



# **UNIVERSITÀ DI PARMA**

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE CHIMICHE, DELLA VITA E DELLA  
SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN SCIENZE E TECNOLOGIE PER L'AMBIENTE E LE RISORSE**

## **RUOLO ECOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE DEI LAGHI DI CAVA PER LA GESTIONE E IL RECUPERO DEGLI AMBIENTI ACQUATICI DEL BACINO DEL PO**

**Relatore:**

**Prof. PIERLUIGI VIAROLI**

**Co-relatori:**

**Dott. NICOLA GHIRARDI**

**Dott. MARIANO BRESCIANI**

**Dott. DANIELE NIZZOLI**

**Laureando:**

**FILIPPO SIDOTI**

**Anno Accademico: 2019/2020**

## Indice

|                                                                                          |                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Indice .....                                                                             | 2                                            |
| 1 INTRODUZIONE .....                                                                     | 3                                            |
| 1.1 Il problema ambientale .....                                                         | 3                                            |
| 1.2 Servizi ecosistemici.....                                                            | 5                                            |
| 1.3 Attività estrattiva e laghi di cava.....                                             | 6                                            |
| 1.3.1 Formazione e caratteristiche .....                                                 | 7                                            |
| 1.3.2 Importanza ecologica.....                                                          | 8                                            |
| 1.3.3 Problema e opportunità .....                                                       | 9                                            |
| 1.4 Area di studio: il bacino del Po.....                                                | <b>Errore. Il segnalibro non è definito.</b> |
| 1.5 Gestione e progettazione dei laghi di cava in un'ottica di recupero ambientale ..... | 9                                            |
| 1.6 Obiettivi della tesi .....                                                           | 14                                           |
| 2 MATERIALI E METODI .....                                                               | 15                                           |
| 2.1 Sistemi Informativi Geografici (GIS) .....                                           | 16                                           |
| 2.2 Analisi temporale dell'uso del suolo .....                                           | 17                                           |
| 2.3 Telerilevamento .....                                                                | 20                                           |
| 2.3.1 Satelliti utilizzati .....                                                         | 21                                           |
| 3 RISULTATI .....                                                                        | 23                                           |
| 3.1 Identificazione e conteggio dei laghi di cava .....                                  | 23                                           |
| 3.2 Analisi dei sottocampioni .....                                                      | 26                                           |
| 3.3 Caratterizzazione morfologica e morfometrica .....                                   | 27                                           |
| 3.4 Analisi temporale dell'uso del suolo .....                                           | 33                                           |
| 3.5 Analisi dei nitrati .....                                                            | 35                                           |
| 4 DISCUSSIONE.....                                                                       | 39                                           |
| 5 CONCLUSIONI.....                                                                       | 42                                           |
| 6 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA .....                                                        | 43                                           |

# 1 INTRODUZIONE

## 1.1 Il problema ambientale

La tecnologia e lo sfruttamento delle riserve di energia fossile hanno consentito all'uomo di superare temporaneamente la capacità portante naturale, ma al contempo hanno creato un enorme debito ecologico che si traduce in una minore disponibilità di risorse naturali per le generazioni future. Tutto ciò è in netto contrasto con la definizione di sviluppo sostenibile secondo la quale la crescita e lo sviluppo umano deve avvenire in maniera tale da non compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni (Conferenza ONU sull'Ambiente e lo Sviluppo, Rio de Janeiro, 1992).

Particolarmente colpiti sono gli ecosistemi di acque interne che risentono di pesanti pressioni antropiche derivanti dallo sfruttamento delle risorse idriche e di materiali inerti e da profonde modificazioni idro-morfologiche, ad esempio dagli sbarramenti idroelettrici e dalle opere per la navigazione (Marchetti, 1993).

Particolarmente grave è la situazione dei corsi d'acqua planiziali, ovvero delle aree pianeggianti dei bacini idrografici soggette ad un'estesa perdita di suolo causata dall'urbanizzazione e dalla crescita delle infrastrutture, dall'inquinamento causato da agglomerati urbani sempre più invasivi, dal diffuso inquinamento agricolo e zootecnico, responsabile in particolare dell'aumento di azoto (N) e fosforo (P) nelle acque.

Nelle pianure alluvionali si assiste pertanto ad un esteso e crescente degrado che può essere riassunto in quattro grandi problematiche.

- Degradazione della qualità delle acque che conduce ad un cambiamento dello stato trofico da condizioni di oligotrofia a condizioni di eutrofia. Tutto ciò è dovuto principalmente all'eccessivo apporto di N e stimolano la produttività primaria degli ecosistemi acquatici causando perturbazioni dei cicli biogeochimici e della disponibilità di ossigeno nelle acque.
- Perdita della biodiversità dovuta alla scomparsa delle aree naturali, soprattutto zone umide, dai margini del sistema agricolo e degli ecosistemi acquatici (Santoul et al., 2004). In particolare, l'ambiente golenale possiede una grande varietà di habitat in grado di

ospitare centinaia di specie sia vegetali che animali, inoltre le zone umide sono aree di riproduzione e nursery di gran parte delle specie che vivono nei corsi d'acqua.

- Interruzione della connettività longitudinale e trasversale che si traduce in una perdita della funzionalità dell'ambiente fluviale (Viaroli et al., 2010; 2014). In particolare, si verifica la perdita di lanche, stagni e ambienti umidi temporanei o permanenti che fungono da filtro in grado di trattenere e trasformare le sostanze inquinanti provenienti dai sistemi urbani e agricoli (Nizzoli et al., 2020);
- Perdita generalizzata di ecosistemi acquatici da cui consegue la perdita di importanti servizi ecosistemici utili per l'uomo.

Un esempio dello stato attuale degli ambienti umidi è dato dai censimenti effettuati tra il 1970 fino al finire del XX secolo nel tratto piacentino del fiume Po (Figura 1).



**Figura 1:** variazione del numero di ambienti acquatici marginali nella golena del Po in provincia di Piacenza dal 1970 al 1998 (Viaroli & Bartoli, 2009).

In una piccola parte della piana golenale del fiume, tra il 1970-75 e il 1997-1998, si è verificata la perdita di circa l'80% degli ambienti acquatici in ambito golenale. Questo fenomeno è in larga parte riconducibile alla bacinizzazione e all'intensificazione delle attività di escavazione e prelievo di materiale litoide come sabbie e ghiaie, a partire dalla seconda metà del secolo XX. Tale sviluppo è avvenuto in mancanza di una pianificazione di lungo termine e di regole e norme capaci di

preservare le aree naturali e di prevenire i danni che nel tempo si sono verificati, in particolare l'erosione e l'abbassamento dell'alveo di magra fluviale seguito dalla progressiva pensilizzazione e dall'isolamento delle golene fluviali (Govi e Turitto, 1993; Lamberti, 1993).

## 1.2 Servizi ecosistemici

I servizi ecosistemici consistono in tutti i benefici che gli esseri umani possono ottenere dagli ecosistemi (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Secondo questa definizione esistono diverse tipologie di benefici da cui l'uomo può attingere, raggruppabili in tre categorie (Haines-Young & Potschin, 2018):

- **approvvigionamento:** comprende la produzione di cibo, acqua potabile, materie prime ed energia, principi attivi di farmaci e materiale genetico;
- **regolazione e mantenimento:** comprende regolazione del clima, mitigazione di eventi meteorologici estremi tra cui le alluvioni, mareggiate, ecc., depurazione dell'acqua, impollinazione, controllo di parassiti e vettori di malattie, ciclo dei nutrienti, formazione del suolo e produzione primaria;
- **valori culturali:** estetici, didattici, spirituali, ricreativi e sportivi.

Data la loro capacità di generare benefici, e data anche la natura dei benefici stessi, i servizi ecosistemici svolgono quindi un ruolo fondamentale per la società e per il mantenimento della vita sulla Terra. La perdita di tali servizi è causa di problemi che colpiscono soprattutto le fasce più povere della popolazione mondiale che maggiormente dipendono dai beni naturali. Questi garantiscono sicurezza alimentare, disponibilità di acqua potabile, benessere e salute, accesso a fonti energetiche e materie prime, mitigazione degli effetti delle calamità naturali.

Capitale naturale e beni e servizi dell'ecosistema hanno anche un valore economico che, se adeguatamente contabilizzato, potrebbe contribuire in modo altamente significativo al PIL mondiale (si veda ad esempio il progetto *The Economics of Ecosystem and Biodiversity*: - <http://www.teebweb.org/>).

### 1.3 Attività estrattiva e laghi di cava

L'attività di escavazione ed estrazione di materiali litoidi ha subito un forte incremento a partire dal secondo dopoguerra, come conseguenza della necessità di ricostruire centri urbani e infrastrutture e del successivo sviluppo economico.

L'attività estrattiva ha interessato soprattutto gli ambiti fluviali dove si rinvenivano importanti depositi di ghiaia e sabbia. L'escavazione può comunque avvenire in due modalità: in asciutta (cave al di sopra della falda) o in acqua (cave di falda). Nel caso della coltivazione in asciutta, la cava non arriva ad intercettare la falda e pertanto non riceve apporti idrici dall'esterno, a parte le acque piovane ed, eventualmente, del deflusso superficiale. Una volta terminate le attività estrattive, le cave di sopra falda possono essere ritombate e riempite nuovamente con materiali inerti o rifiuti, diventando delle vere e proprie discariche, oppure possono essere collegate a corpi idrici superficiali ed essere adibite a bacini in grado di costituire una riserva d'acqua (Archetti, 2004). Per quanto riguarda la coltivazione in acqua, l'estrazione avviene in corrispondenza di corsi d'acqua e di falde non confinate le cui acque riempiono progressivamente la cavità. Un lago di cava, inoltre, può trovarsi in una zona talmente vicina al fiume da esservi direttamente connesso ed essere così periodicamente riempito dalle piene fluviali piuttosto che dalle acque sotterranee (Figura 2).

L'estrazione di materiali inerti quali sabbie, ghiaie e argille, costituisce ancora oggi un settore che genera circa il 6% del PIL nazionale, assumendo grande valenza economica per il nostro paese. In particolare, le aree fluviali di pianura nel bacino del fiume Po, tradizionalmente sfruttate per l'approvvigionamento di inerti, dal dopoguerra in poi hanno subito massicci prelievi di sabbia e ghiaia, passando da  $\sim 500.000 \text{ m}^3 \text{ anno}^{-1}$  nel 1955 a  $\sim 12.000.000 \text{ m}^3 \text{ anno}^{-1}$  tra il 1970 e il 1980 (Lamberti, 1993). Come conseguenza, il letto del fiume ha subito una progressiva incisione e, ad esempio, a valle di Cremona si è verificata una diminuzione della quota di fondo di oltre 6 m. In seguito alle palesi modificazioni idro-morfologiche del fiume Po e dei suoi affluenti, l'attività estrattiva fu spostata dall'alveo attivo alle golene fluviali e al di fuori delle arginature. Si presentarono così problemi inediti, ma anche nuove opportunità per applicare i concetti della limnologia alla riqualificazione degli ambiti fluviali di pianura, così pesantemente compromessi.



**Figura 2:** stato di connettività di un lago di cava con il fiume (connesso, non connesso), in base alla vicinanza con esso (Peveroni, 2014).

### 1.3.1 Formazione e caratteristiche

I laghi di cava sono ambienti di formazione secondaria generati come conseguenza dell'escavazione ed estrazione di materiale litoide. Sono situati in genere nelle golene fluviali e pertanto periodicamente vengono riempiti dall'acqua proveniente dalle piene fluviali o dalle acque sotterranee. Spesso raggiungono dimensioni considerevoli, sono riconoscibili a causa della loro forma generalmente regolare, presentano profondità che possono raggiungere i 50 m e sono in grado di contenere notevoli volumi d'acqua, fino a 2-3 milioni di  $m^3$ , sufficienti per essere assimilati a veri ambienti lacustri (Di Natale & Durio, 1995; Viaroli et al., 1994, 2002).

Con un approccio empirico, abbiamo stimato il numero di laghi che si può formare in un anno (NL) a partire dai quantitativi di sabbia e ghiaia estratti in un anno assumendo che tutte le cave siano in acqua e che abbiano superficie di 20 ha, profondità media di 10 m e un volume pari a  $2 \times 10^6 m^3$ . Dai dati di tabella 1 si evince che si tratta di numeri rilevanti a livello sia mondiale che locale: ad esempio nel solo bacino del Po si potrebbero formare 18 laghi in un anno.

**Tabella 1:** numero potenziale di laghi che si possono formare stimato sulla base dei volumi escavati (<sup>1</sup>Peckenhams et al., 2009, <sup>2</sup>European Aggregate Association 2011-2012, <sup>3</sup>Legambiente, rapporto cave 2011).

| <b>Territorio</b> | <b>volume (m<sup>3</sup>)</b> | <b>anno</b> | <b>Ref.</b> | <b>NL</b> |
|-------------------|-------------------------------|-------------|-------------|-----------|
| USA               | 800x10 <sup>6</sup>           | 2005        | 1           | 400       |
| Europa + Russia   | 4900x10 <sup>6</sup>          | 2010        | 2           | 2450      |
| Italia            | 90x10 <sup>6</sup>            | 2010        | 3           | 45        |
| Bacino del Po     | 36x10 <sup>6</sup>            | 2010        | 3           | 18        |

### 1.3.2 Importanza ecologica

Dal punto di vista ecologico questi laghi fungono da veri e propri sostituti delle zone umide naturali, di conseguenza sono in grado di offrire importanti funzioni naturali e servizi ecosistemici tipici di questi ambienti.

- Possono essere utilizzati come zone per la conservazione delle specie nel contrasto alla perdita di biodiversità, in quanto l'ambiente golenale possiede una grande varietà di habitat in grado di ospitare centinaia di specie, sia ittiche che appartenenti all'avifauna (Santouil et al. 2004). Inoltre, le zone umide sono aree di riproduzione e nursery per numerose specie presenti nel fiume.
- Possono fungere da zone tampone in grado di formare dei veri e propri filtri che trattengono e trasformano le sostanze inquinanti rilasciate dai sistemi urbani, industriali ed agricoli per far fronte all'inquinamento principalmente da azoto e fosforo (Nizzoli et al., 2010, 2014, 2020, Mollema & Antonellini, 2016);
- Sono di estrema importanza per la funzionalità fluviale nell'ambito della connettività laterale, in quanto consentono lo scambio di nutrienti e il riciclo di materia organica tra l'ecosistema acquatico e gli ambiti terrestri circostanti (Kattner et al., 2000).

- Grazie alla loro capacità tampone, sono in grado di mantenere una buona qualità delle acque di falda per l'approvvigionamento idro-potabile (Weilhartner et al., 2012).

### 1.3.3 Problemi e opportunità

La formazione dei laghi di cava rappresenta allo stesso tempo sia una problematica che un'opportunità: le attività estrattive, insieme allo sfruttamento agricolo delle golene ed alla costruzione di infrastrutture per la navigazione e la sicurezza idraulica possono provocare impatti e disturbo sulla struttura e sul funzionamento fluviale, soprattutto quando i laghi sono abbandonati al termine dell'attività estrattiva.

Come già detto, la formazione di questi ecosistemi può però rappresentare un'importante occasione se ci si pone come obiettivo la loro riqualificazione allo scopo di ricostruire e/o sostituire gli ambienti acquatici golenali che nel tempo sono andati persi.

In particolare rivestono una grande importanza sia la progettazione che la gestione. La progettazione del corpo di cava è cruciale in quanto da essa dipendono diversi fattori e processi. In particolare dalla forma della cuvetta lacustre dipendono processi fisici quali la stratificazione e il rimescolamento della colonna d'acqua che, a loro volta, sono influenti sull'ossigenazione delle acque e, a cascata, sulla qualità delle biocenosi. Una volta conclusa l'escavazione, risultano fondamentali la destinazione d'uso e la conseguente gestione. Così si dovranno valutare costi e benefici, non solo economici ma anche ambientali, di opzioni che spaziano dalle attività didattiche, di ricerca e conservazione, a quelle sportive e ricreative, fino ad arrivare all'acquacoltura o all'approvvigionamento idrico. In particolare, queste attività dovranno essere valutate come servizi dell'ecosistema, con la consapevolezza che dalla qualità di quest'ultimo dipenderà il valore dei servizi.

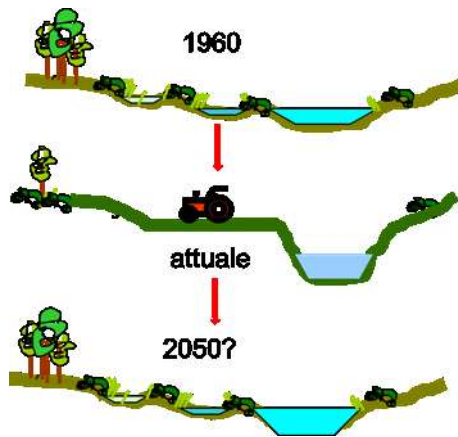
## 1.4 Gestione e progettazione dei laghi di cava in un'ottica di recupero ambientale

A partire dal 1990, sono state avviate le prime esperienze di recupero ambientale a posteriori, spesso con finalità più estetiche che ecologiche (Viaroli et al., 2002). Sulla base delle prime

esperienze e delle ricerche sviluppate negli anni seguenti, in considerazione anche della rilevanza dell'attività estrattiva per l'economia regionale, la Regione Emilia Romagna ha messo a punto un manuale contenente delle linee guida per il recupero ambientale dei siti interessati dalle attività estrattive nell'ambiente golenale del Po (AAVV, 2007). I punti salienti di tale documento sono di seguito riassunti:

- caratterizzazione del territorio che ospita la cava per gli aspetti legati a geomorfologia, vegetazione, fauna ed ecosistemi naturali, aree protette, agricoltura e paesaggio fluviale;
- indirizzi per la coltivazione della cava aventi l'obiettivo di raggiungere buone condizioni di qualità delle acque e la presenza di componenti biologiche autoctone e con elevato valore ambientale ed ecologico;
- verifica della compatibilità e della sicurezza idraulica del progetto proposto,
- progettazione della cuvetta lacustre, con particolare attenzione alla batimetria, con l'obiettivo di garantire il periodico rimescolamento delle acque; a tale scopo viene proposta anche la connessione tra lago di cava e fiume; l'impianto della vegetazione e l'uso dell'ingegneria naturalistica per ricostruire ambienti che abbiano forme quanto più naturali possibile;
- progettazione e modellamento delle aree litoranee di basso fondale e della fascia di transizione terra-acqua per favorire lo sviluppo di vegetazione e fauna caratteristiche delle zone umide locali;
- identificazione della destinazione d'uso una volta cessata l'attività estrattiva.

Più in generale, questa tipologia di interventi mira a trovare un compromesso tra lo sfruttamento di materiali inerti di pregio e la riqualificazione del paesaggio fluviale, avendo come riferimento le morfologie naturaliformi del recente passato (Figura 4a). Tale obiettivo potrà essere compiutamente raggiunto quando si potrà disporre di un'ampia rete ecologica di laghi di cava riqualificati (Figura 4b).



**Figura 3a:** possibile traiettoria di recupero della connettività fiume-golena attraverso la riqualificazione dei laghi di cava (Viaroli & Bartoli, 2009).



**Figura 3b:** ipotesi di rete di laghi di cava nella golena del Po tra Polesine Parmense e Villanova sull'Arda.

## 1.5 Area di studio: il bacino del Po

Il bacino idrografico del Po (Figura 4) è il più grande d'Italia con una superficie pari a circa 74.000 km<sup>2</sup> quasi tutti situati all'interno del territorio italiano, mentre una piccola parte ricade in Svizzera (bacino del fiume Toce) e in Francia. La popolazione è circa 17 milioni di abitanti (Viaroli et al., 2010) e comprende circa 3200 comuni appartenenti a sette regioni diverse: Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Provincia Autonoma di Trento, Veneto, Emilia-Romagna, Liguria e Toscana.

Il bacino è attraversato dal fiume Po, il principale fiume italiano per lunghezza (652 km) e per portata media (1520 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, periodo 1968-2018). Il fiume ha origine dal monte Monviso ed è alimentato da 141 affluenti. Esso attraversa buona parte della Pianura Padana e sfocia nel mar Adriatico formando un delta di 380 km<sup>2</sup>.

L'intera area ha un enorme interesse economico in quanto genera il 40% del PIL nazionale e una quota significativa del PIL dei vari settori produttivi: 37% dell'industria nazionale, 55% della zootecnia (vengono allevati circa 6 milioni di capi suini e 3 milioni di capi bovini), 35% della produzione agricola e contribuisce al 46% dei posti di lavoro (Viaroli et al., 2010).



**Figura 4:** confini del bacino idrografico del fiume Po (linea blu) e delle regioni, o porzioni di esse, comprese nel bacino (linee gialle).

Una simile produttività implica un intenso sfruttamento di suolo e risorsa idrica e un massiccio utilizzo di sostanze chimiche; tutto ciò va a rispecchiarsi in una profonda alterazione del territorio e della qualità delle acque. Infatti, le acque del Po riversano al mare Adriatico grandi quantità di fosforo e azoto (Viaroli et al., 2018).

Questo deterioramento interessa sia le acque superficiali che quelle di falda, portando a conseguenze di tipo economico, ambientale e per la salute umana, dal momento che le acque sotterranee rappresentano una parte fondamentale dell'approvvigionamento idrico ad uso potabile, agricolo e industriale. Inoltre, questo eccesso di nutrienti porta a fenomeni di eutrofizzazione delle acque costiere, ovvero alla crescita incontrollata di micro- e macroalghe causando importanti ripercussioni sulla pesca e sull'acquacoltura e sull'economia turistica della costa veneta e romagnola.

Lo sfruttamento della risorsa idrica è dovuto anche alle profonde alterazioni geomorfologiche che interessano il Po e i suoi affluenti, dovute alla presenza di sbarramenti e rettificazione che di fatto ne hanno interrotto la connettività longitudinale e trasversale oltre che causare l'impossibilità per i corsi d'acqua di evolvere in modo naturale, ostacolando la formazione di nuovi ambienti acquatici e portando all'interramento e scomparsa degli ambienti presenti in passato (Viaroli e Bartoli, 2009).

## 2 Obiettivi della tesi

Il progetto di tesi ha come obiettivo analizzare la presenza e la consistenza numerica dei laghi di cava nel bacino del Po. In particolare verranno utilizzati i dati provenienti dai sistemi di telerilevamento e dai Sistemi Informativi Geografici (GIS), con l'obiettivo di creare un dataset di informazioni riguardanti tutti i laghi di cava presenti all'interno del bacino del Po.

In dettaglio, gli obiettivi saranno:

- identificare e valutare il numero dei laghi di cava;
- analizzare le caratteristiche morfologiche e morfometriche dei laghi individuati;
- valutare lo sviluppo temporale dell'utilizzo del suolo nei pressi di questi laghi;
- fornire indicazioni sulla qualità ecologica dei laghi in base al carico azotato.

### 3 MATERIALI E METODI

Per ottenere un primo screening dei laghi di cava sono state utilizzate le informazioni contenute nei geoportali regionali, esaminando i dati dei Sistemi Informativi Geografici (GIS): a partire da questi, sono stati scaricati tutti gli shapefile relativi ai corpi idrici superficiali e le mappe relative all'uso del suolo nei diversi anni. Non essendo dati sempre aggiornati, ciascun corpo idrico è stato messo a confronto con le immagini satellitari attuali di Google Earth, in modo da eliminare tutti quei corpi idrici che non esistono più.

Infine, è stato fatto un ulteriore confronto con i dataset del progetto Landsat disponibili sul sito web Global Surface Water Explorer (GSWE) (<https://global-surface-water.appspot.com/map>), all'interno del quale è presente un database che mappa la posizione e la distribuzione temporale degli specchi d'acqua a scala globale e fornisce inoltre, statistiche sull'estensione e il cambiamento di questi ambienti acquatici (dagli anni '80 fino al 2016). Questo dataset può essere utile anche per supportare diverse applicazioni, tra cui la gestione delle risorse idriche, la modellazione climatica, la conservazione della biodiversità e la sicurezza alimentare.

In questo modo è stato possibile effettuare uno screening preliminare, grazie al quale sono stati individuati più di 12000 corpi idrici. Tra questi, sono stati identificati oltre 2000 laghi di cava sfruttando le loro caratteristiche visive come: morfologia, dimensioni e/o presenza di strutture e mezzi utilizzati per l'escavazione. Sono stati poi scelti dei sottocampioni (Tile) per i quali effettuare analisi morfologiche e morfometriche più dettagliate come il calcolo di area e perimetro, indice di sinuosità, area e perimetro vegetati, e analisi dell'evoluzione temporale dell'uso del suolo nelle aree che circondano i laghi, unitamente ad una stima preliminare sullo stato della qualità delle acque mediante analisi del carico azotato sotto forma di nitrati all'interno di un gruppo di laghi.

Tutti questi calcoli e analisi sono stati fatti utilizzando gli strumenti presenti all'interno del software GIS.

### 3.1 Sistemi Informativi Geografici (GIS)

Il Sistema Informativo Geografico (GIS), o Sistema Informativo Territoriale (SIT), è un sistema progettato con dati riferiti allo spazio geografico, quindi un sistema che contiene specifiche funzioni per acquisire, elaborare, gestire e restituire dati geografici (G. Biallo, 2005, Introduzione ai Sistemi Informativi Geografici, MondoGIS).

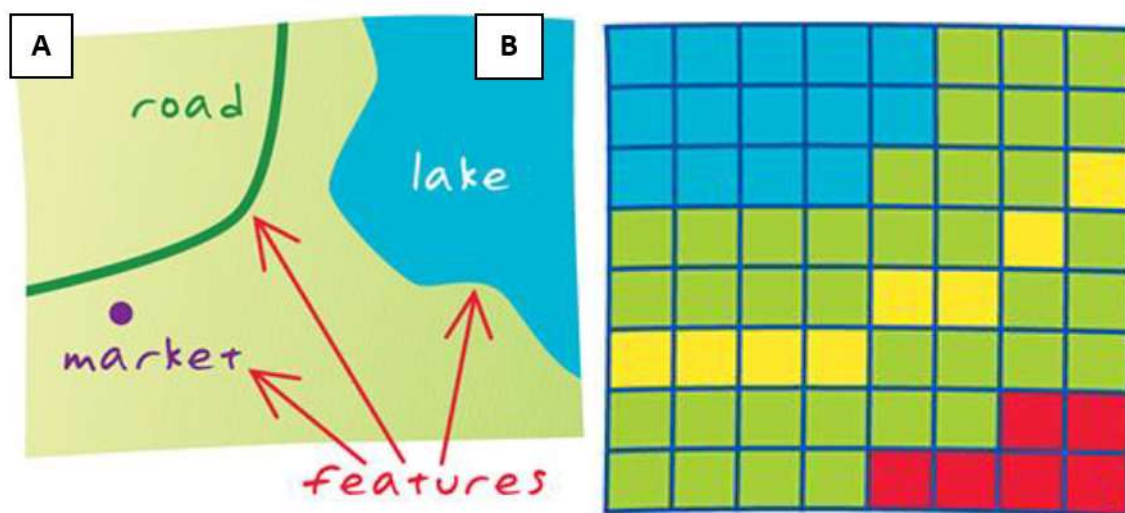
Le principali caratteristiche di questi sistemi sono:

- la georeferenziazione delle informazioni, ovvero il riferimento di un dato ad una collocazione fisica sulla superficie terrestre attraverso delle coordinate espresse in gradi e riferite ad un sistema di riferimento geografico, in modo da assicurare la trasferibilità dell'informazione;
- la possibilità di manipolare i dati e archiviare grandi e complesse quantità di informazioni spaziali e non spaziali;
- la possibilità di gestire banche dati composte da dati di cartografia numerica georeferenziata (in coordinate), attributi descrittivi (quantitativi e qualitativi) direttamente associati agli elementi rappresentati sulla cartografia (entità grafiche), o qualsiasi altro dato georeferibile;
- la possibilità di effettuare delle analisi spaziali e delle correlazioni tra i dati archiviati;
- la possibilità di generare nuove informazioni elaborando i dati inizialmente contenuti nel sistema.

Gli elementi geografici contenuti in un GIS possono essere distinti in oggetti o fenomeni: gli oggetti sono dati che variano in modo discreto, ovvero che hanno un limite individuabile, come ad esempio le entità fisiche (edifici, strade, acquedotti ...) o le entità giuridiche (stati, comuni, proprietà ...); i fenomeni sono dati che presentano variabilità continua e pertanto non hanno limiti individuabili, come ad esempio l'altitudine, la temperatura, la pendenza del suolo.

Nelle rappresentazioni grafiche generalmente gli oggetti vengono rappresentati tramite modelli vettoriali, mentre i fenomeni vengono rappresentati tramite modelli raster (Figura 5); la differenza sta nel fatto che i dati vettoriali sono costituiti da elementi codificati e memorizzati sulla base delle loro coordinate, mentre i dati raster sono organizzati in una matrice di celle, dove per ogni cella è possibile attribuire un'unica informazione che può essere di tipo grafico, come il

colore, o di tipo descrittivo, come temperatura, pendenza o quota del terreno. All'interno di un GIS queste due strutture possono essere sovrapposte.



**Figura 3:** A) rappresentazione di un modello vettoriale; B) rappresentazione di un modello raster.

All'interno di una banca dati, l'informazione geografica viene solitamente organizzata e suddivisa in informazione di tipo spaziale, contenente la geometria degli oggetti espressa mediante punti, linee e poligoni, e informazione di tipo non spaziale, contenente informazioni sulle caratteristiche e sulle proprietà degli oggetti o dei fenomeni rappresentati, raggruppata all'interno di tabelle. Utilizzando questo sistema abbiamo creato un database che racchiude informazioni sulle caratteristiche morfologiche e morfometriche dei laghi individuati (area e perimetro dei laghi, indice di sinuosità della costa, area vegetata che circonda il lago, percentuale di perimetro del lago interessato da vegetazione) e sullo stato delle attività estrattive (anno di inizio delle attività estrattive e possibile cessazione di queste ultime).

### 3.2 Analisi temporale dell'uso del suolo

Per quanto riguarda l'analisi dell'uso del suolo, sono state utilizzate le informazioni temporali presenti all'interno dei geoportali regionali. A seconda della regione, sono disponibili diversi livelli di dettaglio: come si può vedere dalla tabella 2, Emilia-Romagna e Lombardia hanno una buona

rappresentazione temporale, al contrario il Piemonte non è ben rappresentato, con una scarsa quantità di dati reperibili.

**Tabella 2:** tabella contenente le regioni e i rispettivi anni rappresentati da dati sull'utilizzo del suolo.

| REGIONE        | ANNI RAPPRESENTATI |      |      |      |      |      |
|----------------|--------------------|------|------|------|------|------|
| Emilia-Romagna | 1976               | 1994 | 2003 | 2008 | 2014 | 2017 |
| Lombardia      | 1980               | 1999 | 2007 | 2012 | 2015 | 2018 |
| Piemonte       | 2016               | 2017 |      |      |      |      |

Una classificazione dell'uso del suolo è necessaria per la valutazione della qualità ecologica dei laghi. All'interno del geoportale della regione Lombardia è presente il database DUSAF, il quale definisce cinque classi differenti:

1. aree antropizzate;
2. aree agricole;
3. territori boscati e ambienti semi-naturali;
4. aree umide;
5. corpi idrici.

I livelli da 1 a 3 sono generali e definiti in conformità con la classificazione del Corine Land Cover (CLC), un inventario istituito a livello europeo in modo da poter effettuare confronti interregionali. Il quarto e il quinto livello sono locali e la loro definizione viene effettuata mediante l'utilizzo di database ausiliari. La classificazione finale all'interno della tesi è stata fatta uniformando tutti i dataset secondo la classificazione del CLC.

Le analisi sono state effettuate mediante la sovrapposizione e la successiva intersezione delle mappe dell'uso del suolo, con delle aree che circondano ciascun lago di cava presente all'interno dei sotto-campioni (zona buffer).

La zona buffer consiste in una zona tampone che circonda ciascun lago di cava, calcolata in base alle fasce fluviali in cui ricadono questi ultimi. Al fine di poter osservare un buon stato di qualità delle acque, le pressioni antropiche all'interno di queste aree dovrebbero essere quanto più minimizzate, allo scopo di diminuire il disturbo nei confronti dell'ecosistema stesso.

Le fasce fluviali sono invece le zone adiacenti all'alveo fluviale e vengono suddivise in base all'assetto e al rischio idrogeologico a cui vanno incontro a causa della vicinanza del corso d'acqua; a tale scopo sono identificate all'interno dei Piani Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI):

- fascia di deflusso della piena (Fascia A): costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente del deflusso della corrente per la piena di riferimento, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena;
- fascia di esondazione (Fascia B): esterna alla precedente, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi della piena di riferimento. Il limite di tale fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento ovvero sino alle opere idrauliche esistenti o programmate di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento);
- area di inondazione per piena catastrofica (Fascia C): costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quella di riferimento.

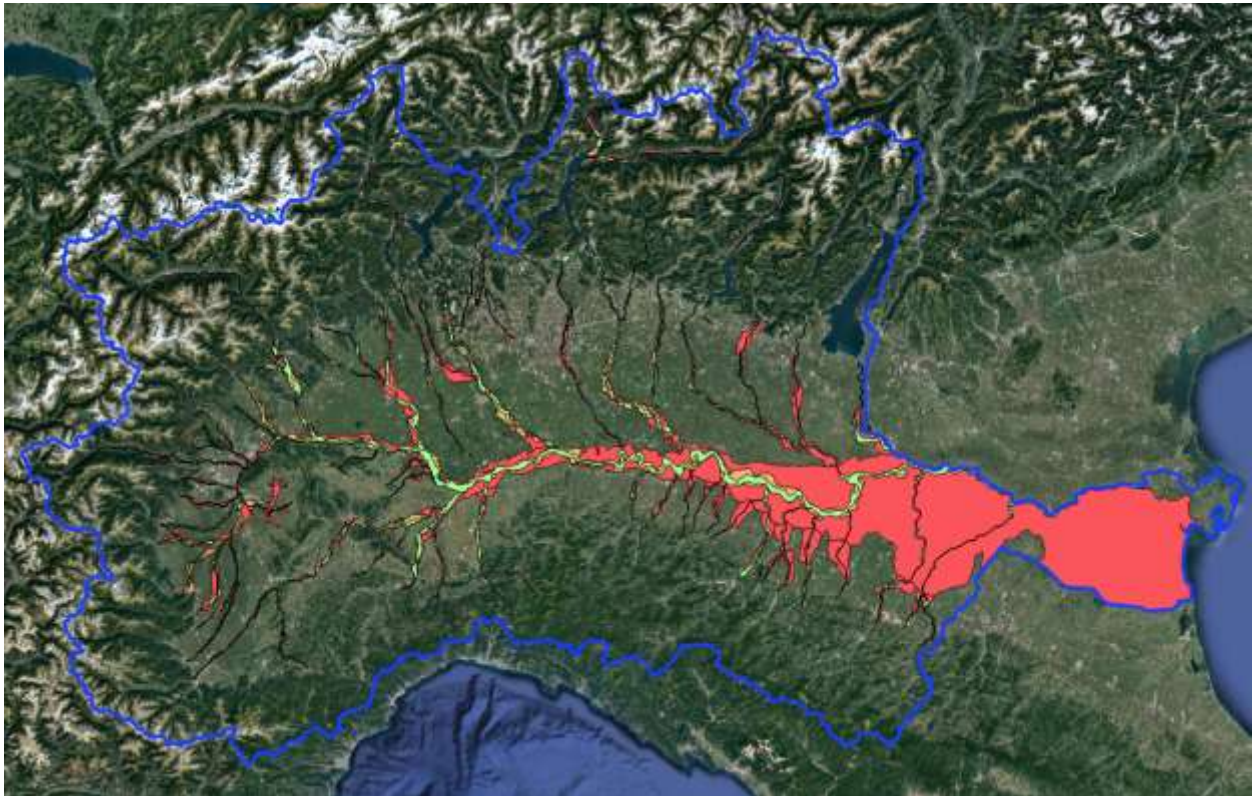
In base alle fasce in cui ricadono i laghi di cava, ed in base alle indicazioni presenti all'interno del manuale sull'analisi delle pressioni (Linee Guida SNPA n. 11/2018, Linee guida per l'analisi delle pressioni ai sensi della Direttiva 2000/60/CE) è stata calcolata una zona buffer di 500 m per i laghi che ricadono all'interno della zona golenale del Po e della fascia C, mentre è stata calcolata una zona buffer di 250 m per i laghi che ricadono al di fuori delle suddette zone (Figura 6).

### 3.3 Telerilevamento

La maggior parte dei dati utilizzati sono stati acquisiti grazie ai processi di telerilevamento. Il telerilevamento consiste in un approccio multidisciplinare allo studio del territorio e dell'ambiente, che consente di acquisire informazioni dettagliate sulle caratteristiche di superfici o porzioni di spazio a distanza (@CNR-IREA-Progetto CATGIS, 2005).

L'acquisizione dei dati avviene grazie a speciali sensori che registrano le informazioni trasportate dall'energia elettromagnetica emessa, riflessa o diffusa dalle superfici osservate. Il processo

sfrutta il diverso modo in cui le superfici naturali interagiscono con l'energia elettromagnetica proveniente da una sorgente per ottenere informazioni sulle loro caratteristiche. L'interazione tra l'energia incidente e le diverse superfici da essa colpita viene registrata e misurata da speciali sensori montati su diverse piattaforme come satelliti o aerei.



**Figura 6:** fasce fluviali del bacino del Po. In verde la Fascia A, in arancio la fascia B e in rosso la Fascia C.

Il primo fondamentale requisito all'interno di questo processo è la presenza di una fonte di energia che può essere naturale (sole) o artificiale (radar). Lungo il suo percorso, l'energia interagisce con l'atmosfera entrando in contatto con le particelle che la compongono (vapore acqueo, gas e polveri in sospensione). L'interazione con queste particelle può indurre alla modificazione della radiazione stessa, generando fenomeni di rifrazione, diffusione e assorbimento. Una volta che l'energia elettromagnetica raggiunge la superficie, essa viene assorbita, riflessa e riemessa a seconda delle caratteristiche delle superficie in questione.

Osservando come questa interazione varia alle diverse lunghezze d'onda, possiamo ottenere una sorta di impronta digitale, chiamata firma spettrale, che risulta essere peculiare per ogni superficie differente.

I dati registrati dai sensori vengono infine utilizzati per generare mappe tematiche in grado di fornire informazioni utili per lo studio e la gestione dell'ambiente (@CNR-IREA-Progetto CATGIS, 2005).

### 3.3.1 Satelliti utilizzati

All'interno di questo progetto di tesi sono stati utilizzati i dati acquisiti dalla costellazione di satelliti denominata Landsat.

La costellazione Landsat è composta da un gruppo di 8 satelliti eliosincroni (alcuni dismessi, mentre altri ancora attivi), che raccolgono dati da più di 30 anni (Figura 7). La missione è stata programmata dalla NASA per lo studio delle risorse terrestri e dell'ambiente. In particolare, sono in grado di ottenere informazioni riguardanti la temperatura della superficie terrestre, le superfici acquatiche, le zone bruciate e le zone ricoperte di neve.



**Figura 7:** cronologia dei satelliti della costellazione Landsat (fonte: [www.landsat.usgs.gov](http://www.landsat.usgs.gov)).

Il primo degli 8 satelliti è stato lanciato nel 1972 con il nome di Earth Resources Technology Satellite (ERTS-1), poi rinominato Landsat-1, ed equipaggiato con un sensore Return Beam Vidicon (RBV) e con un Sistema Scanner Multispettrale (MSS).

Con i successivi lanci, i satelliti furono equipaggiati con versioni potenziate di MSS chiamate Thematic Mapper (TM) ed Enhanced Thematic Mapper (ETM). Infine, nel 2013 è stato lanciato il Landsat-8, equipaggiato con un Thermal Infrared Sensor (TIRS) contenente 11 bande spettrali.

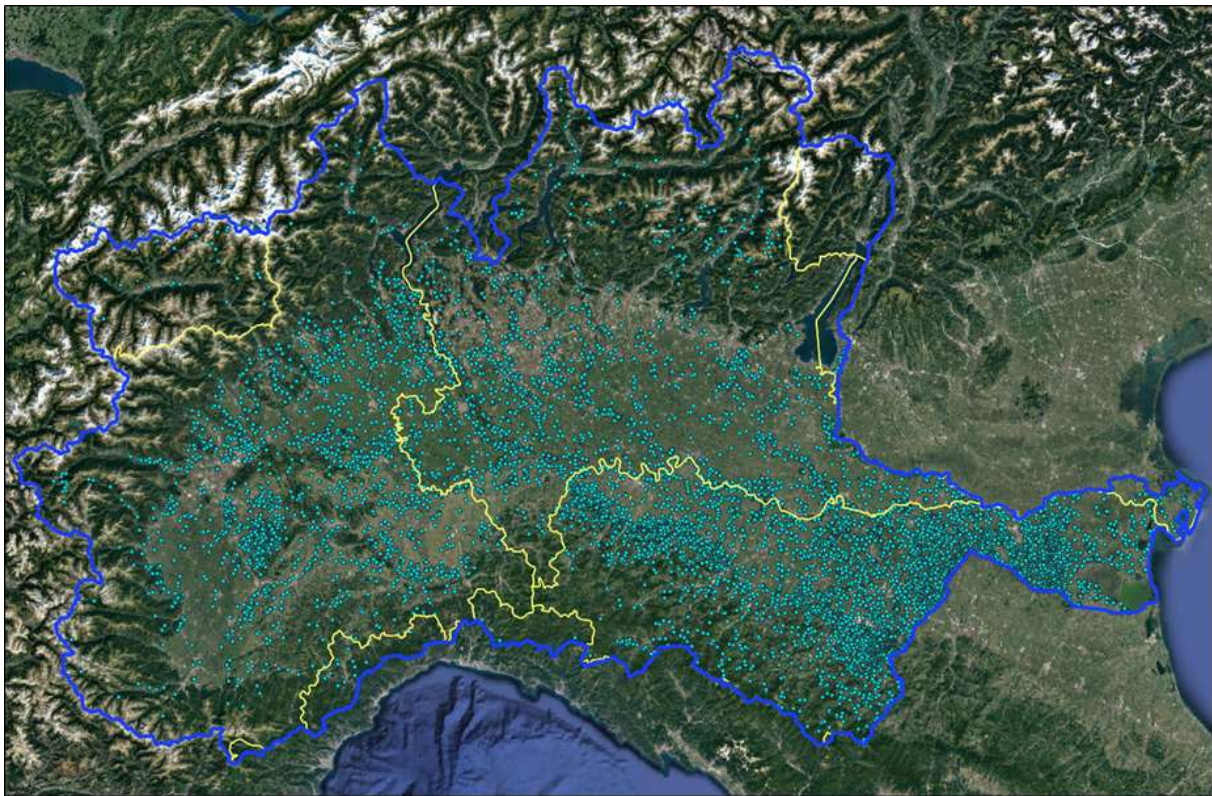
Un ulteriore satellite è in corso di sviluppo, il Landsat-9, il cui lancio è stato annunciato per settembre 2021 (Landsat Missions, USGS.gov).

I dati forniti da questi satelliti e consultabili all'interno del sito web GSWE sono stati utilizzati per il confronto con quelli scaricabili dai geoportali regionali, in modo da ricostruire l'evoluzione temporale degli specchi d'acqua.

## 4 RISULTATI

### 4.1 Identificazione e conteggio dei laghi di cava

Per l'identificazione e il conteggio dei laghi di cava, è stato effettuato in primo luogo uno screening di tutti gli specchi d'acqua presenti all'interno del bacino idrografico del Po. Questa operazione è stata resa possibile confrontando i database regionali dei geoportali con immagini satellitari odierne fornite da Google Earth (Figura 8).



**Figura 8:** *identificazione degli specchi d'acqua presenti all'interno del bacino idrografico del Po.*

In secondo luogo, tutti gli specchi d'acqua individuati sono stati contati e categorizzati sulla base delle loro caratteristiche visive, della loro posizione e della loro possibile destinazione d'uso (Tabella 3); gli specchi d'acqua non classificati (NA), sono risultati tali in quanto aventi dimensioni troppo piccole o in quanto non classificabili all'interno delle categorie individuate. Inoltre, sono stati suddivisi all'interno delle regioni in cui ricadono (Tabella 4).

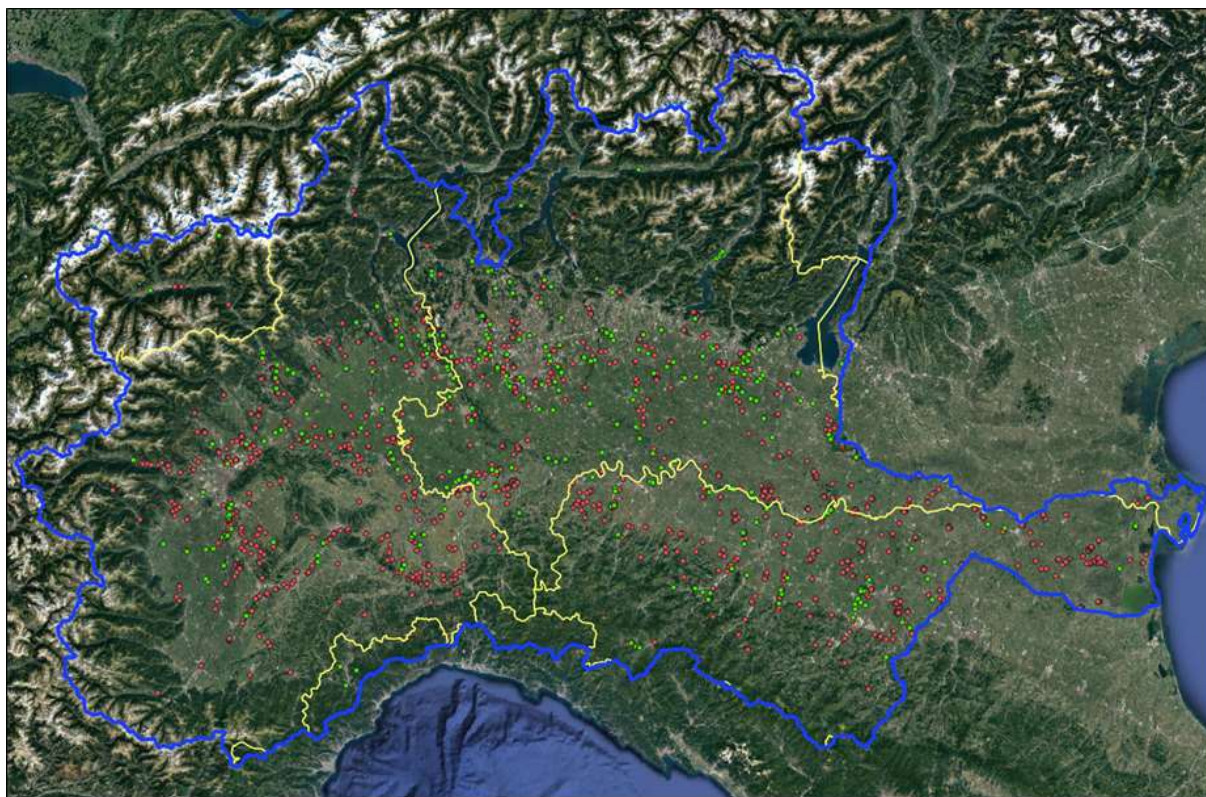
**Tabella 3:** conteggio e categorizzazione degli specchi d'acqua individuati nel bacino del Po.

| <b>Categoria</b>    | <b>N°</b>   |
|---------------------|-------------|
| NA (-)              | 1264        |
| Acquacoltura        | 533         |
| Agricolo            | 5020        |
| Alta quota          | 117         |
| Artificiale         | 198         |
| Bosco               | 781         |
| Ramo fluviale       | 57          |
| Diga                | 38          |
| Fanghi agricoli     | 745         |
| Fiume               | 623         |
| Campi da golf       | 174         |
| Industriale         | 126         |
| Parco               | 48          |
| Urbano              | 144         |
| Zona umida          | 735         |
| <b>Lago di cava</b> | <b>2051</b> |

**Tabella 4:** suddivisione per regione degli specchi d'acqua individuati.

| <b>Regione</b>       | <b>N°</b>    |
|----------------------|--------------|
| Piemonte             | 2858         |
| Valle d'Aosta        | 26           |
| Lombardia            | 2638         |
| Trentino Alto-Adige  | 0            |
| Veneto               | 115          |
| Liguria              | 23           |
| Emilia Romagna       | 6993         |
| Toscana              | 2            |
| <b>Bacino del Po</b> | <b>12655</b> |

In totale sono stati censiti 2051 laghi di cava all'interno del bacino del Po (Figura 9), comprendenti sia quelli dove le attività estrattive sono ancora in corso (attivi), sia quelli dove le attività estrattive risultano terminate (cessati), dopodiché sono stati suddivisi per regione (Tabella 5).



**Figura 9:** laghi di cava individuati all'interno del bacino del Po, suddivisi tra laghi di cava attivi (in verde) e laghi di cava cessati (in rosso).

**Tabella 5:** suddivisione per regione dei laghi di cava, attivi e cessati.

| Regione             | Cessati | Attivi |
|---------------------|---------|--------|
| Piemonte            | 576     | 114    |
| Valle d'Aosta       | 4       | 2      |
| Lombardia           | 536     | 228    |
| Trentino Alto-Adige | 0       | 0      |
| Veneto              | 4       | 4      |
| Liguria             | 2       | 5      |
| Emilia-Romagna      | 456     | 121    |
| Toscana             | 0       | 0      |

La classificazione dei laghi di cava attivi si è basata sulla presenza di cantieri e cumuli di inerti visibili tramite immagini satellitari (Google Earth) nei pressi del corpo idrico, mentre

l'identificazione dei laghi di cava cessati si è basata sulla loro forma regolare, sulla vicinanza ad un corso d'acqua e sulla presenza di evidenti alterazioni del terreno circostante. Inoltre, grazie alle immagini Landsat presenti sul sito Global Surface Water Explorer è stato possibile stimare l'anno di inizio delle attività estrattive e la presunta conclusione delle stesse.

Infine, per ogni lago è stato assegnato un codice identificativo regionale e provinciale che ne consenta il riconoscimento; in questo modo è stato possibile creare un database contenente informazioni sulla posizione del lago (regione, provincia e comune) e sull'anno di inizio e termine (dove possibile) dei lavori di estrazione.

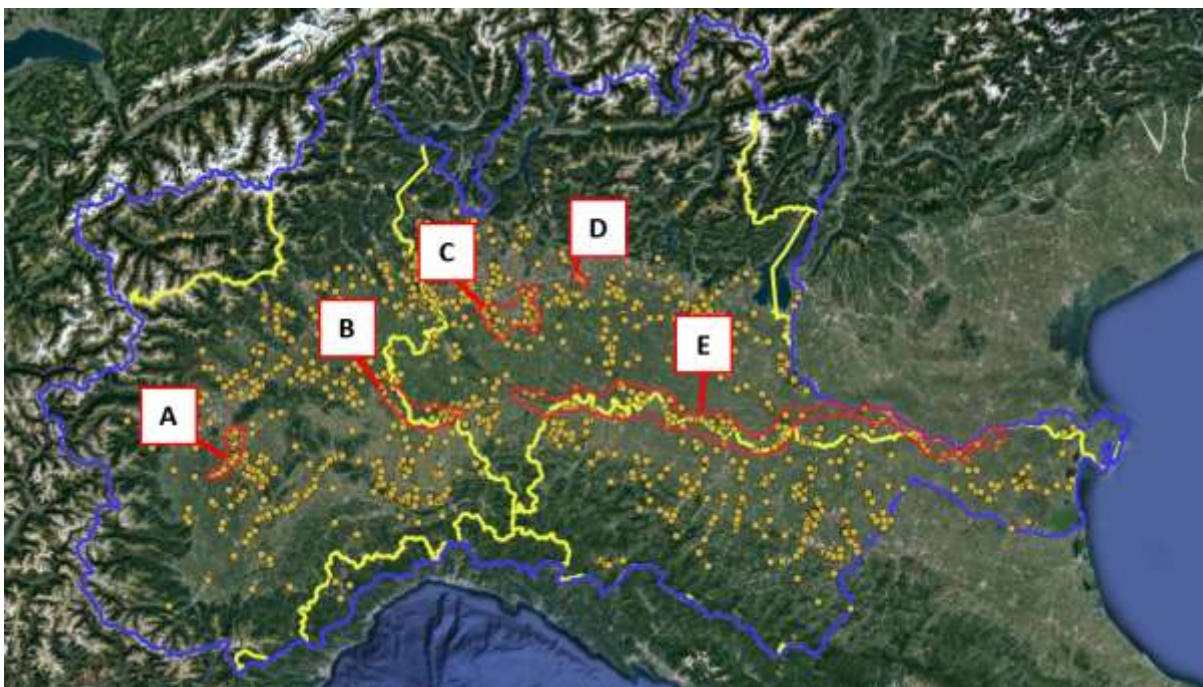
## 4.2 Analisi dei sotto-campioni

Una volta identificati tutti i laghi di cava presenti all'interno del bacino, sono stati suddivisi in sotto-campioni (Tile) per i quali sono state effettuate analisi più approfondite (per un totale di 215 laghi di cava). Tra queste analisi rientrano la caratterizzazione morfologica e morfometrica comprendente il calcolo di area, perimetro e indice di sinuosità della costa, e la misurazione relativa all'area vegetata (intesa come vegetazione boschiva e arbustiva per una maggiore differenziazione) e al perimetro vegetato.

Gli stessi sotto-campioni sono stati utilizzati per l'analisi temporale dell'uso del suolo. I Tile sono stati scelti in base a determinate aree di interesse all'interno del bacino del Po. In dettaglio, queste aree presentano al loro interno punti nevralgici delle attività economiche a livello nazionale, parchi fluviali e aree ad alta densità di popolazione.

Seguendo tali considerazioni sono stati individuati i seguenti Tile: l'area sud di Torino (34 laghi), il parco fluviale del Po e dell'Orba (27 laghi), l'area sud di Milano (57 laghi), l'area di Trezzo sull'Adda (13 laghi) e l'area circostante all'asta fluviale del fiume Po (84 laghi) (Figura 10).

Per ogni lago presente all'interno dei sottocampioni è stato assegnato un codice identificativo univoco che ne consenta il riconoscimento, formato dalle iniziali del Tile di appartenenza seguito da un numero ordinale.



**Figura 10:** sotto-campioni (Tile) individuati per l'analisi morfologica, morfometrica e dell'evoluzione temporale dell'uso del suolo. A) area sud di Torino (TO); B) parco fluviale del Po e dell'Orba (OR); C) area sud di Milano (MI); D) area di Trezzo sull'Adda (TR); E) asta fluviale del Po (PO).

### 4.3 Caratterizzazione morfologica e morfometrica

L'Analisi delle caratteristiche morfologiche e morfometriche è stata effettuata mediante la creazione di poligoni in GIS.

Il primo step è stato la creazione di shapefile (poligoni) che ricalcassero in maniera precisa la forma degli specchi d'acqua esaminati (Figura 11). Una volta creati i poligoni per tutti i laghi all'interno dei Tile, è stato possibile calcolare l'area (in  $\text{km}^2$ ) e il perimetro (in m) dei laghi di cava. Per quanto riguarda l'area, la maggior parte dei laghi risulta essere di dimensioni piuttosto piccole: circa due terzi dei laghi hanno dimensioni inferiori ai  $0.03 \text{ km}^2$ , molti dei quali addirittura inferiore ai  $0.01 \text{ km}^2$ , mentre tra i rimanenti una buona parte presenta dimensioni comprese tra  $0.03$  e  $0.09 \text{ km}^2$ , mentre una piccolissima parte si trova  $0.09$  e  $0.21 \text{ km}^2$ ; solo una manciata di laghi superano questa soglia, arrivando ad un valore massimo di  $0.52 \text{ km}^2$  (Figura 12).

Complessivamente, i 2051 laghi coprono un'area di  $64.3 \text{ km}^2$ .

Anche per il perimetro è stata effettuata la stessa analisi: più della metà dei laghi possiedono un perimetro che non supera  $1 \text{ km}$  di lunghezza, alcuni dei quali presentano un perimetro di poche

decine di metri, mentre una buona fetta si trova tra i 1000 e i 2500 m; in pochi raggiungono i 4000 m, e ancora meno presentano un perimetro compreso tra 5000 e 9000 m (Figura 13).



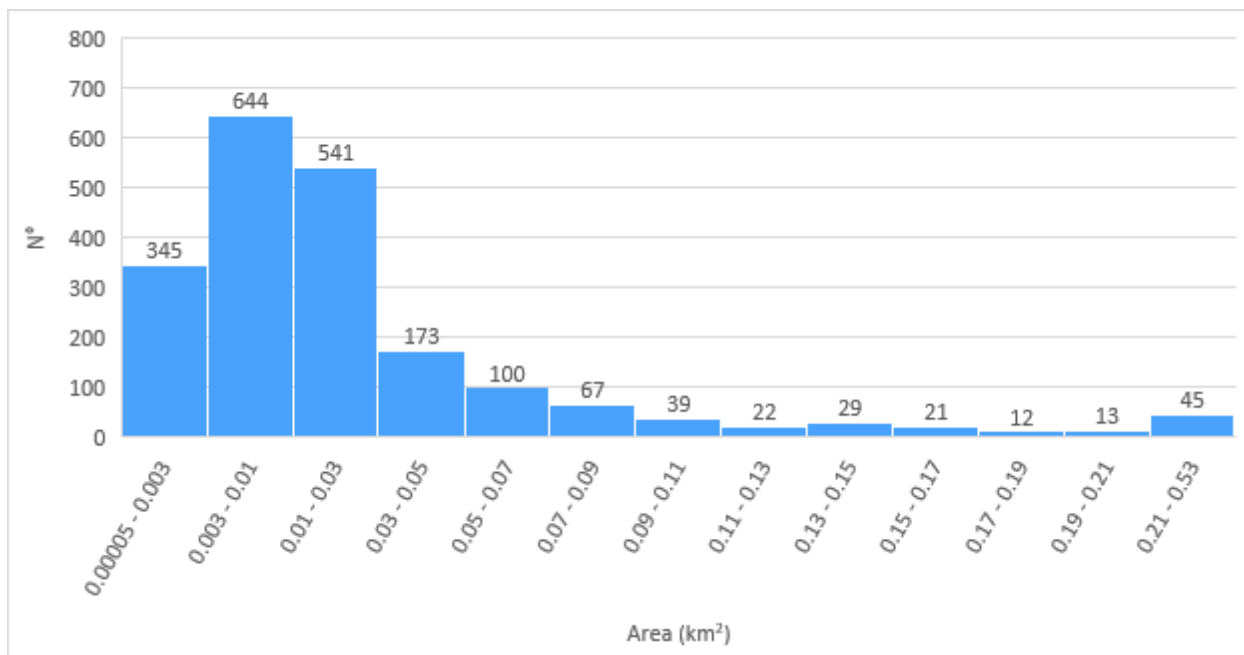
**Figura 11:** esempio di poligoni creati in GIS per il calcolo dell'area e del perimetro dei laghi di cava.

Grazie a questi dati, è stato possibile misurare anche l'indice di sinuosità della costa (DL), il quale viene calcolato dal rapporto tra il perimetro del lago e il perimetro di un cerchio avente la stessa area (Tonolli, 1964);:

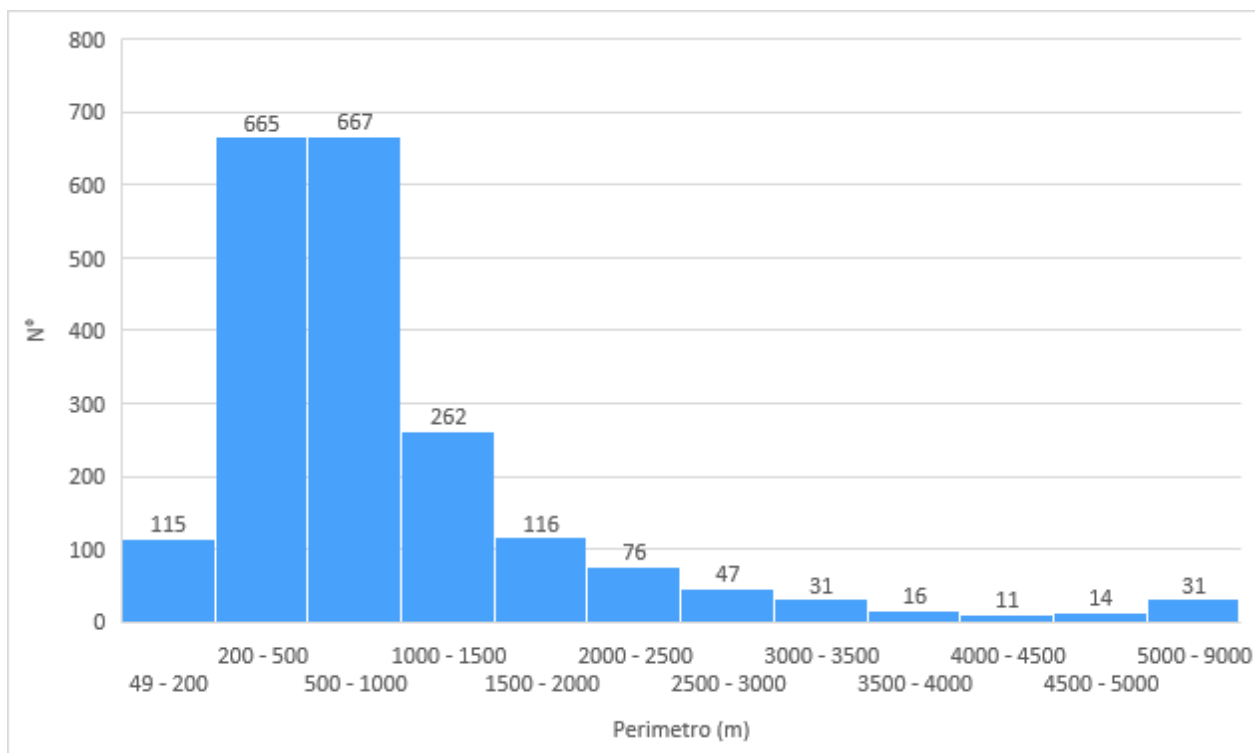
$$DL = \frac{L}{2\sqrt{\pi A}}$$

dove L=perimetro del lago, A=area del lago.

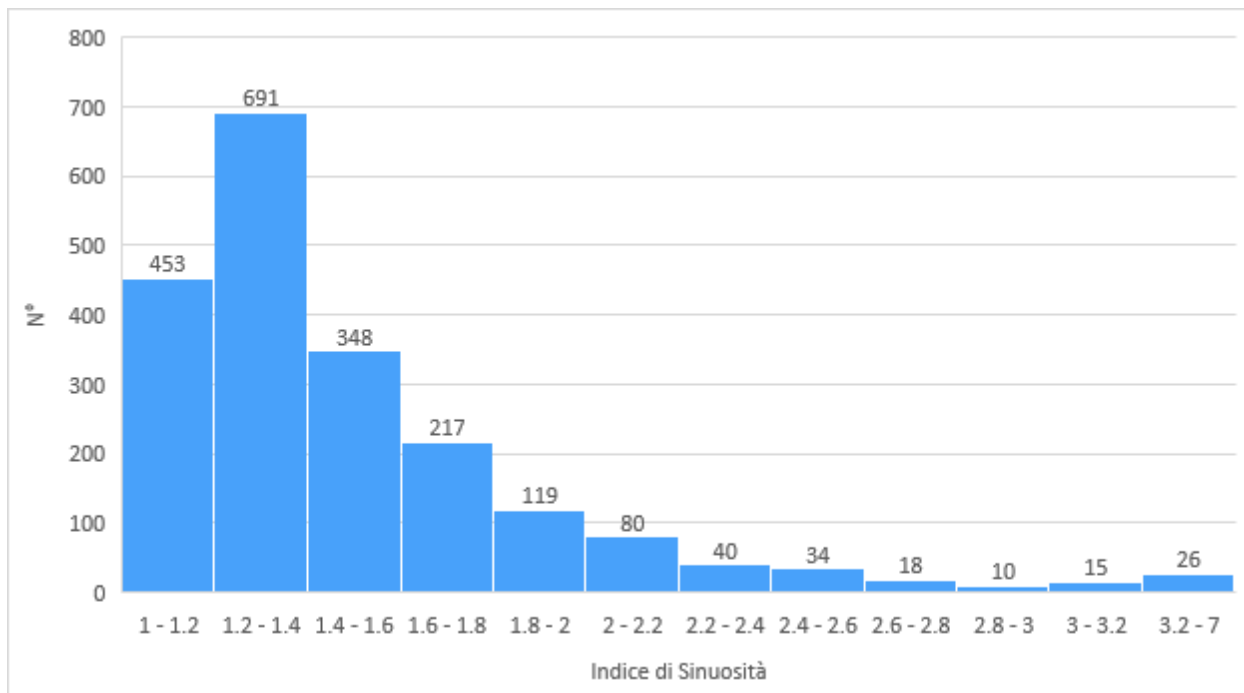
Per quanto riguarda questo parametro, tenendo conto che più il valore si allontana da 1 e più la forma differisce da quella di un cerchio, i laghi risultano prevalentemente piuttosto regolari: in media, l'indice di sinuosità della costa è risultato essere 1.5 ( $\pm 0.5$ ) con più della metà dei laghi avente un valore inferiore ad esso, mentre una buona parte dei laghi rimanenti supera il valore di 1.6, con alcuni casi che superano 2.2 e alcune eccezioni che superano 3.2 fino ad un massimo di 7 (Figura 14).



**Figura 12:** grafico relativo alla distribuzione delle aree dei laghi per l'intero bacino del Po: sulle ascisse troviamo le categorie in km²; sulle ordinate il numero di laghi.



**Figura 13:** grafico relativo alla distribuzione dei perimetri dei laghi per l'intero bacino del Po: sulle ascisse troviamo le categorie in m, sulle ordinate il numero dei laghi.



**Figura 14:** grafico relativo alla distribuzione dell'indice di sinuosità della costa per l'intero bacino del Po: sulle ascisse le categorie, sulle ordinate il numero di laghi.

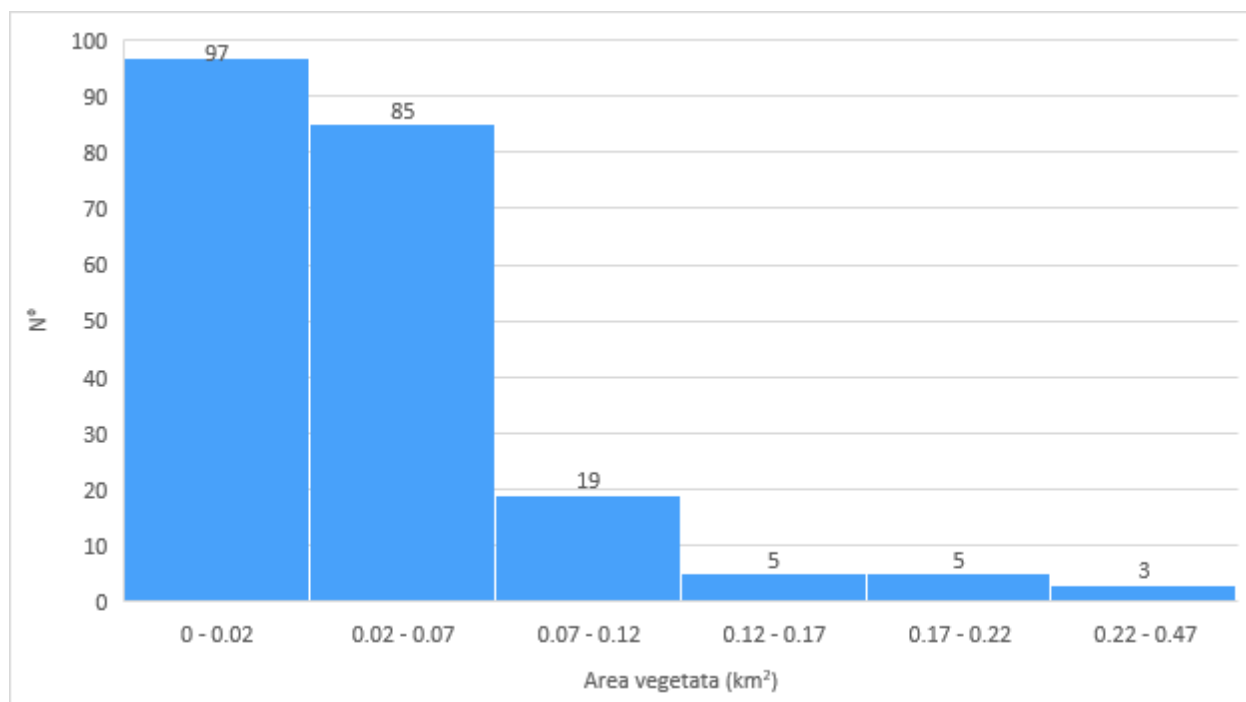
Allo stesso modo si è proceduto per il calcolo dell'area e del perimetro vegetato (Figura 15) per i laghi presenti in ciascun Tile: l'area vegetata è stata misurata mediante la creazione di poligoni che ricalcassero arbusti e alberi nelle zone limitrofe di ogni lago, in modo da poterne calcolare la copertura vegetativa in km<sup>2</sup>. Inoltre, è stato effettuato un calcolo delle proporzioni tra area vegetata ed area totale del lago calcolando il rapporto tra i due valori, unitamente ad una stima in percentuale della prima rispetto alla seconda.

Circa la metà dei laghi di cava esaminati presenta un'area vegetata inferiore a 0.02 km<sup>2</sup>, mentre una porzione consistente ne possiede tra i 0.02 e i 0.07 km<sup>2</sup>; circa un quinto di questi laghi supera 0.07 km<sup>2</sup> di vegetazione al contorno, mentre solo in pochissimi casi vengono superati 0.12 km<sup>2</sup>, con un picco di 0.46 km<sup>2</sup> (Figura 16).

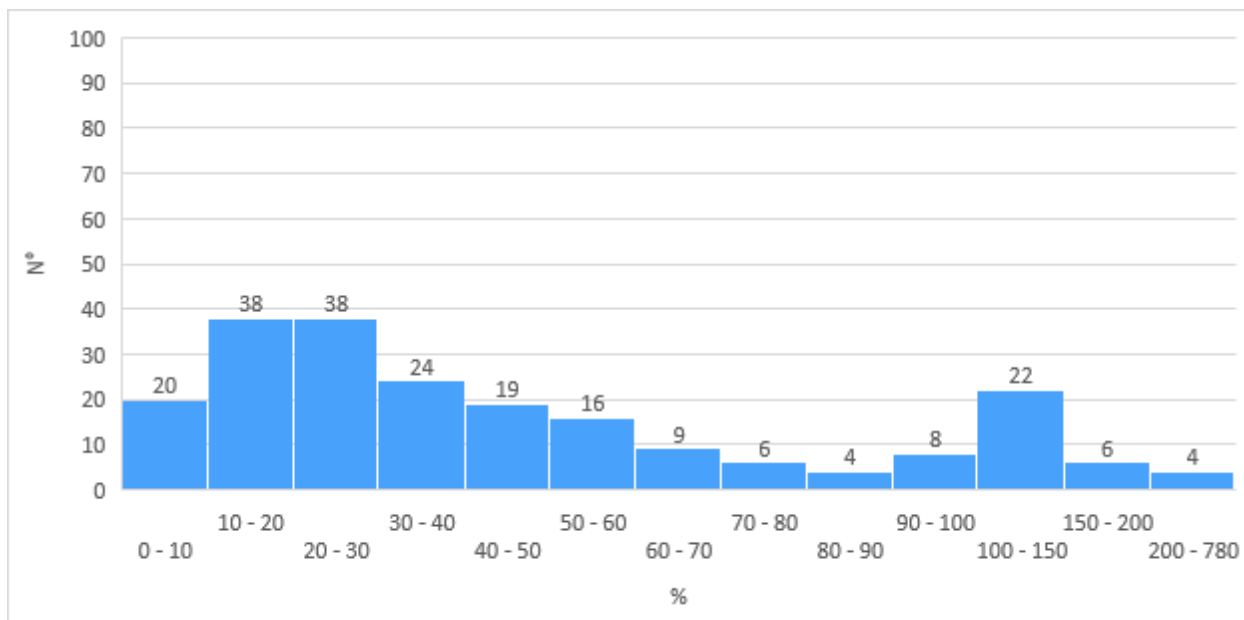
Nella figura 17 è rappresentata la percentuale di area vegetata terrestre rispetto all'area del lago: la maggior parte dei laghi presenta valori inferiori al 50%; qualche lago rientra nell'intervallo 70-100% e ben 22 laghi sono compresi tra il 100 e il 150%. Infine, solamente rare eccezioni superano valori del 150%, con un picco massimo del 770%.



**Figura 15:** esempi di aree vegetate (poligoni azzurri) e perimetri vegetati (linee blu).

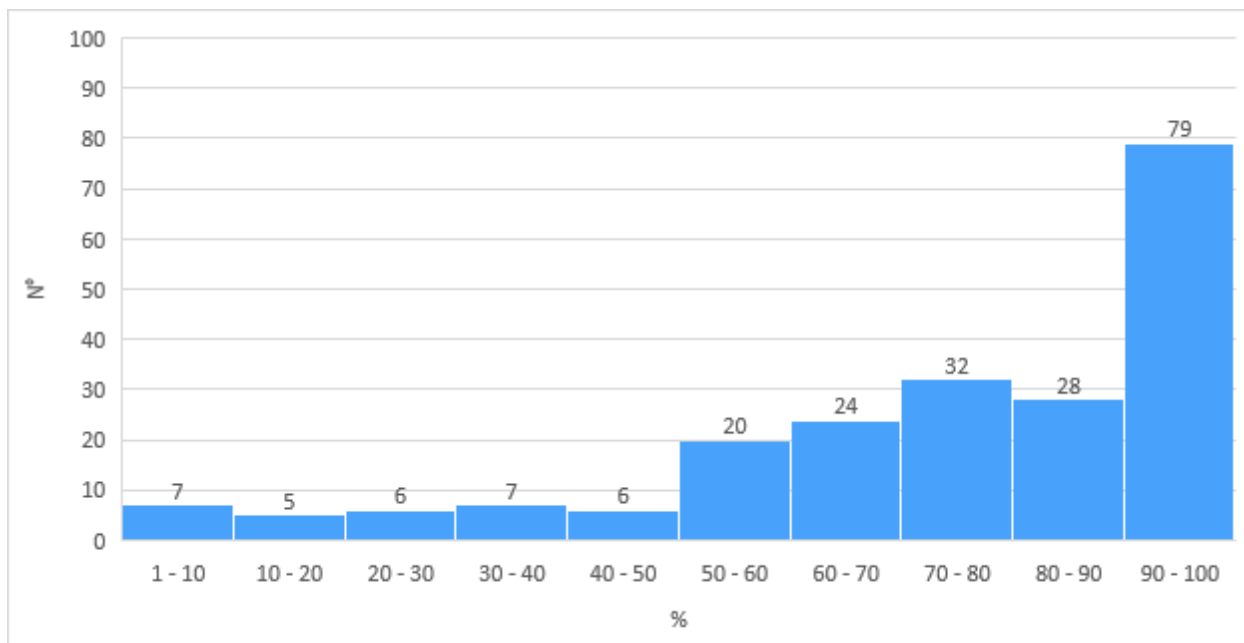


**Figura 14:** grafico relativo alla distribuzione dell'area vegetata dei laghi all'interno dei Tile.



**Figura 17:** grafico relativo alla distribuzione della percentuale di area vegetata rispetto all'area dei laghi all'interno dei Tile.

Per quanto riguarda il perimetro vegetato, è stato creato uno shapefile (linee) in corrispondenza dei poligoni utilizzati per il calcolo dell'area vegetata, in modo tale da poter calcolare la percentuale del perimetro del lago interessata da vegetazione. A tal proposito, dalla Figura 18 si evince come quasi tutti i laghi presentino un perimetro vegetato superiore al 50%, con una numerosi casi nell'intervallo 90-100%.



**Figura 18:** grafico relativo alla distribuzione della percentuale di perimetro vegetato dei laghi all'interno dei Tile.

#### 4.4 Analisi temporale dell'uso del suolo

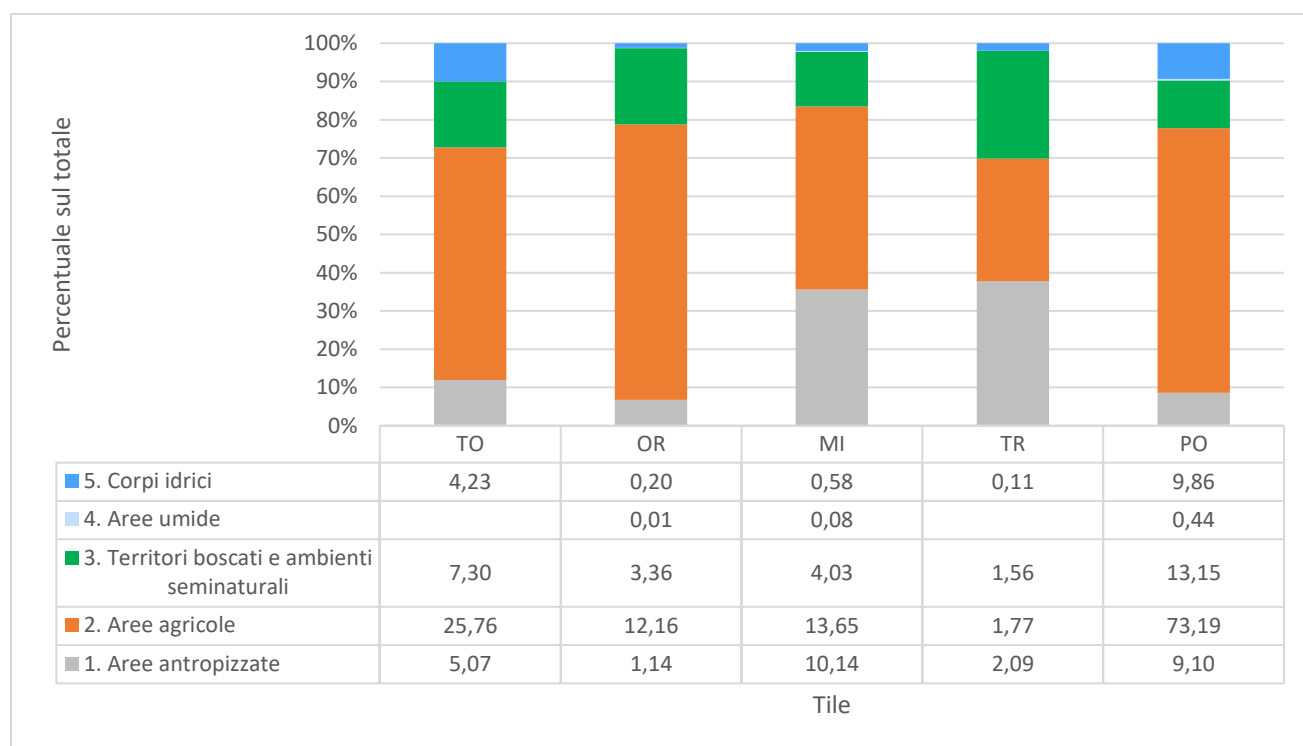
L'analisi dell'uso del suolo all'interno delle zone buffer che circondano i laghi di cava è stata effettuata in base a due diversi livelli di dettaglio: il primo, più generale, è rappresentato dall'analisi dell'uso del suolo per tutti i laghi presenti nei sotto-campioni individuati, ma solamente per l'anno disponibile più recente (in base alla disponibilità di ciascun geoportale). In dettaglio: 2017 per il Tile di Torino, 2018 per i Tile del parco del Po e dell'Orba, di Milano e di Trezzo sull'Adda, 2017 e 2018 per il Tile dell'asta fluviale del Po, rispettivamente per i laghi presenti nel versante Emiliano-Romagnolo e Lombardo.

Nella Figura 19 è rappresentata l'estensione in percentuale delle cinque classi del Corine Land Cover (CLC) per ciascun Tile, mostrata in base al calcolo della somma in km<sup>2</sup> delle aree sul totale delle zone buffer. Per il Tile di Torino (TO) è possibile osservare un 10% di territorio interessato da costruzioni, mentre oltre la metà è occupato da aree agricole; il restante 30% è suddiviso tra corpi idrici (10%) e vegetazione (20%).

Per quanto riguarda il Tile del parco fluviale del Po e dell'Orba (OR) si nota come il territorio sia quasi interamente occupato da aree agricole, con un 20% di vegetazione e una piccolissima percentuale di aree antropizzate.

I Tile di Milano (MI) e Trezzo sull'Adda (TR) sono quelli in cui è osservabile la maggior percentuale di aree antropizzate (circa il 35%). In dettaglio, il Tile di Milano è caratterizzato da una maggiore percentuale di aree agricole (poco più della metà del territorio), mentre nel Tile di Trezzo sull'Adda la vegetazione occupa una significativa porzione di territorio.

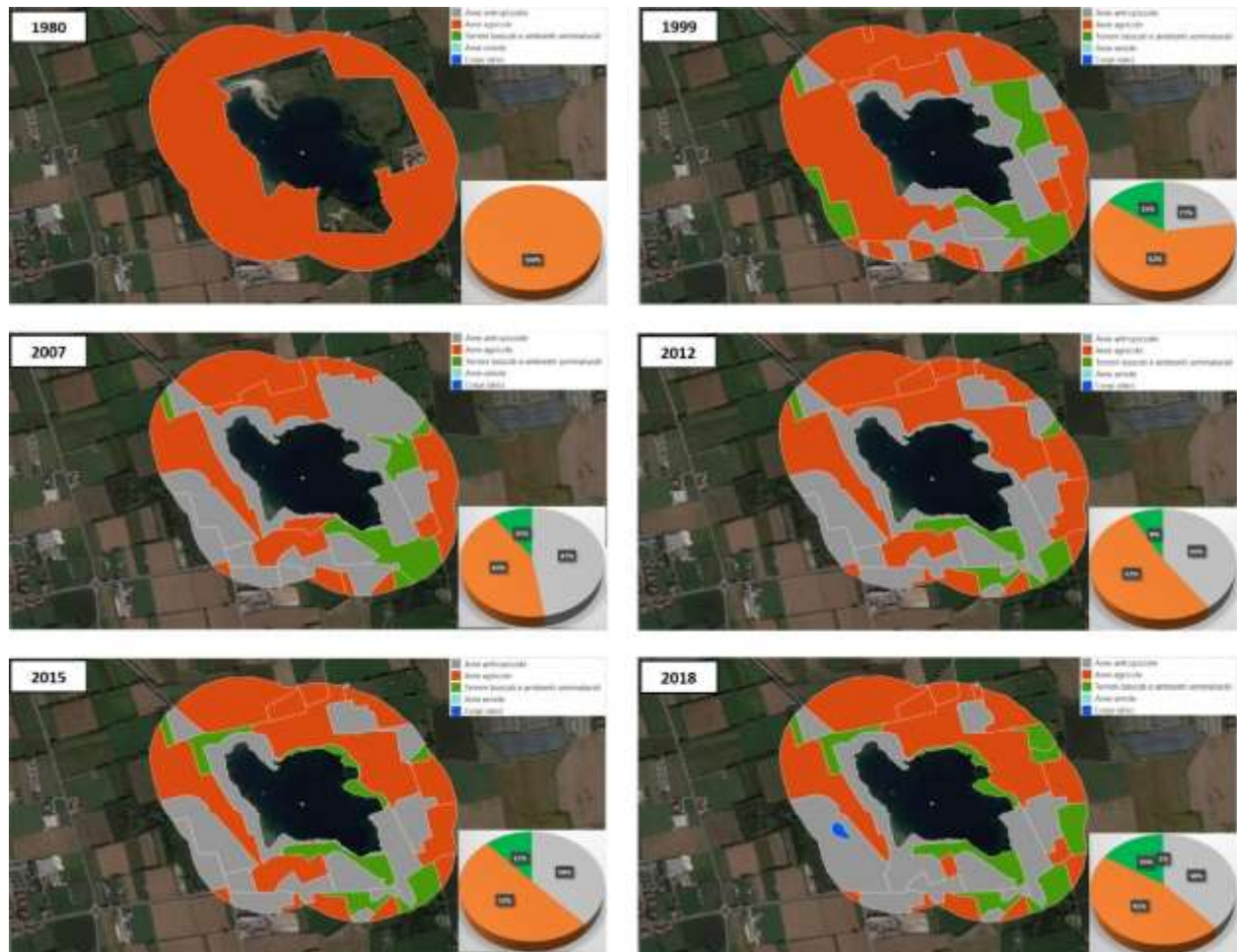
Infine, il Tile relativo all'asta fluviale del Po (PO) è per il 70% occupato da aree agricole, mentre la restante porzione è suddivisa tra aree antropizzate, vegetate e corpi idrici.



**Figura 19:** estensione (%) delle cinque classi del Corine Land Cover (CLC) per ciascun Tile: Torino (TO), parco fluviale del Po e dell'Orba (OR), Milano (MI), Trezzo sull'Adda (TR), asta fluviale del Po (PO); all'interno della tabella i valori in km<sup>2</sup> delle diverse aree.

Il secondo livello di dettaglio si basa invece sull'analisi temporale dell'uso del suolo per tutti gli anni a disposizione (si veda la Tabella 2). Lo scopo di questa analisi è di ottenere un quadro conoscitivo più completo per quanto riguarda l'evoluzione delle diverse classi del CLC nei dintorni dei laghi di cava (Figura 20). Questa tipologia di analisi è stata condotta su una coppia di laghi per

ciascun Tile: OR-14 e OR-16 per il Tile del parco fluviale del Po e dell'Orba, MI-14 e MI-15 per il Tile di Milano, TR-12 e TR-13 per il Tile di Trezzo, PO-37 e PO-52 per il Tile dell'asta fluviale del Po. Non è stato possibile effettuare un'analisi temporale dell'uso del suolo all'interno del Tile di Torino poiché nel geoportale regionale sono presenti soltanto i dati relativi agli anni 2016-2017.



**Figura 20:** esempio di analisi dell'evoluzione temporale dell'uso del suolo per un lago del Tile di Trezzo sull'Adda (buffer 250 m). classe 1: aree antropizzate (grigio); classe 2: aree agricole (arancione); classe 3: terreni boscati e ambienti semi-naturali (verde); classe 4: aree umide (azzurro); classe 5: corpi idrici (blu).

## 4.5 Analisi dei nitrati

Il carico azotato sotto forma di azoto nitrico ( $\text{NO}_3^-$ ) è stato analizzato in nove laghi appartenenti al Tile dell'asta fluviale del Po (Figura 21). In questi laghi sono stati condotti studi sui processi del

ciclo dell'azoto che hanno evidenziato la capacità di rimuovere azoto per denitrificazione microbica e assimilazione da parte della vegetazione, soprattutto nelle aree di basso fondale (Nizzoli et al., 2010; 2014). È stato altresì dimostrato come la rimozione dell'azoto sia in relazione con lo stato trofico e lo stato di salute degli ecosistemi lacustri (Nizzoli et al., 2020).



**Figure 21:** laghi utilizzati per l'analisi del carico azotato. A) Maleo (PO-14); B) da sinistra a destra Ca' Morta (PO-8), Lago Verde (PO-9), Ca' Stanga 2 (PO-10) e Ca' Stanga (PO-11); C) dall'alto verso il basso Isolone (PO-23), Bella Venezia (PO-24), Isola Giarola (PO-25) e Bosco Lite (PO-26).

In questa tesi sono state analizzate anche le relazioni tra l'azoto inorganico disciolto nelle acque dei laghi e l'uso del suolo nelle aree circostanti. Questo confronto è stato possibile i dati di qualità chimica delle acque sono concomitanti con alcuni anni considerati per l'analisi dell'uso del suolo. In base alla disponibilità dei dati sull'uso del suolo, e assumendo che tra anni adiacenti le attività agricole si siano svolte con intensità simili, sono state calcolate delle associazioni tra il

quantitativo di azoto nitrico, la tipologia di attività agricola e la vegetazione all'interno della zona buffer dei laghi considerati, utilizzando i dati sulla chimica dei laghi relativi anche all'anno precedente e a quello successivo all'anno per il quale è stato possibile analizzare l'uso del suolo. Ad esempio, se per il lago Ca' Morta (codice identificativo PO-8) è stato possibile fare l'analisi del suolo soltanto per l'anno 2008, i dati utilizzati sul quantitativo di azoto nitrico sono quelli relativi agli anni 2007, 2008 e 2009. A causa della distribuzione non normale di tali dati, per tutti gli anni è stata calcolata la mediana della variabile considerata.

- Il lago Ca' Morta (PO-8) ha i valori mediani di nitrati più alti in assoluto, quasi sempre superiori ai  $6000 \mu\text{g N L}^{-1}$ , nonostante sia presente una discreta copertura vegetale nell'intorno del lago (il 49% dell'area perimetrale risulta vegetata da arbusti), la quale sembrerebbe non essere sufficiente per trattenere l'elevata quantità di nitrati proveniente dai fertilizzanti utilizzati per i seminativi semplici che ricoprono quasi completamente la zona buffer circostante.
- Il Lago Verde (PO-9) si trova immediatamente accanto al lago Ca' Morta, con il quale condivide la stessa tipologia di attività agricola e la quasi totalità della zona buffer interessata da seminativi semplici. In questo caso però, complici forse le dimensioni notevolmente ridotte del lago e una copertura perimetrale vegetale superiore (circa il 59%), le quantità di azoto nitrico sono significativamente inferiori, comprese tra i  $1300$  e i  $2200 \mu\text{g N L}^{-1}$ .
- Anche i laghi Ca' Stagna 2 e Ca' Stagna (PO-10 e PO-11) confinano uno con l'altro e presentano entrambi una zona buffer interamente adibita a seminativi semplici; il lago Ca' Stagna 2 è caratterizzato da un perimetro vegetato praticamente assente (5%), mentre il lago Ca' Stagna ospita arbusti lungo il 47% del perimetro, i quali però non sembrano avere nessuna significativa capacità di trattenere azoto nitrico in quanto entrambi i laghi hanno valori simili di  $\text{NO}_3^-$  arrivando a  $3000-4000 \mu\text{g N L}^{-1}$ .
- Il lago di Maleo (PO-14) ha piccole dimensioni, con un perimetro interessato per il 52% da arbusti e una zona buffer quasi interamente occupata da seminativi semplici. In questo caso ci troviamo in una situazione dove il carico azotato è notevolmente ridotto, con un

valore mediano di circa  $630 \mu\text{g N L}^{-1}$ , grazie forse alle dimensioni ridotte e al fatto che non ci sia più il disturbo causato dalle attività di estrazione di inerti.

- Il lago Isolone (PO-23) non è più interessato da attività estrattiva; ha una zona buffer divisa per il 28% in seminativi semplici e per il 72% da colture orticole a pieno campo, con valori mediani di azoto nitrico piuttosto elevati (oltre  $3000 \mu\text{g N L}^{-1}$ ) a fronte di un ridotto perimetro vegetato (circa il 10%);
- Il lago Bella Venezia (PO-24) ha grandi dimensioni, con un'area circostante interessata quasi interamente da seminativi semplici, un perimetro vegetato del 28% composto da arbusti e un carico azotato elevato ma non tanto quanto ci si potrebbe aspettare, con valori di poco superiori a  $1500 \mu\text{g N L}^{-1}$ , simili a quelli di Lago Verde ma con una vegetazione lungo il perimetro che risulta essere circa la metà rispetto a quest'ultimo.
- Nel lago Isola Giarola (PO-25) troviamo valori mediani decisamente modesti di azoto nitrico rispetto agli altri, che si aggirano tra i 300 e i  $500 \mu\text{g N L}^{-1}$  con minimi che scendono sotto i  $40 \mu\text{g N L}^{-1}$  e picchi che superano i  $1700 \mu\text{g N L}^{-1}$ . Nel 2003 la zona buffer era suddivisa tra seminativi semplici (53%), pioppeti (30%) e prati stabili (17%), e in questo caso osserviamo un valore mediano di azoto nitrico di circa  $190 \mu\text{g N L}^{-1}$ , valore che risale notevolmente fino a toccare i  $1000 \mu\text{g N L}^{-1}$  nel 2008 quando i seminativi hanno raggiunto l'86% i pioppeti il 5% e i prati 9%. Il lago presenta comunque una copertura vegetale perimetrale molto consistente, con un 84% di arbusti che potrebbero avere un ruolo significativo nell'abbattimento dell'azoto nitrico.
- L'ultimo lago è infine Bosco Lite (PO-26), un lago di grandi dimensioni con un'area buffer adibita per metà a seminativi semplici e per l'altra metà a pioppeti coltivati; in questo caso il lago presenta una buona copertura vegetale, con il 52% di perimetro percorso da arbusti che potrebbero essere in grado di contenere leggermente l'azoto nitrico, in quanto troviamo valori mediani che oscillano tra i 1000 e i  $2000 \mu\text{g N L}^{-1}$ .

## 5 DISCUSSIONE

La possibilità di utilizzare i laghi di cava come risorsa può essere discussa partendo dal dato quantitativo: sono stati censiti 2051 laghi, in 1578 dei quali l'attività estrattiva è cessata. Complessivamente, questi laghi occupano una superficie di 60.3 km<sup>2</sup>, all'incirca equivalente a quella del lago d'Iseo (65.3 km<sup>2</sup>). Si tratta di numeri molto significativi, tenendo conto anche del fatto che potenzialmente, in base ai volumi di materiale litoide scavato, se ne possono formare 18 ogni anno solo all'interno del bacino del Po, mentre in tutta Italia si stima che ogni anno se ne possano formare fino a 45. Estendendo il concetto a tutti i laghi di cava presenti a livello nazionale, pertanto, il numero di questi ecosistemi diventerebbe ancora più consistente e rilevante nell'ambito della riqualificazione ecologica e della conservazione degli ambienti umidi, della biodiversità ad essi legata e della gestione delle risorse idriche. La maggior parte dei laghi presenta dimensioni relativamente contenute e generalmente inferiori ai 0.03 km<sup>2</sup> tranne che in pochi casi dove si raggiungono 0.09 km<sup>2</sup>, con eccezioni che vedono invece raggiungere 0.21 km<sup>2</sup> e addirittura superare i 0.50 km<sup>2</sup>. Questa tendenza potrebbe risultare da tecniche di escavazione condivise che puntano a raggiungere maggiori profondità di scavo in modo da massimizzare la resa estrattiva rispetto all'area superficiale in concessione.

Molto importante è anche l'indice di sinuosità della costa: secondo le linee guida per il recupero ambientale, una buona progettazione di un lago di cava prevede la creazione di un bacino che abbia un indice di sinuosità >1.5 in modo da riprodurre la morfologia degli ecosistemi marginali naturali. Una buona parte dei laghi individuati presenta questa caratteristica, indipendentemente dall'intenzionalità di operare seguendo questa regola.

Riguardo all'area vegetata nell'intorno dei laghi, è possibile notare come essi siano interessati da una copertura piuttosto modesta: in termini di estensione siamo di fronte ad una situazione dove circa la metà dei laghi presenta una copertura vegetale piuttosto scarsa, inferiore ai 0.02 km<sup>2</sup>, i rimanenti sono caratterizzati da una copertura compresa tra 0.02 e 0.07 km<sup>2</sup> e solo in rare occasioni superano 0.12-0.22 km<sup>2</sup> di area vegetata. Questi valori, infatti, se riferiti al carico azotato, potrebbero non essere sufficienti per ottenere una buona qualità delle acque anche a fronte di una quasi totalità dei laghi caratterizzati da più del 60% di perimetro vegetato, con più di un terzo di essi aventi un perimetro quasi completamente percorso da vegetazione arbustiva.

Servirebbero però analisi più approfondite e ulteriori studi per capire quale potrebbe essere una percentuale minima di vegetazione in grado di garantire una qualità delle acque accettabile da applicare nei progetti futuri riguardanti le attività estrattive.

Per quanto riguarda invece l'analisi relativa all'uso del suolo, l'aspetto che emerge riguarda la classe 2 del CLC (aree agricole), la quale risulta essere predominante in quasi tutti i Tile considerati. Nel Tile di Torino è presente la maggiore percentuale di laghi della classe 5 (corpi idrici) in quanto tutti i laghi sono disposti lungo gli argini del fiume Po, mentre nei Tile di Milano e Trezzo sull'Adda, come era facile attendersi, è consistente la percentuale occupata da aree antropizzate. È però osservabile una percentuale minore di aree agricole, a favore di una più ampia percentuale di terreni boscati, nel Tile di Trezzo sull'Adda rispetto al Tile di Milano. Infine, il Tile relativo all'Asta fluviale del Po presenta un territorio caratterizzato quasi totalmente da colture con piccole porzioni di aree vegetate e corpi idrici. Anche in questo caso la presenza di corpi idrici è dovuta alla vicinanza dei laghi al fiume Po, mentre l'elevata percentuale di aree agricole è indice di quanto l'attività agricola rappresenti ancora in maniera predominante l'economia locale.

Proseguendo con l'analisi temporale dell'uso del suolo, in quasi tutti i casi analizzati osserviamo come nei primi anni (1970-1980) l'intera zona buffer sia interessata esclusivamente da territori agricoli, anni nei quali l'industrializzazione doveva ancora prendere il sopravvento. Con il passare del tempo, infatti, nonostante le aree agricole siano sempre presenti, si nota come crescano le percentuali di territorio interessate da aree urbanizzate: all'interno del Tile di Trezzo sull'Adda, negli anni più recenti, la classe 1 del CLC prende il sopravvento anche sulle colture arrivando ad occupare oltre il 40% della zona buffer, seppure con un'inversione di tendenza in quanto negli anni passati si sono toccati picchi di oltre il 60% del territorio interessato da aree antropizzate. Anche il Tile di Milano è interessato da un'urbanizzazione in continua crescita: nel lago MI-13 le aree urbanizzate finiscono per superare le aree agricole, mentre nel lago MI-14 tale crescita sembra essersi arrestata al 16% del territorio. Anche le ristrette porzioni interessate da vegetazione rimangono pressoché stabili in entrambi i laghi del Tile di Milano.

I Tile di Trezzo sull'Adda e, in misura maggiore, del parco fluviale del Po e dell'Orba sono quelli che, almeno per quanto riguarda i laghi analizzati, sembrano essere più attenti al

rimboschimento: nonostante l'estensione della classe 1 sia comunque abbastanza ampia, la classe 3 aumenta gradualmente, fino a superare il 30% della zona buffer in un qualche caso (TR-13 e OR-14).

Per quanto riguarda la qualità ecologica dei laghi e il possibile ruolo della vegetazione limitrofa, sulla base dei dati analizzati (ovvero del valore mediano di nitrati, delle percentuali di area vegetata circostante il lago e della tipologia di colture) sono state tratte delle considerazioni sulla possibilità di abbattimento del carico azotato, tenendo conto che in tutti i laghi considerati i valori medi di nitrati riscontrati sono elevati. Queste condizioni sono tipiche degli ecosistemi acquatici di pianura e sono in genere correlati con una condizione di scarsa qualità ecologica, dovuta probabilmente anche al fatto che questi laghi si trovano nel Tile relativo all'asta del Po, ovvero quello caratterizzato dalla maggiore percentuale di terreni agricoli nei pressi dei laghi.

## 6 CONCLUSIONI

Riprendendo gli obiettivi di questo lavoro di tesi possiamo affermare che:

- il numero complessivo dei laghi di cava presenti nel bacino idrografico del Po è risultato piuttosto significativo, di conseguenza è lecito pensare di poter utilizzare questi ambienti di formazione artificiale come risorsa per il recupero degli ambienti acquatici scomparsi;
- la caratterizzazione morfologica e morfometrica ha fornito importanti informazioni sulle possibilità di questi ambienti di fornire un vantaggio a livello ambientale, se pur con migliorie da apportare proseguendo con ulteriori e più approfonditi studi;
- l'analisi temporale dell'uso del suolo può essere utile per comprendere come possa variare la qualità ecologica di un lago a seguito delle modificazioni che interessano l'uso del suolo circostante, in modo da gestire al meglio il territorio e consentire una ripresa ecologica degli ambienti acquatici;
- il carico azotato, specialmente quello presente sotto forma di nitrati, è un indice fondamentale per capire quale sia lo stato di salute di un ambiente acquatico, in quanto grazie a studi pregressi è possibile intuire quale sia la tendenza di un lago ad evolvere verso uno stato trofico piuttosto che un altro. Inoltre, è possibile intervenire su questo parametro attraverso numerose azioni come la riduzione dell'intensità delle attività agricole e l'aumento della vegetazione tipica di questi ambienti nell'intorno degli stessi, per cercare di invertire questa tendenza.

In conclusione, si può dire che l'obiettivo finale di questo lavoro di tesi è di fornire indicazioni preliminari sulla possibilità di gestione dei laghi di cava intesi come veri e propri ecosistemi acquatici per far fronte alla problematica della perdita generale di questo tipo di ambienti, con tutte le conseguenze che questo comporta.

L'identificazione puntuale dei laghi presenti all'interno di uno delle aree nevralgiche e più importanti d'Italia, il bacino del Po, la loro caratterizzazione e una prima analisi sullo stato del territorio circostante e sulla qualità delle acque possono rappresentare un punto di partenza per la creazione di un database che faccia parte di un network sulla gestione e il monitoraggio di tutti i laghi di cava a livello nazionale, integrando di volta in volta i nuovi laghi che si andranno a formare a seguito di nuove attività estrattive.

## 7 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

AAVV., 2007. Linee guida per il recupero ambientale dei siti interessati della attività estrattive in ambito golenale di Po nel tratto che interessa le Provincie di Piacenza, Parma e Reggio-Emilia. Regione Emilia-Romagna.

Archetti G., 2004. Analisi comparata dello stato trofico di tre laghi di cava a diverso stadio evolutivo. Tesi di laurea specialistica in Ecologia e Conservazione, Università di Parma.

Boschetti M., Bolzan L., Bresciani M., Giardino C., L'Astorina A., Lanari R., Zilioli E., 2005. Diffusione e sperimentazione della cartografia e dei sistemi informativi geografici, come tecnologie didattiche applicate allo studio del territorio e dell'ambiente - Volume 3. Telerilevamento. Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, Dipartimento per la Programmazione il Coordinamento e gli Affari Economici, Servizio per lo Sviluppo e il Potenziamento delle Attività di Ricerca (SSPAR).

Govi M., Turitto O., 1993. Processi di dinamica fluviale lungo l'asta del Po. *Acqua & Aria*, 6-7: 575-588.

Haines-Young R., Potschin M.B., 2018. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) V5.1 and Guidance on the Application of the Revised Structure.

Kattner E., Schwarz D., Maier G., 2000. Eutrophication of Gravel Pit Lakes which are Situated in Close Vicinity to the River Donau: Water and Nutrient Transport. *Limnologica* 30: 261-270.

Lamberti A., 1993. Le modificazioni recenti verificatesi nell'asta principale del Po e problemi connessi. *Acqua & Aria*, 6-7: 589-592.

Linee Guida SNPA n. 11/2018, Linee guida per l'analisi delle pressioni ai sensi della Direttiva 2000/60/CE

Marchetti R., 1993. Problematiche ecologiche del bacino del Po. *Acqua & Aria*, 6-7

Mollema P.N., Antonellini M., 2016. Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews* 159, 247-270.

Nizzoli D., Carraro E., Nigro V., Viaroli P., 2010. Effect of organic enrichment and thermal regime on denitrification and dissimilatory nitrate reduction to ammonium (DNRA) in hypolimnetic sediments of two lowland lakes. *Water Research* 44: 2715-2724.

Nizzoli D., Welsh D.T., Longhi D., Viaroli P., 2014. Influence of *Potamogeton pectinatus* and microphytobenthos on benthic metabolism in a freshwater littoral sediment in an agricultural landscape: N assimilation vs N removal. *Hydrobiologia* 737:183–200.

Nizzoli D., Welsh D. T., Viaroli P., 2020. Denitrification and benthic metabolism in lowland pit lakes: The role of trophic conditions. *Science of the Total Environment* 703: 134804

Peveroni S., 2014. I laghi di cava nel bacino del Po: qualità ambientale e servizi ecosistemici potenziali. Tesi di laurea in Scienze della Natura e dell'Ambiente, Università di Parma.

Santoul F., Figuerola J., Geen A.J., 2004. Importance of gravel pits for the conservation of waterbirds in the Garonne river floodplain (southwest France). *Biodiversity and Conservation* 13: 1231–1243.

Søndergaard M., Lauridsen T.L., Johansson L.S., Jeppesen E., 2018. Gravel pit lakes in Denmark: Chemical and biological state. *Science of The Total Environment* 612, 9-17.

Tavernini S., Nizzoli D., Rossetti G., Viaroli P., 2009a. Trophic state and seasonal dynamics of phytoplankton communities in two sand-pit lakes at different successional stages. *Journal of Limnology* 68; 217-228.

Tavernini S., Viaroli P., Rossetti G., 2009b. Zooplankton community structure and interannual dynamics in two sand-pit lakes with different dredging impact. *International Review of Hydrobiology* 94: 290-307.

Tonolli V., 1964. Introduzione allo studio della limnologia: ecologia e biologia delle acque dolci. Istituto Italiano di Idrobiologia.

Viaroli P., Bartoli M., 2009. Ricerca Ecologica e riqualificazione fluviale. *Riqualificazione Fluviale* 2: 15-22

Viaroli P., Bondavalli C., Giordani G. Paris G. M., Rossetti G., 1994. Ricerche idrobiologiche in un bacino artificiale della golena del Po (Isola Gerola, Piacenza). *Atti del X Congresso A.I.O.L., Alassio 4-6 novembre 1992*: 265-276.

Viaroli P., Ferrari I., Rossetti G., 2002. Long-term limnological research in a quarry lake of the Po River, Italy. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 28: 576-581

Viaroli P., Puma F., Ferrari I., 2010. Aggiornamento delle conoscenze ecologiche sul bacino idrografico padano: una sintesi- *Biologia Ambientale* 24: 7-19.

Viaroli P., Soana E., Pecora S., Laini A., Naldi M., Fano E., Nizzoli D., 2018. Space and time variations of watershed N and P budgets and their relationships with reactive N and P loadings in a heavily impacted river basin (Po river, Northern Italy). *Science of the Total Environment.*, 638: 1574-1587.

Weilhartner A., Muellegger C., Kainz M., Mathieu F., Hofmann T., Battin T. J. (2012). Gravel pit lake ecosystems reduce nitrate and phosphate concentrations in the outflowing groundwater. *Science of the Total Environment* 420: 222–228.

<https://geoportale.piemonte.it>

<https://geoportale.regione.emilia-romagna.it>

<https://geoportale.regione.lombardia.it>

<https://global-surface-water.appspot.com>

<https://idt2.regione.veneto.it>

<https://www.ersaf.lombardia.it>

<https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>