	7.64	1	2.96E+08	17.10
2	1.31E+09	75.6	2	1.10E+09	63.39
3	7.24E+07	4.18	3	7.03E+07	4.07
4	1.88E+08	10.87	4	1.91E+08	11.04
5	2.93E+07	1.69	5	7.62E+07	4.41

La matrice finale di confronto e la sua distribuzione percentuale (Figura 19 e 20) evidenziano che l'83.14% del territorio costiero non ha subito variazioni di uso del suolo rispetto dal 1976. Il territorio modificato costituisce il 16.86 % dell'intera area analizzata ed è così suddiviso: il 10.12% è stato trasformato in urbanizzato, l'1.51% in aree forestali, lo 0.73% in deforestato, lo 0.9% in aree agricole e il 3.9% in altro.

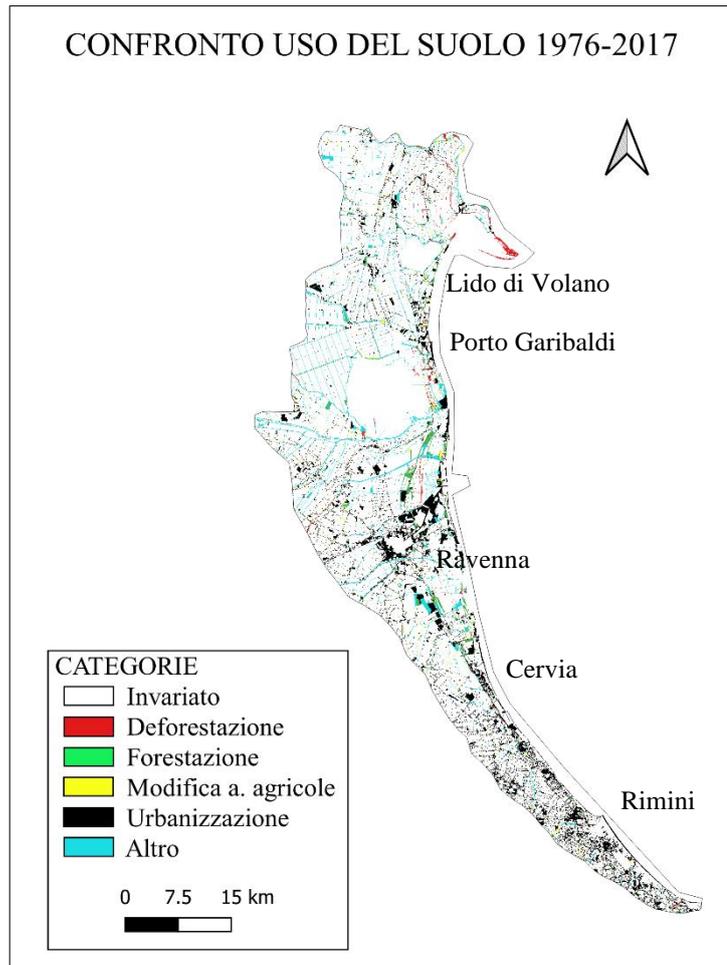


Figura 19. Cambiamento dell'uso del suolo 1976-2017.

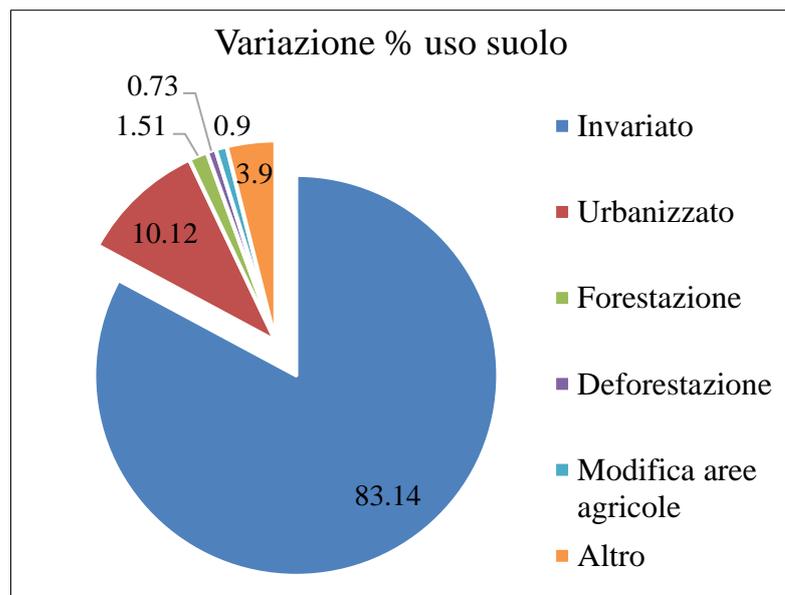


Figura 20. Percentuale del cambiamento dell'uso del suolo.

Dai calcoli emerge che i corpi idrici hanno variazioni percentuali positive del 160%, le aree urbanizzate del 123% e le aree umide dell'1%. Le aree agricole e i terreni boscati evidenziano variazioni negative con rispettivi valori di -16% e -3%. Nella Tabella 6 e in Figura 21 sono riportati i dati delle variazioni areali e percentuali.

Tabella 6. Dati statistici dell'uso del suolo rappresentanti le variazioni riscontrate.

Classi	Superficie 1976 (m ²)	Superficie 2017 (m ²)	Variazione (m ²)	Variazione %	Variazione annua %
1	1.32E+08	2.96E+08	1.63E+08	123	3.01
2	1.31E+09	1.10E+09	-2.13E+08	-16	-0.40
3	7.24E+07	7.03E+07	-2.07E+06	-3	-0.07
4	1.88E+08	1.91E+08	2.52E+06	1	0.03
5	2.93E+07	7.62E+07	4.69E+07	160	3.91

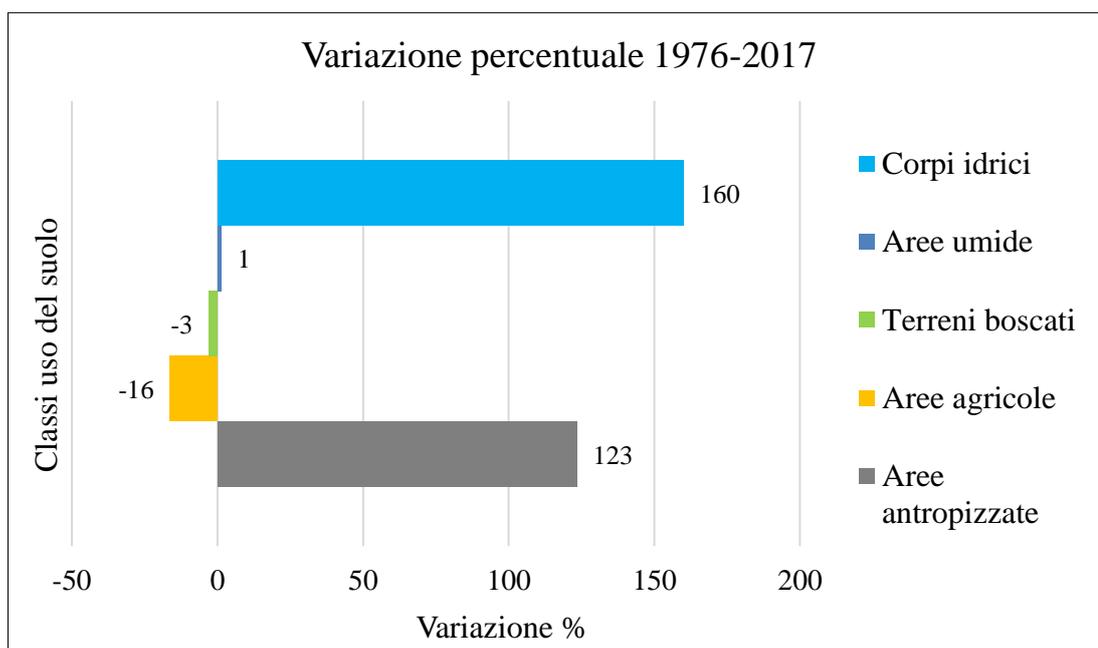


Figura 21. Variazione percentuale delle classi di uso del suolo.

L'urbanizzazione riporta un indice di artificializzazione del 9.44% e un indice di artificializzazione annuo di 0.23% (Tabella 7).

Tabella 7. Dati statistici relativi all'urbanizzazione.

Classe	Variazione (m²)	Intervallo anni	Indice artificializzazione %	Indice artificializzazione annuo %
1	1.63E+08	41	9.44	0.23

Dal confronto della cartografia di dettaglio della fascia costiera dal 1943 al 2018 emerge che la superficie delle dune diminuisce; nel 1943 ricoprono una superficie di $1.43 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ mentre nel 2018 la loro estensione è di $1.70 \cdot 10^6 \text{ m}^2$. Le aree agricole evidenziano la stessa problematica, nel 1943 la superficie misurata è di $4.35 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ mentre nel 2018 vengono riportati $1.35 \cdot 10^7 \text{ m}^2$. La principale perdita superficiale per le due classi si riscontra tra il 1943 e il 1982, con una differenza tra le estensioni dei due anni di confronto corrispondenti a $1.26 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ per le dune e $3 \cdot 10^7 \text{ m}^2$ per le aree agricole.

I dati completi sono riportati nella Tabella 8 e rappresentati nella Figura 22.

Nella Tabella 9 sono riportati i risultati dell'intersezione tra le classi dell'uso del suolo (agricolo e cordoni dunosi) e la pedologia nei diversi anni analizzati. Da questi emerge che i suoli Cerba hanno l'estensione maggiore nelle dune (1943) di $6.45 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ e nelle aree agricole di tutti gli anni di riferimento. Seguono poi le pedologie San Vitale e Pirottolo con estensione minore. In figura 23 viene riportata graficamente la loro distribuzione. In figura 24 vengono riportate le distribuzioni delle dune del 1943 e del 2018.

Tabella 8. Confronto dati statistici 1943-2018.

Classe	Area 1943	Area 1982	Area 1998	Area 2005	Area 2018	Differenza 1943-1982	Differenza 1982-1998	Differenza 1998-2005	Differenza 2005-2018
Duna	1.48E+07	4.27E+06	2.91E+06	2.72E+06	1.71E+06	1.05E+07	1.36E+06	1.85E+05	1.01E+06
Area agricola	8.67E+07	5.89E+07	5.24E+07	4.98E+07	4.14E+07	2.79E+07	6.48E+06	2.53E+06	8.43E+06

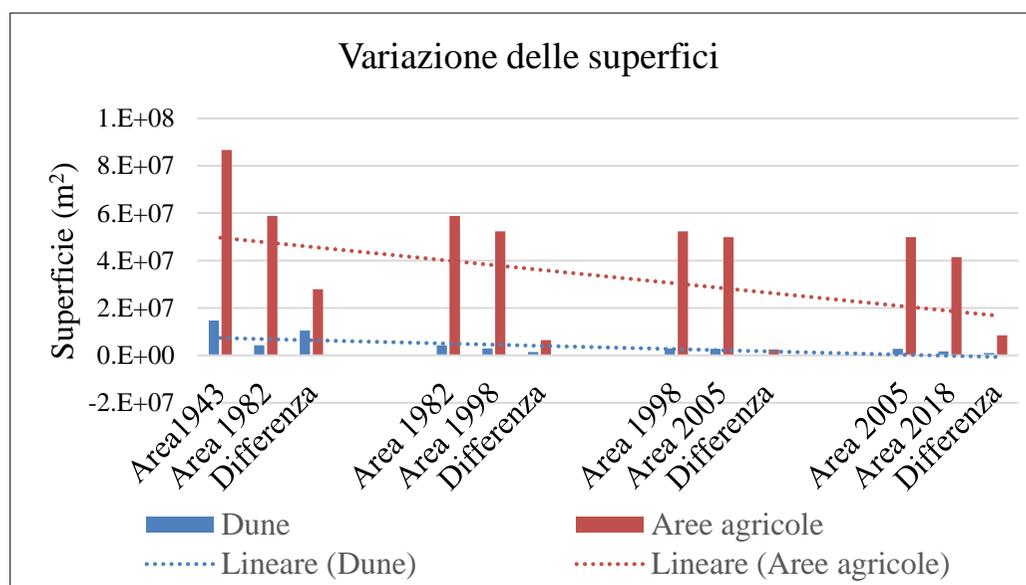


Figura 22. Confronti delle superfici dei vari anni.

Tabella 9. Estensione dei cordoni dunosi e delle aree agricole rispetto ai suoli Cerba, San Vitale e Pirottolo dal 1943 al 2018.

Pedologia	1943		1982		1998		2005		2018	
	Dune (m ²)	A. agricole (m ²)	Dune (m ²)	A. agricole (m ²)	Dune (m ²)	A. agricole (m ²)	Dune (m ²)	A. agricole (m ²)	Dune (m ²)	A. agricole (m ²)
Cerba	6.45E+06	3.71E+07	7.05E+05	1.94E+07	3.98E+05	1.68E+07	3.44E+05	1.56E+07	4.16E+05	1.21E+07
Pirottolo	2.10E+06	6.82E+05	1.72E+06	5.11E+05	1.65E+06	4.83E+05	1.34E+06	8.20E+05	4.01E+05	3.61E+05
San Vitale	5.77E+06	5.75E+06	1.84E+06	2.22E+06	8.61E+05	1.32E+06	9.71E+05	1.25E+06	8.83E+05	1.10E+06

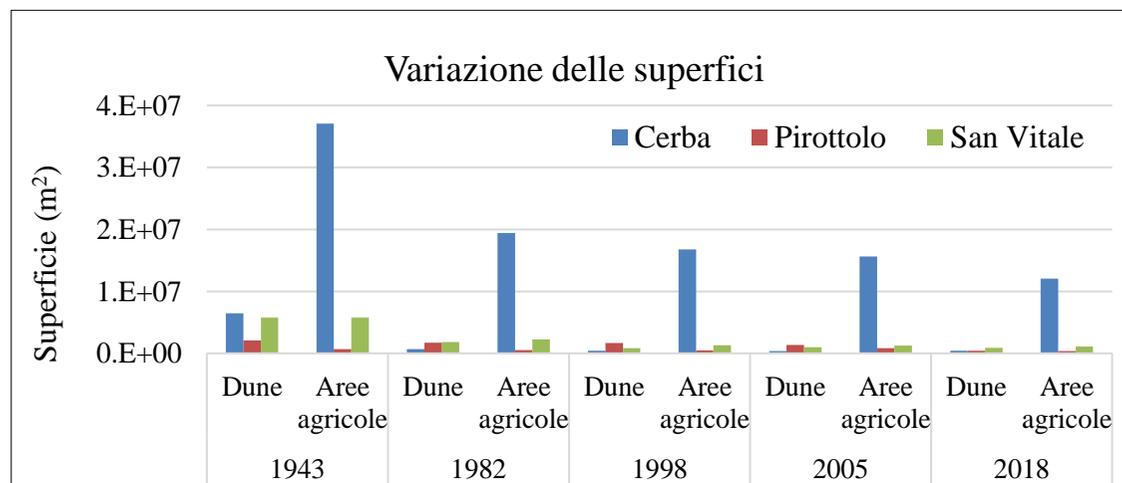


Figura 23. Distribuzione pedologica delle superfici

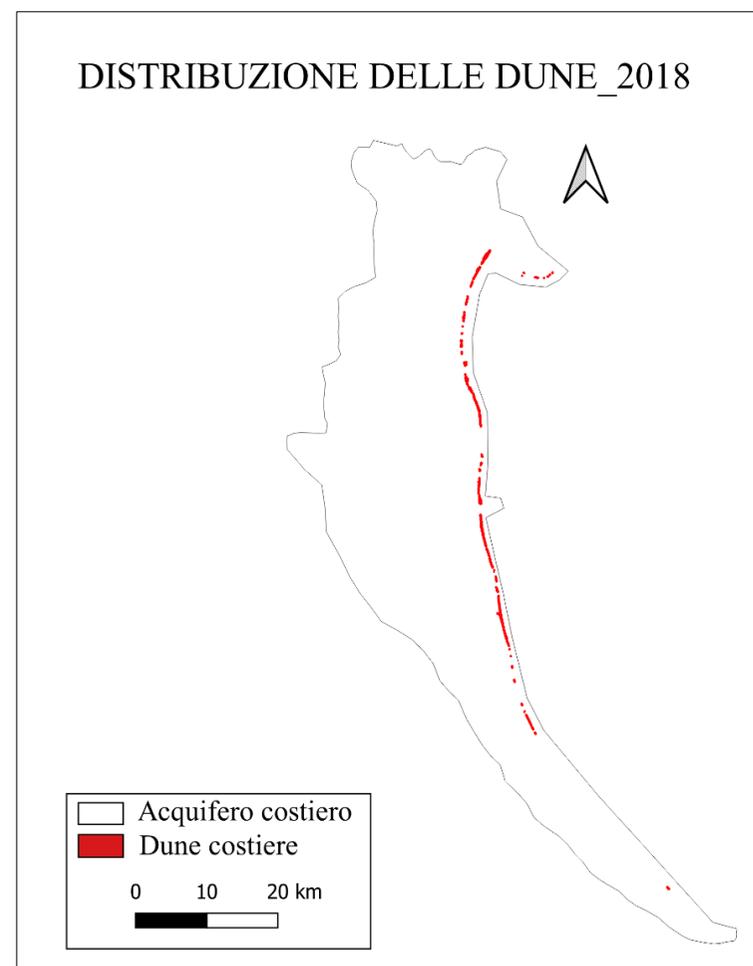
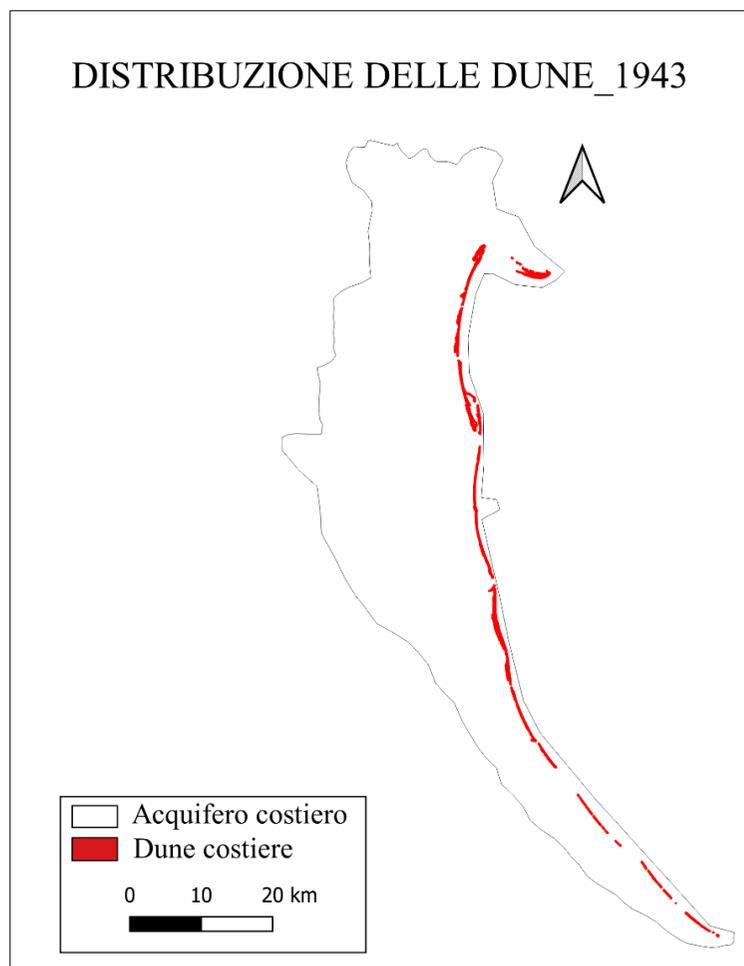


Figura 24. Distribuzione delle dune del 1943 e del 2018.

4.3 CALCOLO INFILTRAZIONE – HYDRUS 1D

In figura 25 sono riportati gli output delle simulazioni del modello HYDRUS 1D, e nello specifico i valori cumulativi di infiltrazione per i 3 suoli di riferimento nei 365 giorni simulati.

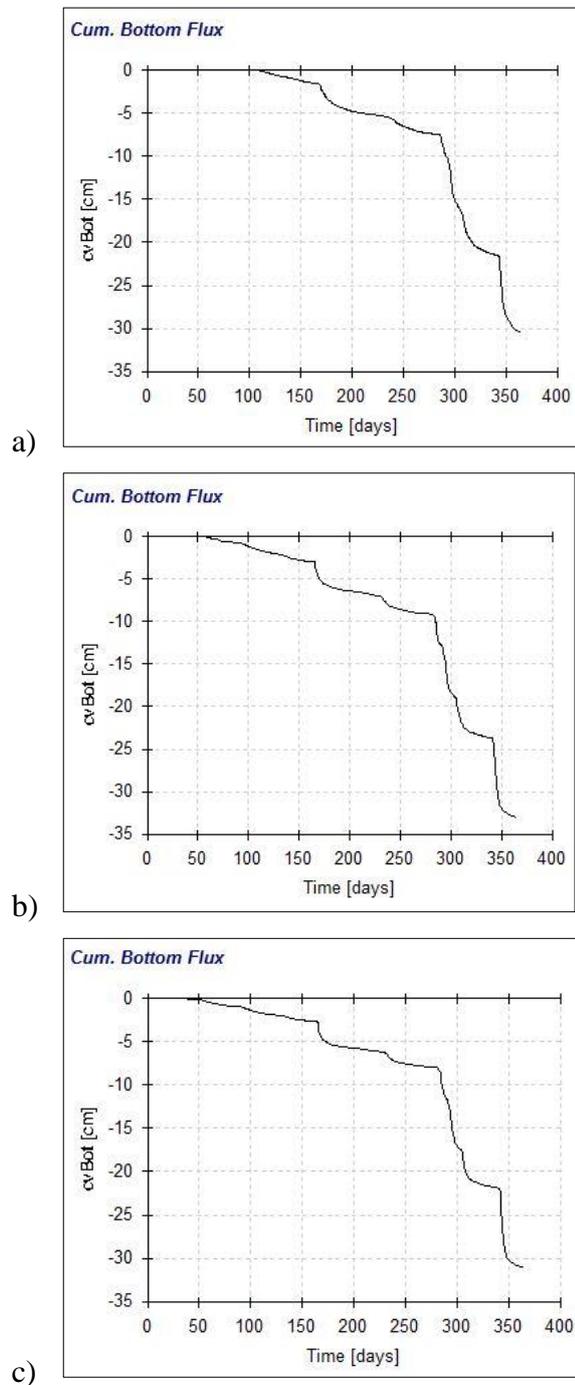
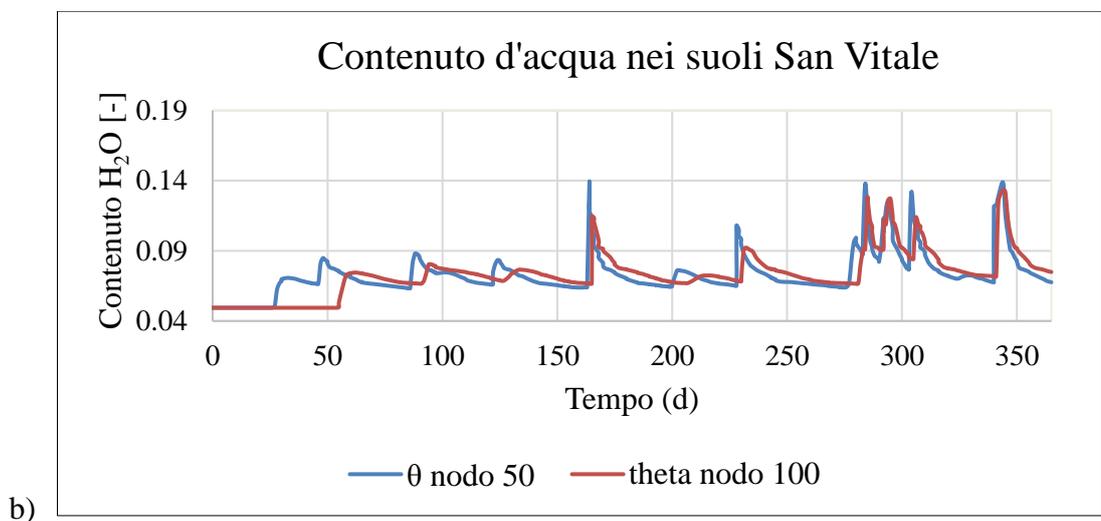
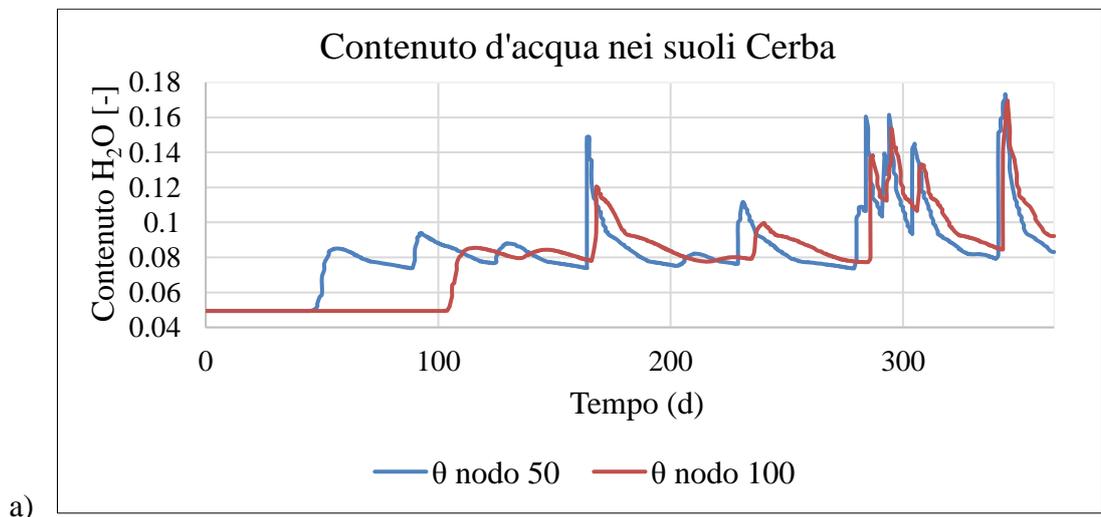


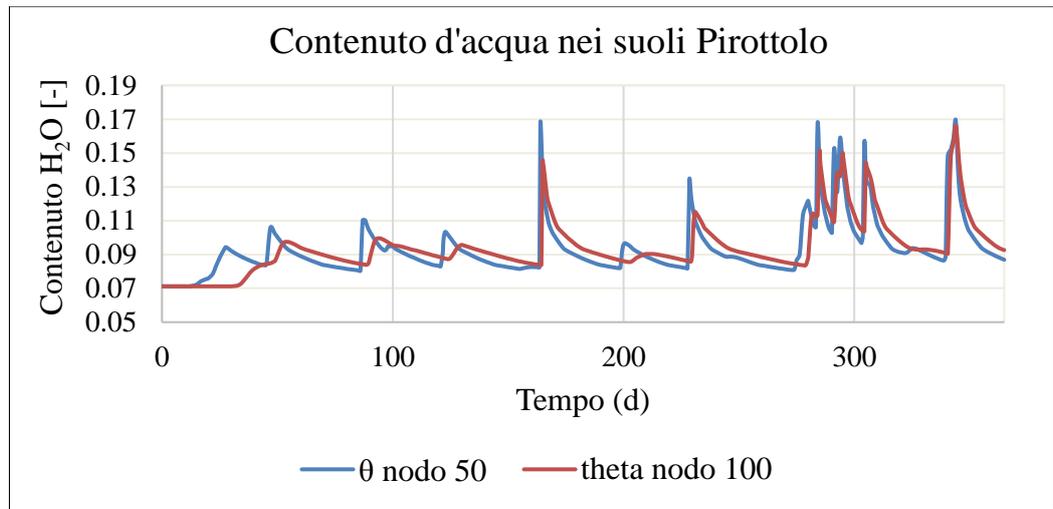
Figura 25. Valori di infiltrazione cumulativa alla base della colonna di suolo per le tre pedologie di riferimento; Cerba (a), San Vitale (b) e Pirottolo (c).

Da questi risultano valori cumulativi di infiltrazione di -30,5 cm/anno per i suoli Cerba, -33 cm/anno per i suoli San Vitale e -31 cm/anno per i suoli Pirottolo; per convenzione i valori sono negativi poiché si riferiscono all'infiltrazione, quindi ad un flusso dal piano campagna verso il basso.

Gli andamenti simili tra le tre simulazioni sono attribuibili alla somiglianza tessiturale dei suoli alle medesime condizioni al contorno di precipitazione.

In Figura 26 vengono riportati i valori del contenuto di acqua nei suoli (indicato con θ) in corrispondenza dei due nodi osservati nella fase di elaborazione; i nodi si trovano rispettivamente a metà (nodo 50) e alla base (nodo 100) delle colonne di suolo considerate.





c)

Figura 26. Contenuto di acqua dei suoli (θ) Cerba (a), San Vitale (b) e Pirottolo (c).

Il grafico dei suoli Cerba evidenzia valori di contenuto d'acqua (θ) compresi tra 0,05 e 0,17, principalmente si riscontra un andamento medio del valore di circa 0,08 con valori simili tra i 2 punti analizzati; nel periodo corrispondente a giugno ottobre e dicembre sono riportati livelli maggiori. I suoli San Vitale hanno valori compresi tra 0,05 e 0,14 allo stesso modo della pedologia precedente sono costituiti da maggiore quantità di acqua nei medesimi periodi. I suoli Pirottolo presentano un andamento di contenuto di acqua compreso tra 0,07 e 0,17, con andamento annuale simile alle precedenti pedologie descritte.

Nella tabella 10 sono riportati i risultati dell'infiltrazione in relazione all'estensione superficiale, da questi emerge che nel 1943 nelle aree agricole si verifica infiltrazione con valore di $1.34 \cdot 10^7 \text{ m}^3/\text{anno}$ mentre il valore nelle dune è di $4.52 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$. L'andamento segue una progressiva diminuzione dell'infiltrazione, nel 2018 si riscontra un valore di $4.15 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ nelle aree agricole e di $5.43 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{anno}$ nelle dune. Considerate il cambiamento delle superfici tra il 1943 e il 2018 è stato stimato un decremento delle infiltrazioni del 69 % per le aree agricole e dell'88 % nelle dune. In Figura 27 sono riportati i valori di infiltrazione totale annui nei diversi intervalli temporali analizzati.

Tabella 10. Variazione dei tassi di infiltrazione annui per le 3 tipologie di suolo nei diversi intervalli temporali tra il 1943 e il 2018.

	1943		1982		1998		2005		2018	
Pedologia	Dune (m³/anno)	A. agricole (m³/anno)								
Cerba	1.97E+06	1.13E+07	2.15E+05	5.93E+06	1.21E+05	5.12E+06	1.05E+05	4.77E+06	1.27E+05	3.68E+06
Pirottolo	6.52E+05	2.12E+05	5.34E+05	1.59E+05	5.12E+05	1.50E+05	4.17E+05	2.55E+05	1.25E+05	1.12E+05
San Vitale	1.90E+06	1.90E+06	6.09E+05	7.33E+05	2.84E+05	4.36E+05	3.20E+05	4.11E+05	2.91E+05	3.61E+05

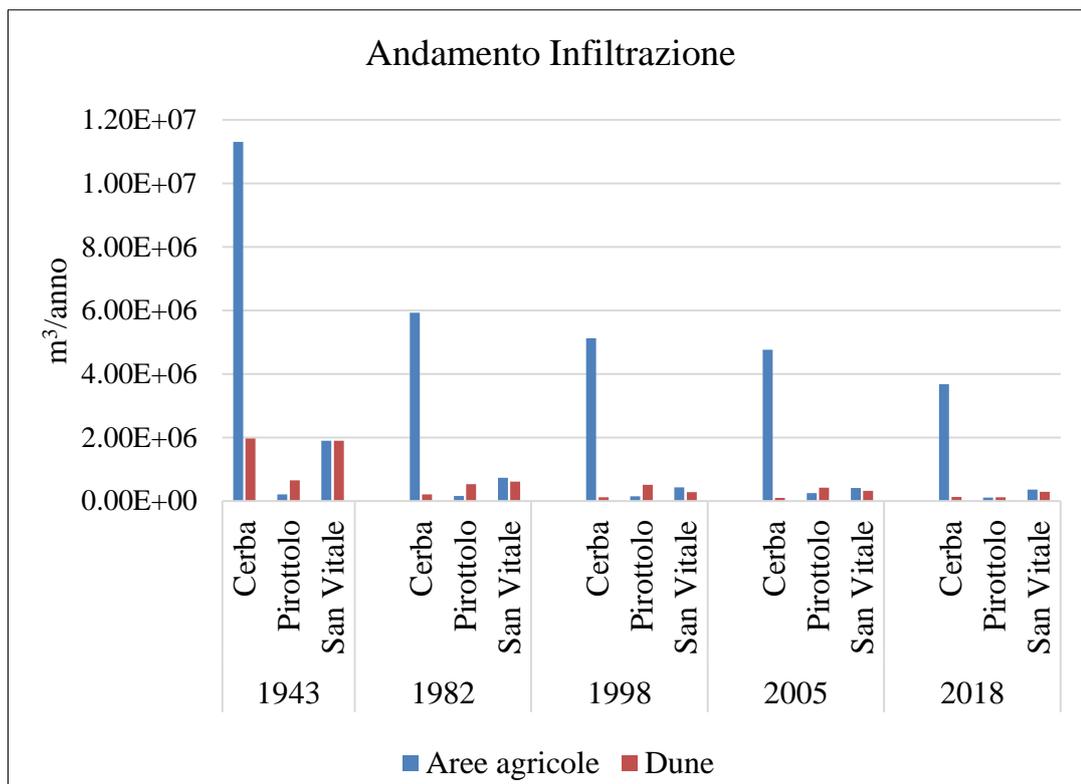


Figura 27. Andamento dell' infiltrazione nel periodo 1943-2018.

5. DISCUSSIONE

I risultati dell'analisi meteo-climatica (Figura 16) mostrano una tendenza all'incremento delle temperature medie in tutte le località di studio. Nei grafici CRD di Ravenna e Cattolica (Figura 17) si evidenzia un progressivo aumento degli anni più piovosi a partire dal 1990. In Emilia-Romagna secondo Delpiazzi et al. (2023) è stato rilevato un aumento significativo delle temperature annuali e stagionali sia minime che massime tra il 1961 e il 2016; nel periodo 1991-2016 è stato registrato un aumento medio di 1,5°C. Il trend positivo delle precipitazioni a partire dal 1990, invece, (Figura 16) non trova un accordo in letteratura. Anche se diversi autori hanno evidenziato la riduzione di precipitazioni, si precisa, che le molteplici variabili di studio possono comportare risultati lievemente diversi. Secondo Meli et al., (2022) la variabilità spaziale delle precipitazioni è legata alla presenza di diversi regimi meteorologici che a livello locale riportano differenze sia della quantità totale di precipitazione che di distribuzione nel tempo.

A scala dell'intero acquifero nei 41 anni (1976-2017) analizzati si riscontra principalmente l'aumento dei corpi idrici (2.7%) e delle aree artificiali (9.5%) a discapito soprattutto delle aree agricole (-12%). L'incremento delle aree artificiali è caratterizzato da un valore di artificializzazione annuo dello 0.23 % ; gli aumenti più significativi sono riconducibili alle zone urbanizzate, agli insediamenti produttivi, commerciali e alle infrastrutture. Nei primi 300 m dalla linea di costa quasi un quarto del suolo è artificializzato; la costa emiliano-romagnola presenta valori percentuali alti (30%) (SNPA,2022). Il 1976 viene preso come anno medio di riferimento per i cambiamenti urbani e rurali avvenuti tra gli anni '70 e gli inizi degli anni '80, mentre i decenni più recenti sono costituiti da un continuo sviluppo di attività industriali e infrastrutturale con lieve espansione urbana nelle aree rurali di pianura (Cowell et al., 2010).

Secondo Smiraglia et al., (2015) il maggiore consumo di suolo agricolo a causa dell'urbanizzazione è avvenuto tra il 1976 e il 2008; il fenomeno urbano è la prima causa del consumo di suolo nella pianura padana mentre i corpi idrici aumentano ma non eccessivamente.

Nell'analisi dell'intera area dell'acquifero costiero fra il 1976 e il 2017, tutto ciò che non è rimasto invariato si è trasformato in aree urbanizzate e in corpi idrici, con un

incremento dell'artificializzato distribuito principalmente nell'area costiera. Sekovski et al., (2015) evidenzia una forte antropizzazione nelle aree costiere dell'Emilia-Romagna tenendo conto che il 40% della popolazione vive entro i primi 100 km dalla costa.

In questa analisi vanno comunque tenute in considerazione le limitazioni relative alla diversa precisione e accuratezza (unità minima cartografabile, numero di categorie) dei dati originali, e le diverse metodologie (numero livelli e sistema di classificazione) usate per i database dei vari anni. Queste caratteristiche hanno influito sulla valutazione della variazione dei corpi idrici. Come descritto nel paragrafo 3.2, la risoluzione delle carte dell'uso del suolo del 1976 (unità minima cartografabile = 0.375 ha) è diversa da quella del 2017 (unità minima cartografabile = 0.16 ha). Quindi nell'analisi evolutiva, molti corpi d'acqua e canali comparivano erroneamente in classe 2 "Aree agricole" pur essendo chiaramente corsi d'acqua, e successivamente, con il maggior dettaglio raggiunto nella carta del 2017, sono giustamente state riclassificate in classe 4 "Aree umide" e classe 5 "Corpi idrici". Tuttavia, è comunque evidente, un forte incremento di canali artificiali (per drenaggio e irrigazione) su tutto il territorio costiero analizzato e che spiega le percentuali in Tabella 5 e Figura 19. La costruzione di estese reti di drenaggio è stato uno dei mezzi principali per la bonifica dei territori costieri, permettendo lo sviluppo agricolo, la costruzione di insediamenti e la mitigazione degli effetti della subsidenza (Antonellini et al., 2015). Gran parte del territorio costiero romagnolo è mantenuto asciutto da un sistema di drenaggio costituito da una rete di canali e pompe meccaniche che sollevano le acque e le convogliano a mare (Stefani & Vincenzi et al., 2005).

Il cambiamento dell'uso del suolo nella fascia costiera tra il 1943 e il 2018 evidenzia una perdita delle dune costiere ($1.26 \cdot 10^7 \text{ m}^2$) e delle aree agricole ($3 \cdot 10^7 \text{ m}^2$) riconducibile principalmente ad attività antropiche. In Figura 25 si osserva una perdita dell'88 % di dune tra il 1943-2018. Secondo Perini & Calabrese et al. (2010), negli ultimi 50 anni l'evoluzione delle dune è stata fortemente condizionata sia da cause naturali, ma soprattutto dall'azione dell'uomo con intense variazioni di uso del suolo oltre a camminamenti, varchi, scavi e spianamenti. La causa maggiore di distruzione dei cordoni dunosi è stata l'urbanizzazione costiera, ma soprattutto la costruzione di stabilimenti balneari sull'arenile che ha causato la frammentazione delle morfologie

dunose, queste negli anni '40 erano continue lungo tutta la costa emiliano-romagnola. Il litorale non è più completamente bordato dalle dune che, laddove ancora presenti, risultano frammentate tra uno stabilimento e l'altro. Cencini et al., (1998) afferma che la distruzione delle dune è stata generata principalmente dalla costruzione di stabilimenti balneari. Le problematiche appena descritte sono state causate anche da una passata gestione delle zone costiere in cui non si è considerata l'importanza delle dune nel sistema spiaggia-duna, compromettendo in modo marcato la morfologia del litorale. Il sistema è fortemente compromesso anche da cause naturali; il cambiamento climatico determina un incisivo impatto sulle spiagge in seguito all'insufficiente apporto di sedimenti provenienti dai bacini imbriferi connessa alla variazione delle precipitazioni e alla variazione del regime idrologico, contribuendo in modo significativo all'erosione costiera (Buonomo et al., 2006). Il mancato apporto di sedimenti sia continentale che marini identifica una riduzione della superficie di spiaggia e di conseguenza l'area di deflazione che alimenta le dune (Simeoni et al., 2006). Anche l'arretramento della linea di costa contribuisce all'erosione delle dune; le forti mareggiate invernali riescono a raggiungere le formazioni innescando un evidente processo erosivo.

5.1 CALCOLO INFILTRAZIONE

Dallo studio dei dati di infiltrazione totale (Figura 27) è stato osservato un andamento decrescente del fenomeno di infiltrazione, i valori riferiti al 2018 sono più bassi rispetto al 1943; con differenze di $9.26 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ per le aree agricole e $3.98 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ per le dune. I tre suoli considerati mostrano un andamento di infiltrazione molto simile tra loro, questo è dovuto al fatto che sono costituiti prevalentemente da sabbie con piccole differenze legate al loro spessore e alla profondità della tavola d'acqua. La riduzione dell'infiltrazione è da imputare principalmente al cambiamento dell'uso del suolo; infatti, la perdita di superficie permeabile influisce in maniera evidente sul bilancio idrologico. La funzione insediativa e infrastrutturale è sempre accompagnata, dall'impermeabilizzazione del suolo che ne compromette le funzionalità. In Emilia-Romagna l'aumento dell'urbanizzazione e la conseguente impermeabilizzazione ha ridotto fortemente le superfici, variando velocità e tempo del flusso d'acqua (SGSS,2016).

Secondo Ungaro et al. (2014), l'aumento del deflusso regionale, derivante dall'impermeabilizzazione, evidenzia maggiori criticità nelle aree. L'incidenza sul flusso sotterraneo delle acque è notevole; le superfici artificiali oltre a creare problemi di deflusso e inondazioni favoriscono l'evaporazione riducendo la ricarica delle falde. I maggiori valori in contenuto d'acqua nel suolo (Figura 26) si hanno in corrispondenza dei periodi di maggiori precipitazioni che, nell'anno di riferimento, si sono verificati in giugno, ottobre e dicembre. I cambiamenti climatici hanno una forte influenza sulla ricarica della falda, il riscaldamento globale è responsabile dell'aumento della temperatura, degli eventi piovosi e della siccità. Meli et al. (2022) sottolinea che, oltre a una variazione del pattern delle precipitazioni, gli effetti del cambiamento climatico sull'evapotraspirazione e sulla temperatura locale sono stati accentuati dalla presenza di superfici artificiali. Troppa pioggia in poco tempo genera ruscellamento superficiali. Questo fenomeno, considerando i fattori connessi (pendenza, tipo di suolo, vegetazione ecc.), determina scarsa infiltrazione e di conseguenza una scarsa ricarica della falda. Gli studi effettuati per valutare l'impatto climatico sulle risorse idriche sotterranee dell'Emilia-Romagna riportano un processo di aridizzazione, l'impatto è maggiore nell'area nord nord-est (Nistor et al., 2019). Dai dati di estensione superficiale (Figura 22) e di infiltrazione (Figura 27) è evidente che la distruzione delle dune e la conversione delle aree agricole hanno avuto un peso determinante sulla diminuzione dell'infiltrazione; le dune hanno evidenziato una maggiore perdita di superficie. Secondo Stuyfzand et al., (1989) le dune costiere rappresentano un ottimo serbatoio di acqua dolce data le loro caratteristiche di alta porosità e permeabilità, sono facilmente ricaricabili dalle precipitazioni meteoriche. La loro distruzione comporta una diminuzione dell'infiltrazione e il progressivo avanzamento del cuneo salino e quindi della salinizzazione di acque e suoli, con conseguenze sulla disponibilità di acqua dolce in zona costiera, danni agli ecosistemi e alle attività presenti sul territorio.

6. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi è stato svolto analizzando il cambiamento dell'uso del suolo dal 1943 al 2018, allo scopo di caratterizzarne gli effetti sull'infiltrazione, il contenuto d'acqua nel suolo e sulla ricarica dell'acquifero freatico costiero. Per effettuare queste valutazioni il territorio è stato analizzato tenendo conto degli aspetti idrologici, idrogeologici, morfologici, climatici e di uso del suolo.

La superficie dell'acquifero costiero osservata per un periodo di 41 anni evidenzia un aumento dell'artificializzazione e un incremento dei corpi idrici costituiti da fiumi e canalizzazioni artificiali per scopi agricoli e di drenaggio. I risultati dell'analisi del cambiamento dell'uso del suolo della fascia costiera (2 km da linea di costa) mostrano una perdita del 69 % delle aree agricole e dell'88 % dell'estensione dei cordoni dunosi dal 1943 al 2018 causati principalmente dall'urbanizzazione. Il consumo di suolo risulta evidente soprattutto nel dopoguerra e il 1976 viene considerato come anno medio del fenomeno dell'urbanizzazione. Dalle elaborazioni (1976-2018) si riscontra che il 10 % del territorio è stato urbanizzato per gli insediamenti urbani e le principali attività economiche (turistiche e industriali). La principale perdita di superficie delle dune costiere e delle aree agricole si riscontra nel periodo 1943-1982. Le dune presentano la maggiore perdita di superficie causando una diminuzione della ricarica delle lenti di acqua dolci presenti nell'acquifero e contribuendo all'intrusione del cuneo salino. I risultati evidenziano che la variazione di uso del suolo e soprattutto l'impermeabilizzazione hanno causato una diminuzione dell'infiltrazione totale da $1.79 \cdot 10^7$ a $4.70 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{anno}$ in 75 anni (1943-2018).

La scarsità e il valore prezioso dell'acqua dolce sono ormai riconosciuti da tutti, rendendo fondamentale la preservazione del territorio e la riduzione dell'impermeabilizzazione del suolo. Il consumo di suolo è risultato evidente a partire dagli anni '50 con indice di artificializzazione annuo di 0.23%; attualmente il fenomeno continua a modificare il territorio anche se in misura diversa. Oltre al consumo del suolo sono da considerare le previsioni sui cambiamenti climatici, che includono variazioni nelle precipitazioni, nelle temperature e nel livello del mare che porteranno ad un possibile peggioramento delle condizioni degli acquiferi costieri in futuro e della disponibilità di acqua dolce. Preservare le zone di ricarica nelle zone costiere contribuisce a: mantenere il livello degli acquiferi costieri, evitandone il loro

depauperamento e l'intrusione salina; garantire una quantità adeguata di acqua dolce per l'approvvigionamento idrico, l'agricoltura (una delle principali attività economiche della zona), e altri usi umani; conservare gli ecosistemi costieri, fornendo habitat per piante e animali che dipendono dall'acqua dolce.

7. BIBLIOGRAFIA

Amorosi, A., Asioli, A., Bondesan, M., Cibin, U., Colalongo, M. L., Correggiari, A., & Vincenzi, S. (2002). Dalle conoidi pedemontane al mare aperto: architettura stratigrafica tardo-quadernaria dell' Adriatico settentrionale e della pianura costiera emiliano-romagnola. *Le pianure: conoscenza e salvaguardia. Il contributo delle Scienze della Terra, Ferrara*.

Amorosi, A., Colalongo, M., Pasini, G., & Preti, D. (1999). Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Romagna coastal plain (northern Italy). *Sedimentology*, 46(1), 99-121.

Antonellini, M., Allen, D. M., Mollema, P. N., Capo, D., & Greggio, N. (2015). Dulcificação (freshening) de águas subterrâneas seguindo o avanço costeiro e recuperação de terras da Planície do Pó, Itália. *Hydrogeology Journal*, 23, 1009-1026.

Antonellini, M., Balugani, E., Gabbianelli, G., Laghi, M., Marconi, V., & Mollema, P. (2010). Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola. *Studi costieri*, 17, 83-104.

Antonellini, M., Giambastiani, B. M. S., Greggio, N., Bonzi, L., Calabrese, L., Luciani, P., & Severi, P. (2019). Processes governing natural land subsidence in the shallow coastal aquifer of the Ravenna coast, Italy. *Catena*, 172, 76-86.

ARPAE, (2018). Stato del litorale emiliano-romagnolo. Edizione 2018.

Bondesan, M., Favero, V., & Viñals, M. J. (1995). New evidence on the evolution of the Po-delta coastal plain during the Holocene. *Quaternary International*, 29, 105-110.

Bonzi, L., Calabrese, L., Severi, P., & Vincenzi, V. (2010). L'acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione. *Il Geologo dell'Emilia-Romagna*, 39, 21-34.

Brath, A., Gonella, M., Polo, P., & Tondello, M. (2000). Analisi della circolazione idrica nella Sacca di Goro mediante modello matematico. *Studi Costieri*, 2, 105-122.

Buonomo, V., Ortolani, F., & Pagliuca, S. (2006). La distruzione delle spiagge nell'attuale periodo di transizione climatica: proposta di restauro geoambientale duraturo.

Carretero, S., & Kruse, E. (2017). Hydrological variations associated with geomorphological changes in a sand dune barrier of the Partido de La Costa, Province of Buenos Aires. In *Advances in Geomorphology and Quaternary Studies in Argentina: Proceedings of the Sixth Argentine Geomorphology and Quaternary Studies Congress* (pp. 101-118). Springer International Publishing.

Cencini, C., Marchi, M., Torresani, S., & Varani, L. (1988). The impact of tourism on Italian deltaic coastlands: four case studies. *Ocean and Shoreline Management*, 11(4-5), 353-374.

Commissione Europea, (2012). Orientamenti in materia di buone pratiche per limitare, mitigare e compensare l'impermeabilizzazione del suolo. Bruxelles, 15.5.2012, SWD (2012) 101.

Commissione Europea, (2021). Strategia dell'UE per il suolo per il 2030. Suoli sani a vantaggio delle persone, degli alimenti, della natura e del clima. COM/2021/699 final.

Corticelli, S.; Mariani, M.C.; Masi, S. (2010). Incremento Artificializzato 2003–2007 Nella Regione Emilia-Romagna. In *Proceedings of the 14th National Conference ASITA, Brescia, Italy*, 9–12 November 2010

Cowell, M. (2010). Polycentric regions: comparing complementarity and institutional governance in the San Francisco Bay area, the Randstad and Emilia-Romagna. *Urban Studies*, 47(5), 945-965.

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.

D., Šimůnek, J., Mallants, D., and M. Th. van Genuchten (2013). The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes

in Variably Saturated Media. *Tutorial, Version 1.00. By Rassam, CSIRO Land and Water, Australia, pp. 183*

Delpiazzo, E., Bosello, F., Dasgupta, S., Bagli, S., Broccoli, D., Mazzoli, P., & Luzzi, V. (2023). The economic value of a climate service for water irrigation. A case study for Castiglione District, Emilia-Romagna, Italy. *Climate Services, 30*, 100353.

EEA, (2021). Land take and land degradation in functional urban areas, EEA Report n. 17/2021. European Environment Agency, Copenhagen.

Gambolati, G., & Teatini, P. (1998). Numerical analysis of land subsidence due to natural compaction of the Upper Adriatic Sea basin. *CENAS: Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea Due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, 103-131.

Gambolati, G., Ricceri G., Bertoni W., Brighenti G., Vuillermin E. (1991). Mathematical simulation of the subsidence of Ravenna. *Water Resour Res* 27(11):2899–2918

Giambastiani, B. M. S., Colombani, N., Mastrocicco, M., & Fidelibus, M. D. (2013). Characterization of the lowland coastal aquifer of Comacchio (Ferrara, Italy): hydrology, hydrochemistry and evolution of the system. *Journal of Hydrology, 501*, 35-44.

Giambastiani, B. M. S., Kidanemariam, A., Dagnew, A., & Antonellini, M. (2021). Evolution of salinity and water table level of the phreatic coastal aquifer of the Emilia-Romagna region (Italy). *Water, 13*(3), 372.

Giambastiani, B.M.S. (2007). Evoluzione idrologica ed idrogeologica della pineta di San Vitale (Ravenna). Tesi di Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali, XIX Ciclo, Università di Bologna

Greggio N. (2013). Individuazione di tecniche di gestione idrica-agronomica e di ricarica dell'acquifero freatico costiero per limitare la salinizzazione delle acque sotterranee e dei suoli, Tesi Di Dottorato di Ricerca In Scienze Ambientali: Tutela E Gestione Delle Risorse Naturali, Alma Mater Studiorum – Università Di Bologna

Greggio, N., Giambastiani, B. M., Mollema, P., Laghi, M., Capo, D., Gabbianelli, G., ... & Dinelli, E. (2020). Assessment of the main geochemical processes affecting surface water and groundwater in a low-lying coastal area: implications for water management. *Water*, *12*(6), 1720.

ISPRA, (2015). Rapporto sul consumo di suolo in Italia. Edizione 2015

Kumar, P. (2012). *The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations*. Routledge.

McCALLUM, A. M., Andersen, M. S., Kelly, B. F., Giambastiani, B., & Acworth, R. I. (2009). Hydrological investigations of surface water-groundwater interactions in a sub-catchment in the Namoi Valley, NSW, Australia. *IAHS publication*, *20*, 157.

Meli, M., & Romagnoli, C. (2022). Evidence and implications of hydrological and climatic change in the Reno and Lamone river basins and related coastal areas (Emilia-Romagna, northern Italy) over the last century. *Water*, *14*(17), 2650.

Mollema, P. N., Antonellini, M., Dinelli, E., Gabbianelli, G., Greggio, N., & Stuyfzand, P. J. (2013). Hydrochemical and physical processes influencing salinization and freshening in Mediterranean low-lying coastal environments. *Applied Geochemistry*, *34*, 207-221.

Mollema, P. N., Antonellini, M., Dinelli, E., Greggio, N., & Stuyfzand, P. J. (2015). The influence of flow-through saline gravel pit lakes on the hydrologic budget and hydrochemistry of a Mediterranean drainage basin. *Limnology and oceanography*, *60*(6), 2009-2025.

Mollema, P. N., Antonellini, M., Gabbianelli, G., & Galloni, E. (2013). Water budget management of a coastal pine forest in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy). *Environmental earth sciences*, *68*, 1707-1721

Mollema, P., Antonellini, M., Gabbianelli, G., Laghi, M., Marconi, V., & Minchio, A. (2012). Climate and water budget change of a Mediterranean coastal watershed, Ravenna, Italy. *Environmental Earth Sciences*, *65*, 257-276.

- Munafò, M. (2021). Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2021. Report SNPA 22/21
- Munafò, M., (2022). Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Edizione 2022. Report SNPA 32/22
- Munari, C., Rossi, R., & Mistri, M. (2005). Temporal trends in macrobenthos community structure and redundancy in a shallow coastal lagoon (Valli di Comacchio, Northern Adriatic Sea). *Hydrobiologia*, 550, 95-104.
- Nistor, M. M. (2016). Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region. *Meteorological applications*, 23(2), 304-313.
- Nistor, M. M., & Mîndrescu, M. (2019). Climate change effect on groundwater resources in Emilia-Romagna region: An improved assessment through NISTOR-CEGW method. *Quaternary International*, 504, 214-228.
- Oldeman, L. R., Hakkeling, R. T. A., & Sombroek, W. G. (1990). World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note. *International Soil Reference and Information Centre*.
- Parlamento europeo (2021). Risoluzione del Parlamento europeo sulla protezione del suolo n. 2021/2548(RSP), April 2021.
- Perini, L., Calabrese, L. (2010). Le dune costiere dell'Emilia-Romagna: strumenti di analisi, cartografia ed evoluzione. *Studi costieri*, 17, 71-84.
- Poelmans, L., Van Rompaey, A., & Batelaan, O. (2010). Coupling urban expansion models and hydrological models: How important are spatial patterns?. *Land use policy*, 27(3), 965-975.
- Polidori, E., & Gori, U. (2005). Classificazione dei terreni argillosi. *Giornale di Geologia Applicata*, 2, 249-254.
- RER , (2008). Uso del suolo dell'area costiera. Relazione di attività SGSS - Area Costa. Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli, Regione Emilia-Romagna
- RER, (2021).Carta dei suoli Regione Emilia-Romagna. Edizione 2021.

- Sajikumar, N., Remya, R. S. (2015). Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of environmental management*, 161, 460-468.
- Sekovski, I., Armaroli, C., Calabrese, L., Mancini, F., Stecchi, F., & Perini, L. (2015). Coupling scenarios of urban growth and flood hazards along the Emilia-Romagna coast (Italy). *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(10), 2331-2346.
- SGSS, (2016). Carta delle superfici impermeabilizzate della pianura emiliano-romagnola. Edizione 2016.
- SGSS, (2016). Carta delle superfici impermeabilizzate della pianura emiliano-romagnola. Edizione 2016.
- Simeoni, U., Valpreda, E., Schiavi, C., & Corbau, C. (2006). Le dune costiere dell'Emilia-Romagna. *Studi costieri*, 11, 121-132.-
- Smiraglia, D., Ceccarelli, T., Bajocco, S., Perini, L., & Salvati, L. (2015). Unraveling landscape complexity: land use/land cover changes and landscape pattern dynamics (1954–2008) in contrasting peri-urban and agro-forest regions of northern Italy. *Environmental Management*, 56, 916-932.
- Soboyejo, L. A., Giambastiani, B. M., Molducci, M., & Antonellini, M. (2021). Different processes affecting long-term Ravenna coastal drainage basins (Italy): implications for water management. *Environmental Earth Sciences*, 80(15), 493.
- Stefani, M., & Vincenzi, S. (2005). The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. *Marine Geology*, 222, 19-48.
- Stuyfzand, P. J. (1989). Quality changes of river Rhine and Meuse water upon basin recharge in The Netherlands' coastal dunes: 30 years of experience. In *Artificial Recharge of Ground Water* (pp. 235-247).
- Sytnik, O., & Stecchi, F. (2015). Disappearing coastal dunes: tourism development and future challenges, a case-study from Ravenna, Italy. *Journal of Coastal conservation*, 19, 715-727.

- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., & Gonella, M. (2006). Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: Modeling the past occurrence and the future trend. *Water Resources Research*, 42(1).
- Teatini, P., Ferronato, M., Gambolati, G., Bertoni, W., & Gonella, M. (2005). A century of land subsidence in Ravenna, Italy. *Environmental Geology*, 47, 831-846.
- Tosi, L., Di Sipio, E., Carbognin, L., Zuppi, G. M., Galgaro, A., Teatini, P., & Vitturi, A. (2011). Intrusione Salina. In *Atlante Geologico della Provincia di Venezia. Note Illustrative*. Provincia di Venezia.
- Trincardi, A., Correggiari, M., & Roveriand, F. (1996). Late Pleistocene and Holocene evolution of the north Adriatic Sea. *Il Quaternario*, 9(2), 697-704.
- Ungaro, F., Calzolari, C., Pistocchi, A., & Malucelli, F. (2014). Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydrogeological approach. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 62(1), 33-42.
- Veggiani A., (1974). Le ultime vicende geologiche del Ravennate . In: Influenza di insediamenti industriali sul circostante ambiente naturale. *Studio sulla pineta di S. Vitale di Ravenna. Ed. Compositori, Bologna*, 48-58.
- Zullo, F., Montaldi, C., Di Pietro, G., & Cattani, C. (2022). Land Use Changes and Ecosystem Services: The Case Study of the Abruzzo Region Coastal Strip. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(12)

8. SITOGRAFIA

Arpae – Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna

<https://webbook.arpae.it/indicatore/Consumo-di-suolo-00001/?id=ef258eb9-6369-11e5-bf2c-11c9866a0f33> (Ultimo accesso 02/05/2023)

Arpae SIMC – Servizio Idro-Meteo-Clima dell' Agenzia regionale per la prevenzione, l'ambiente e l'energia dell'Emilia-Romagna .

<https://simc.arpae.it/dext3r/> (Ultimo accesso 10/05/2023)

Cartografia dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

https://geo.regione.emilia-romagna.it/cartografia_sgss/user/viewer.jsp?service=pedologia&bookmark=1%22
(Ultimo accesso 30/05/2023)

CER – Canale Emiliano Romagnolo

<https://consorziocer.it/> (Ultimo accesso 26/04/2023)

Geoportale Regione Emilia-Romagna

<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it/download/dati-e-prodotti-cartografici-preconfezionati/pianificazione-e-catasto/uso-del-suolo> (Ultimo accesso 12/05/2023)

Sic Regione Emilia-Romagna – Sistema informativo del Mare e della Costa

<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/sistema-informativo-del-mare-e-della-costa-sic> (Ultimo accesso 12/05/2023)

RINGRAZIAMENTI

Alla fine di questo elaborato è doveroso ringraziare tutte le persone che mi hanno supportato in questo percorso, ciascuno con il proprio contributo, permettendomi di raggiungere gli obiettivi e completare la carriera universitaria. Scrivere i ringraziamenti non è mai una cosa semplice; è una revisione del proprio percorso e della propria vita, è frutto di pensieri chiari ma difficili da esprimere.

Desidero innanzitutto ringraziare la Professoressa Beatrice Maria Sole Giambastiani per il tempo dedicatomi e per la sua prontezza nell'affrontare i dubbi e le difficoltà. Grazie per la pazienza, la gentilezza e la precisione con cui mi ha accompagnato durante lo svolgimento di questo studio.

Ringrazio anche il Professore Marco Antonellini per il suo indispensabile contributo, per il supporto e i suggerimenti; questi hanno permesso di completare le elaborazioni con successo.

Un pensiero speciale va ai miei genitori per aver accettato e forse non condiviso le mie scelte; un padre e una madre credo non vorrebbero mai vedere il proprio figlio trasferirsi in un luogo lontano da casa e ancora di più nel pieno di una pandemia. Vi ringrazio infinitamente per il vostro affetto la vostra presenza e il vostro sostegno. Ringrazio mia sorella per i consigli, gli incoraggiamenti e per le interminabili conversazioni telefoniche. Grazie a tutte le persone che continuano a dimostrare la loro vicinanza anche solo con una chiamata.

Ringrazio Mirko e i suoi genitori, per la premura nell'offrirmi una casa dove vivere e farmi sentire parte della famiglia nelle occasioni di condivisione.

Un grazie va anche ai miei colleghi con cui abbiamo condiviso il percorso di studi, tra difficoltà, poca voglia di studiare ma anche momenti di svago che hanno contribuito alla nascita di nuove amicizie.

Infine, vorrei ringraziare tutte le persone che hanno cercato di scoraggiarmi, forse per motivi egoistici, sconsigliandomi di iscrivermi a questo corso di laurea, cercando di farmi credere che non sarei riuscito a completare gli studi in un ateneo del nord perché ritenuto più difficile da affrontare; grazie per avermi dato la grinta necessaria a

raggiungere l'obiettivo, per voi non spendo ulteriori righe ma cedo la parola alla realtà dei fatti.

Sicuramente il posto in cui vivo mi ha fatto crescere tanto, nuove esperienze in un luogo molto diverso da quello in cui sono cresciuto; ciò mi ha permesso anche di filtrare quelle che un tempo sembravano amicizie e di apprezzare il nuovo, facendomi ricredere sul vecchio. Troppo tempo e troppe forze sono state impiegate per un luogo e per delle persone che forse non lo meritavano; in ogni caso il bene fatto rimane, anche se non viene riconosciuto o ripagato secondo le nostre preferenze. Ci tengo a ringraziare le persone che invece mi hanno sostenuto e dimostrato il loro affetto.

Grazie a tutti per ogni singolo gesto.