POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

# Analisi e valutazione dell'idoneità di sito per impianti fotovoltaici flottanti su scala nazionale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN

ENVIRONMENTAL AND LAND PLANNING ENGINEERING

INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

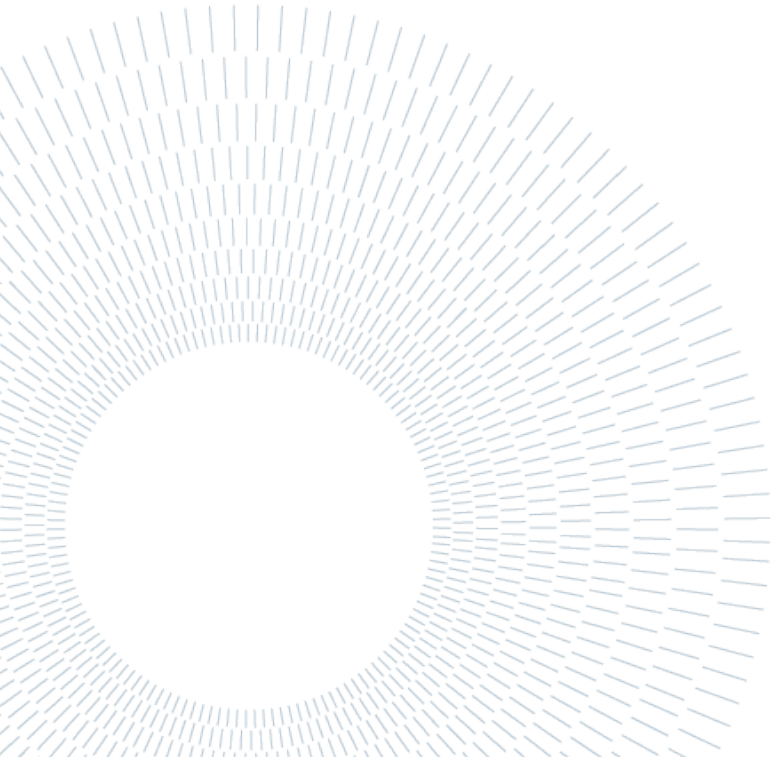
Autore: **Virginia Marini**

Matricola: 225563

Relatore: Giovanni Menduni

Correlatore: Daniele Fabrizio Bignami

Anno Accademico: 2023-24



# Abstract

This thesis has this question as its basis: is Italy a suitable territory for "hosting" floating photovoltaic installations on bodies of water? The issue fits perfectly into a context, not only European but also global, in which emissions abatement and battling climate change are urgent and primary issues.

Floating photovoltaic (FPV), in fact, is an innovative technology that, among its various advantages, such as increased efficiency, minimal land use and water savings, can also make a very important contribution to decarbonization and mitigation of the effects of climate change, as demonstrated by leading scientific studies.

The analysis has been carried out on the entire territory of Italy on which, from the mosaicking of the appropriate layers of regional technical maps (CTR), it was possible to map 81253 bodies of water, divided into seven categories.
In order to understand how many and which of these elements were suitable for FPV installations, first of all some predisposing factors for suitability of a site have been identified, which are: restrictions of the site itself, prevalent use of bodies of water classified as large dams, solar radiation, wind, distance to electrical substations and site accessibility. Subsequently, as a precautionary measure, only the bodies of water outside the protected areas of Italian territory (WDPA) have been selected. The selected sites have been categorised by assigning a score, from 1 to 5, for each predisposing factor and in three scenarios: "Worst", "Intermediate" and "Best". To obtain a univocal hierarchization of bodies of water, to be represented in a map, the overall score of each site has been calculated.
In parallel, frequency distributions of the results gradually obtained have been

analysed and quarry lakes of the Italian plains have been identified through the application of Machine Learning.

These evaluations, together with the analysis of the producibility of the potential installations and of the obtainable income, have allowed to give an answer to the initial question: in Italy, not only there are up to 507 bodies of water where installations larger than one hectare could be situated, but it can be also possible to produce considerable energy and economic volumes, through the use of this technology. These installations, in fact, in the best scenario, could satisfy nearly 3% of the Italian yearly electricity demand and could "save" more than 4.6 M tons of $CO_2$ in one year.

**Key-words:** body of water, decarbonization, DBPrior10k, predisposing factors, electrical energy, hierarchization.

# Sommario

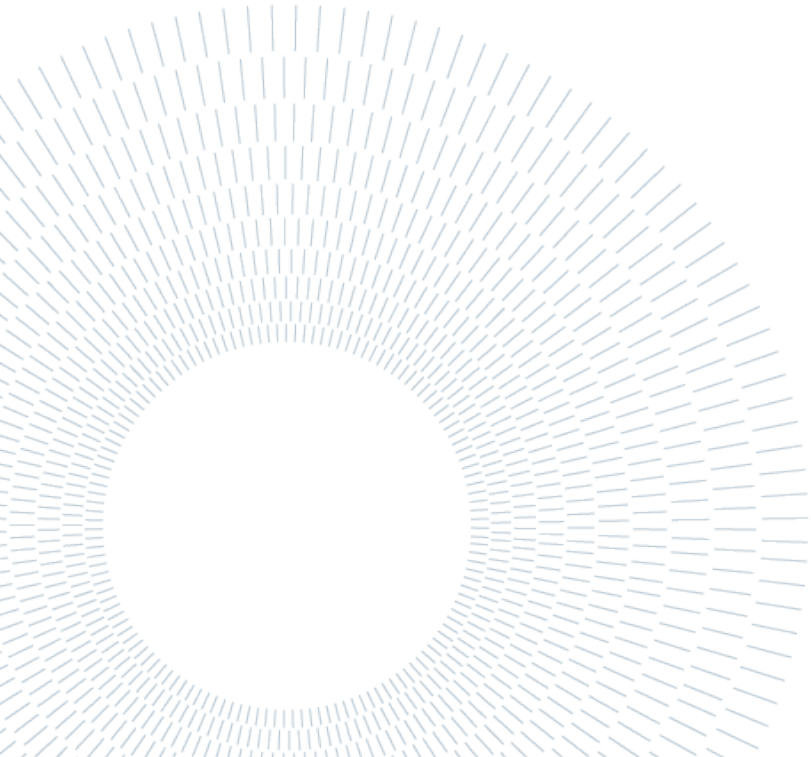
La presente tesi ha alla base questa domanda: l'Italia è un territorio adatto a "ospitare" impianti fotovoltaici flottanti su specchi d'acqua? La questione si inserisce alla perfezione in un contesto, non solo europeo, ma anche mondiale, in cui l'abbattimento delle emissioni e la lotta al cambiamento climatico sono dei temi prioritari e urgenti.

Il fotovoltaico flottante (FPV), infatti, è una tecnologia innovativa che, tra i suoi svariati vantaggi, come maggiore efficienza, consumo minimo di suolo e risparmio di acqua, può anche fornire un contributo importantissimo per la decarbonizzazione e la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico, come dimostrato da studi scientifici di rilievo.

L'analisi è stata effettuata sull'intero territorio italiano su cui, dalla mosaicatura degli opportuni strati delle carte tecniche regionali (CTR), è stato possibile mappare 81253 specchi d'acqua, suddivisi in sette categorie.
Per comprendere quanti e quali di questi specchi fossero idonei a ospitare impianti FPV, prima di tutto è stato necessario individuare dei fattori predisponenti all'idoneità di un sito, i quali sono: vincoli del sito stesso, utilizzo prevalente degli specchi d'acqua classificati come grandi dighe, radiazione solare, vento, distanza dalle cabine elettriche e accessibilità del sito. Successivamente sono stati selezionati, per motivi cautelativi, soltanto gli specchi d'acqua al di fuori delle aree protette presenti sul territorio (WDPA). I siti selezionati sono stati gerarchizzati tramite l'attribuzione di un punteggio, da 1 a 5, per ogni fattore predisponente e in tre scenari: "Worst", "Intermediate" e "Best". Per ottenere una gerarchizzazione univoca degli specchi d'acqua, da rappresentare in una mappa, è stato calcolato il punteggio complessivo di ogni sito.

Parallelamente, sono state analizzate le distribuzioni statistiche dei risultati via via ottenuti e sono stati individuati i laghi di cava presenti sulle pianure italiane tramite l'applicazione del Machine Learning.
Queste elaborazioni, insieme all'analisi della producibilità dei potenziali impianti e dei ricavi ottenibili, hanno permesso di rispondere alla domanda iniziale: in Italia, non solo sono presenti fino a 507 specchi d'acqua in cui potrebbero sorgere impianti di dimensioni maggiori di un ettaro, ma sarebbe anche possibile produrre, tramite l'utilizzo di questa tecnologia, volumi energetici ed economici notevoli. Questi impianti, infatti, potrebbero arrivare a soddisfare, nello scenario migliore, quasi il 3% della domanda italiana di energia elettrica annua e potrebbero far "risparmiare" in un anno più di 4.6 milioni di tonnellate di $CO_2$.

**Parole chiave:** specchio d'acqua, decarbonizzazione, DBPrior10k, fattori predisponenti, energia elettrica, gerarchizzazione.



# Indice

**Abstract** ..... **i**

**Sommario** ..... **iii**

**Indice** ..... **v**

**Introduzione** ..... **1**

Obiettivo ..... 1

Il contesto ..... 1

La decarbonizzazione ..... 4

**1 Cenni teorici** ..... **7**

1.1. Fotovoltaico ..... 7

1.2. Fotovoltaico flottante ..... 13

**2 Le aree protette e il sistema di vincoli in Italia** ..... **21**

**3 Materiali e metodi** ..... **29**

3.1. DBPrior10k ..... 29

3.2. DBTR Emilia-Romagna ..... 36

**4 Laghi di cava** ..... **41**

4.1. Preparazione dei dati ..... 45

4.2. Addestramento del modello ..... 47

4.3. Risultati del modello ..... 52

**5 Fattori predisponenti** ..... **55**

5.1. Vincoli del sito ..... 55
5.2. Utilizzo prevalente ..... 64
5.3. Radiazione solare ..... 72
5.4. Vento ..... 77
5.5. Distanza dalle cabine elettriche ..... 77
5.6. Accessibilità del sito ..... 83
**6 Assegnazione dei punteggi ..... 87**
6.1. Utilizzo prevalente ..... 87
6.2. Radiazione solare ..... 88
6.3. Vento ..... 93
6.4. Distanza dalle cabine elettriche ..... 94
6.5. Accessibilità del sito ..... 95
6.6. Punteggio complessivo del sito ..... 96
**7 Conclusioni e sviluppi futuri ..... 101**
7.1. Producibilità e ricavo ..... 101
7.2. Considerazioni finali ..... 106
7.3. Sviluppi futuri ..... 107
**Bibliografia/Sitografia ..... 109**
**Indice delle figure ..... 121**
**Indice delle tabelle ..... 125**
**Ringraziamenti ..... 127**

# Introduzione

## Obiettivo

Questo studio si propone di determinare se in Italia sia possibile e conveniente implementare massivamente impianti fotovoltaici flottanti. Per farlo, è stata svolta un'analisi territoriale sugli specchi d'acqua presenti sull'intero territorio italiano: essi sono stati selezionati e gerarchizzati sulla base di alcuni fattori predisponenti all'idoneità di un sito a "ospitare" impianti fotovoltaici flottanti.

## Il contesto

La transizione verso l'uso di energie rinnovabili sta diventando sempre più necessaria in un contesto in cui l'utilizzo massivo di combustibili fossili, ancor più favorito dalla crescita della popolazione e dall'avanzamento tecnologico, sta impattando inevitabilmente sul riscaldamento globale e sul cambiamento climatico (Enas Taha Sayed et al., 2023; Margarita Mediavilla et al., 2012). Nell'ultimo decennio, infatti, come mostrato in Figura 0.1, si è registrata una crescita rapida dell'uso di energie rinnovabili (idroelettrica, geotermica, eolica, solare, delle biomasse, marina), ossia di fonti di energia che si rigenerano naturalmente nel tempo e non si esauriscono mai, tanto che nel 2021 sono arrivate a generare il 38% dell'energia elettrica mondiale, superando il 36% del carbone (EMBER, Global Electricity Review, 2022).

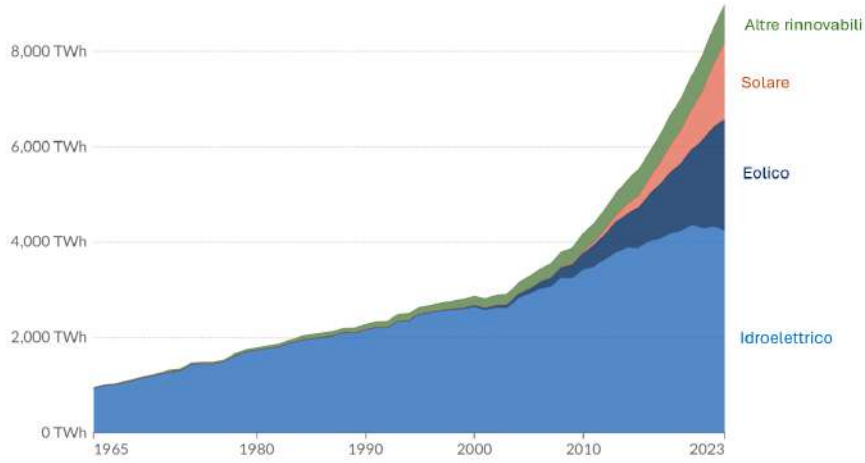



Figura 0.1: Produzione elettrica da fonti rinnovabili nel mondo.

Fonte: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) – with major processing by Our World in Data. Tratto il 29 luglio 2024, 20:51 da https://ourworldindata.org/renewable-energy. Modificato da Virginia Marini.

Questa diffusione si inserisce all'interno di un quadro europeo che mira, con la revisione del 2023 della Direttiva sulle energie rinnovabili, a raggiungere entro il 2030 l'obiettivo di una quota di rinnovabili pari al 42.5% del consumo energetico complessivo dell'UE, grazie anche a un meccanismo di finanziamento dell'energia rinnovabile dell'Unione Europea (Matteo Ciucci, 2024).

In particolare, ci si aspetta che sia l'energia solare a essere la tecnologia dominante, visto che l'IEA (International Energy Agency) ha stabilito che, per raggiungere l'obiettivo previsto dall'Accordo di Parigi di zero emissioni nette di carbonio entro il 2050, l'energia solare dovrà crescere annualmente in media del 24% (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022).

L'energia solare, infatti, ha il potenziale di essere un'alternativa alle convenzionali fonti di energia e può essere sfruttata in diversi ambiti, come quello residenziale, dei trasporti, dell'irrigazione, ecc. (Enas Taha Sayed et al., 2023).

Si tratta della fonte di energia più abbondante e diffusa sulla Terra, infatti nella gran parte del globo si può utilizzare dell'energia solare per produrre elettricità. Presenta,

inoltre, numerosi benefici, come quello di essere non inquinante, di non produrre gas serra o rifiuti e di non generare inquinamento acustico in fase di conversione.
I principali svantaggi, invece, risiedono nei costi, attualmente ancora elevati, dei pannelli e nell'intermittenza intrinseca di questa fonte di energia (Javid Mohtasham, 2015). Grazie, però, all'innovazione tecnologica, in particolare nella scienza dei materiali, gli impianti fotovoltaici stanno diventando competitivi economicamente con le fonti fossili. Questo spiega anche il grande sviluppo avutosi dal 2010 al 2019, in cui la capacità fotovoltaica mondiale è cresciuta da 40 GW a 580 GW (Enel Green Power S.p.A. - Communications).
In Italia, a fine 2023, erano quasi 1.6 milioni gli impianti installati, per una potenza complessiva pari a 30.28 GW (Riccardo Ciriaco, 2024).

In generale, il 2023 è stato un anno decisivo, poiché la capacità energetica da fonti rinnovabili nel mondo è cresciuta del 50% rispetto al 2022: si tratta di una crescita necessaria, ma non ancora sufficiente per raggiungere l'obiettivo stabilito alla COP28 (Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici), per cui la capacità globale di energia rinnovabile deve triplicare entro il 2030 (ESG360, 2024).

L'applicazione più comune e diffusa dell'energia solare è costituita dagli impianti fotovoltaici, mentre una delle più promettenti è data dagli impianti fotovoltaici flottanti (Alok Sahu et al., 2016). Nel 2014 si è stimato difatti che il 25% della domanda di energia elettrica nel mondo possa essere soddisfatta coprendo soltanto l'1% delle superfici di bacini naturali con i pannelli fotovoltaici (Parisa Ranjbaran et al., 2019). Un recente studio, inoltre, ha stimato che installare impianti solari fotovoltaici flottanti, in un continente con domanda crescente come l'Africa, potrebbe produrre dal 20% al 100% dell'elettricità prodotta da impianti idroelettrici, con la differenza che l'output di energia sarebbe meno variabile e più resistente ai cambiamenti idrologici (Wyatt Arnold et al., 2024).

## La decarbonizzazione

Una delle misure più importanti per contrastare un fenomeno così esteso come il cambiamento climatico risiede nella decarbonizzazione dell'economia globale, che si traduce nella generazione di energia a basso contenuto di carbonio (Richard Iestyn Woolway et al., 2024). Il cambiamento climatico, infatti, che è alla base degli eventi meteorologici sempre più estremi e frequenti che si stanno verificando e dell'aumento delle temperature degli ultimi anni, ha un'origine antropogenica e, in particolare, la causa principale è proprio la combustione dei combustibili fossili che si attua per soddisfare le richieste di energia (Elisa Papadis, George Tsatsaronis, 2020).

L'obiettivo di diminuire l'emissione di diossido di carbonio, stabilito per la prima volta nel Summit della Terra tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992, è uno dei fulcri dell'Accordo di Parigi, il quale prescrive il raggiungimento della neutralità climatica entro il 2050 e mira a limitare il riscaldamento globale al di sotto di 1.5°C o 2°C. Per riuscirci, l'UE ha previsto di ridurre entro il 2030 le emissioni di CO2 del 40%, rispetto ai livelli del 1990 (Parlamento Europeo, 2023).

Questo obiettivo, però, richiede una transizione che non sia soltanto dell'ambito dell'energia, ma anche della tecnologia, della ricerca, del mercato, che in Europa è basato sul metodo *cap-and-trade*, e delle politiche, come l'istituzione della *carbon tax* (Johan Rockström et al., 2017).

Secondo il World Energy Outlook (IEA, 2019), inoltre, uno dei modi per ridurre il trend attuale delle emissioni non è soltanto diminuire gli impianti a carbone, ma anche fornire nuovi impianti sostenibili (Shiva Gorjian et al., 2020).

È anche per questo che le fonti di energia rinnovabile stanno prendendo sempre più piede, tra cui il fotovoltaico, che ha subito una grande crescita grazie alla sua flessibilità, visto che un impianto può essere posizionato su terra, sugli edifici o sull'acqua (Richard Iestyn Woolway et al., 2024).

Uno studio che dimostra le grandi potenzialità del fotovoltaico flottante è stato di recente pubblicato su *Nature* e ha prodotto il seguente risultato: coprendo il 10% della superficie mediana (1991-2020) di più di un milione di laghi nel mondo, sia naturali che artificiali, con impianti fotovoltaici flottanti da 1 kW, in media l'energia prodotta soddisferebbe il 16% della domanda delle nazioni. La richiesta di energia, inoltre, sarebbe totalmente soddisfatta nel 3% degli Stati.
Da questo si deduce il grande contributo che questa nuova tecnologia può dare al processo di decarbonizzazione: nel 2021 è stato stimato, infatti, che globalmente l'impiego di impianti fotovoltaici flottanti porterebbe a una riduzione totale annuale di 0.45 miliardi di tonnellate di CO2 (Richard Iestyn Woolway et al., 2024).

A questo si aggiunge anche il grandissimo potenziale che si avrebbe in termini di risparmio di anidride carbonica andando a utilizzare l'energia prodotta dai pannelli fotovoltaici flottanti per alimentare il processo di elettrolisi dell'acqua. Si definisce *green hydrogen*, infatti, l'idrogeno ottenuto dalla separazione della molecola $H_2O$, ottenuta utilizzando elettricità con zero emissioni di carbonio (S. Shiva Kumar, Hankwon Lim, 2022). L'idrogeno è una delle soluzioni più adottate per favorire la decarbonizzazione a livello globale poiché, essendo un combustibile *carbon-free*, ha svariate applicazioni, che vanno dal riscaldamento all'uso industriale (Rahma Muthia et al., 2024). L'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'universo tuttavia, non essendo presente sulla Terra allo stato libero, ma sempre combinato chimicamente, va separato e la tecnica più utilizzata è detta *steam reforming* e consiste in un trattamento termico del metano con il vapore acqueo per estrarre l'idrogeno. Nel 2020, infatti, il 95% dell'idrogeno è stato prodotto utilizzando combustibili fossili, emettendo 830 milioni di tonnellate/anno di $CO_2$ (S. Shiva Kumar, Hankwon Lim, 2022).
Aumentare, quindi, questo 5% di idrogeno prodotto da fonti rinnovabili è una delle sfide per favorire la decarbonizzazione e un valido alleato è, anche in questo caso, il fotovoltaico flottante.

In generale, questa nuova tecnologia è in perfetta linea con gli obiettivi fissati nel PNIEC (Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima), predisposto dai Ministeri dello Sviluppo Economico, dell'Ambiente e delle Infrastrutture e Trasporti, le cui linee di intervento sono: decarbonizzazione, efficienza e sicurezza energetica, sviluppo del mercato interno dell'energia, della ricerca, dell'innovazione e della competitività (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2024).

# 1 Cenni teorici

## 1.1. Fotovoltaico

Con il termine *fotovoltaico* si indica la conversione di energia solare in energia elettrica. Esso, infatti, deriva dal termine greco *φῶς*, che significa luce, e da Volt, unità di misura del potenziale elettrico. Tale conversione è resa possibile dall'effetto fotovoltaico, che si verifica generalmente nei materiali semiconduttori.

L'effetto fotovoltaico, osservato per la prima volta nel 1839 da Alexandre Edmond Becquerel, è il fenomeno fisico di interazione radiazione-materia che si realizza quando un elettrone presente nella banda di valenza (banda elettronica a più alta energia tra quelle occupate da elettroni) di un materiale passa alla banda di conduzione (banda elettronica a più bassa energia tra quelle non completamente occupate), a causa dell'assorbimento di un fotone sufficientemente energetico che incide sul materiale stesso (BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica, 2023. Per un primo, generale inquadramento dell'argomento è possibile consultare A. Wallace et al. The photovoltaic effect, 1942).

L'effetto fotovoltaico è una sottocategoria dell'effetto fotoelettrico, che valse ad Albert Einstein il premio Nobel per la fisica nel 1921 e che consentì di dimostrare la natura non soltanto ondulatoria, ma anche corpuscolare, della luce. L'effetto fotoelettrico, infatti, consiste nell'emissione di un elettrone da parte di un metallo colpito da una radiazione elettromagnetica avente un'energia sufficiente. In particolare, un fotone

avente energia superiore all'energia di estrazione, interagendo con la superficie del metallo, può liberare un elettrone e generare corrente (Elena Buratin, 2023).

L'effetto fotovoltaico è alla base della produzione di energia elettrica negli impianti fotovoltaici e, in particolare, nelle celle fotovoltaiche, realizzate in un materiale semiconduttore, solitamente il silicio, appositamente "contaminato" da altre sostanze: atomi del terzo gruppo come boro e alluminio e atomi del quinto gruppo come arsenico, fosforo e antimonio ("drogaggio" del semiconduttore), per generare una differenza di potenziale. Il processo, rappresentato in Figura 1.1, è il seguente: un fotone con un certo livello di energia (che dipende dal tipo di cella utilizzata) colpisce il silicio contaminato e genera una coppia di cariche elettriche di segno opposto, un elettrone, di carica negativa, che migra in banda di conduzione, e una lacuna, di carica positiva, che passa in banda di valenza. Si creano quindi due strati, N a carica negativa (per eccesso di elettroni) e P a carica positiva (per eccesso di lacune) e, dove sono posti a contatto, ossia nella giunzione P-N, si forma il campo elettrico interno alla cella (Flavia Masci, 2023). La giunzione viene poi collegata a un conduttore esterno per creare un circuito chiuso in cui gli elettroni fluiscono dallo strato N a quello P, nel periodo in cui la cella è esposta alla luce (Morton B. Prince, 1970).

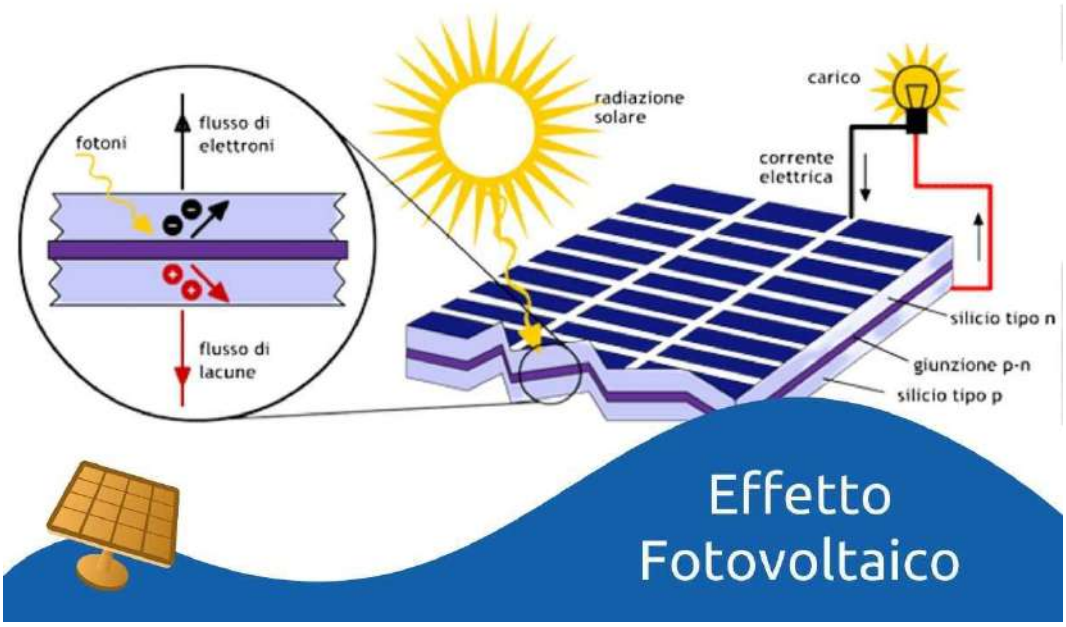



Figura 1.1: Rappresentazione grafica effetto fotovoltaico.

Fonte: Masci, F. Cos'è l'effetto fotovoltaico e come funziona? (13 dicembre 2023). Tratto il 16 luglio 2024, 20:10 da https://luce-gas.it/guida/rinnovabili/effetto-fotovoltaico.

Le celle fotovoltaiche, dove ha luogo, come appena citato, l'effetto fotovoltaico, vengono connesse in serie o in parallelo per formare un pannello, più pannelli collegati elettricamente in serie costituiscono una stringa e più stringhe il generatore fotovoltaico. Le celle sono assemblate tra uno strato superiore di vetro e uno inferiore di materiale plastico e sono contornate da una cornice di alluminio per conferire maggiore resistenza. Sul lato posteriore, inoltre, è presente una scatola di giunzione con i contatti elettrici e i diodi di bypass, che evitano che eventuali celle ombreggiate riducano o blocchino la circolazione di corrente.

I principali tipi di pannello sono:

- pannello fotovoltaico monocristallino, di colore blu scuro, costituito da celle monocristalline, ottenute da lingotti di silicio. Sono i pannelli a rendimento maggiore, a parità di superficie, ma sono anche i più costosi;

- pannello fotovoltaico policristallino, di colore blu cangiante, ottenuto da celle policristalline, formate da più cristalli orientati in modo casuale;
- pannello fotovoltaico a film sottile, ossia una lastra di colore scuro uniforme, costituita da celle amorfe. Questa tipologia ha una struttura diversa: su una superficie plastica o uno strato di vetro viene applicato un sottilissimo strato di silicio (BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica, 2023).

I pannelli fotovoltaici non sono, però, gli unici componenti di un impianto fotovoltaico, il quale è costituito, come mostrato in Figura 1.2, anche da:

- strutture di sostegno dei moduli, realizzate in acciaio zincato o in alluminio. Nel caso dei "tracker" possono anche cambiare l'inclinazione e l'orientamento dei moduli stessi;
- inverter, ossia dispositivi elettronici che consentono la conversione della corrente da continua ad alternata;
- sistema di controllo, che consente di monitorare il funzionamento e di registrare i dati principali;
- misuratori di energia, installati sulle linee elettriche;
- elementi volti alla distribuzione di energia elettrica come cavi, quadri elettrici, smorzatori e scaricatori di tensione;
- eventualmente si può aggiungere un sistema di accumulo (batteria) per accumulare l'energia prodotta ma non immediatamente utilizzata. Questo elemento risulta essere di grande importanza se si considera che la produzione energetica solare è intrinsecamente intermittente, a causa del ciclo giorno-notte, e variabile, per il cambiamento della posizione del Sole durante il giorno e l'anno e per l'eventuale passaggio di nuvole. In questo caso, in cui è presente una batteria, un impianto si definisce *isolato* o *off-* grid; invece, se è allacciato alla rete elettrica e funziona sia come produttore che come consumatore di energia, è di tipo *grid-connected* (Dora Francese, 2012).

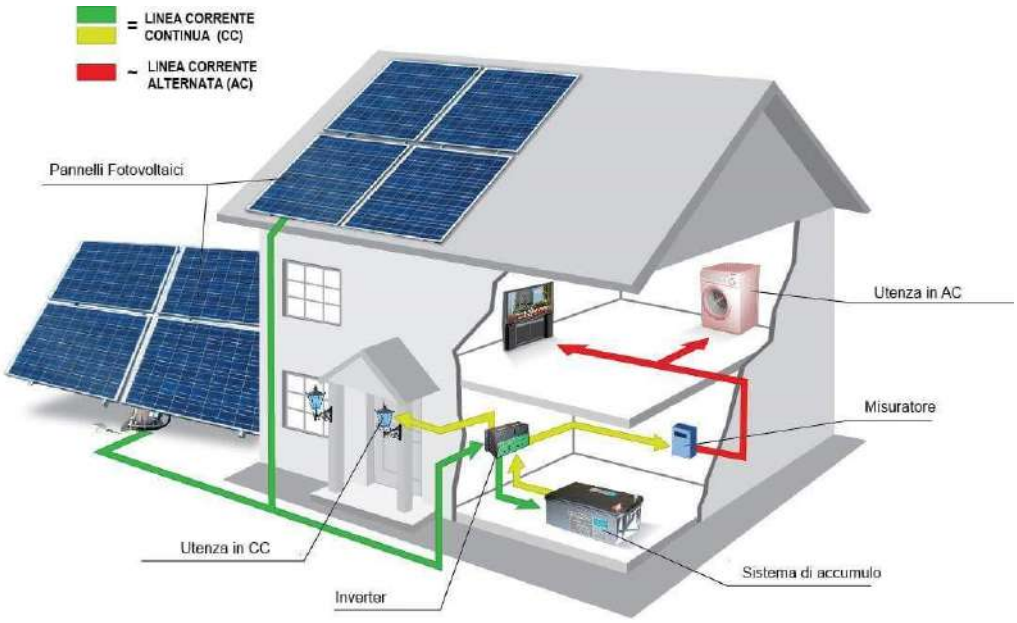



Figura 1.2: Componenti impianto fotovoltaico.

Fonte: INGSTUDIO Fotovoltaico- Soluzioni per l'energia. Come è fatto un impianto fotovoltaico. Tratto il 16 luglio 2024, 20:20 da https://www.ingstudio.eu/home/servizi/impianti-fotovoltaici-2/un-impianto-fotovoltaico/.

Uno dei parametri fondamentali di un pannello fotovoltaico è l'efficienza o rendimento, che caratterizza la quantità di radiazione solare incidente sul pannello che viene convertita in energia elettrica. Si tratta di un fattore fondamentale per ottimizzare non solo la produzione, ma anche le aree di installazione. Il dimensionamento di un impianto fotovoltaico, infatti, fissato il livello di potenza elettrica da raggiungere, dipende dall'efficienza dello stesso: tanto maggiore è l'efficienza, tanto minore è la superficie di pannello fotovoltaico da utilizzare (Lucio Munari, 2023).

Il rendimento $R$ di un pannello fotovoltaico, difatti, si calcola conoscendo la sua potenza di picco e le sue dimensioni, nel seguente modo:

$$R = \left( \frac{Potenza\ [W_p]}{\frac{Superficie\ [m^2]}{1000}} \right) 100 \qquad (2.1)$$

La potenza di picco viene calcolata in condizioni STC (Standard Test Condition), che prevedono un irraggiamento di 1000 W/m$^2$, una temperatura di 25°C e una distribuzione spettrale pari a 1.5 (BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica, 2022).

Per quanto riguarda la diffusione di questi impianti, mostrata in Figura 1.3, le statistiche dell'ente BNEF (Bloomberg New Energy Finance) mostrano che nel 2023 si è registrata una forte crescita della potenza fotovoltaica: nel terzo trimestre del 2023 la potenza fotovoltaica installata nel mondo era pari a 392 GW, in Europa a 62 GW e in Italia a 2.7 GW, che denotano una crescita rispetto al 2022 rispettivamente del 65%, 35% e 113% (Sonnen Italia, Content Team, 2023). Nel 2023, infatti, l'Italia rientrava tra i migliori 10 mercati fotovoltaici per capacità aggiunta nel mondo, posizionandosi all'ottavo posto della classifica, dominata dalla Cina (Stefania Del Bianco, 2024).

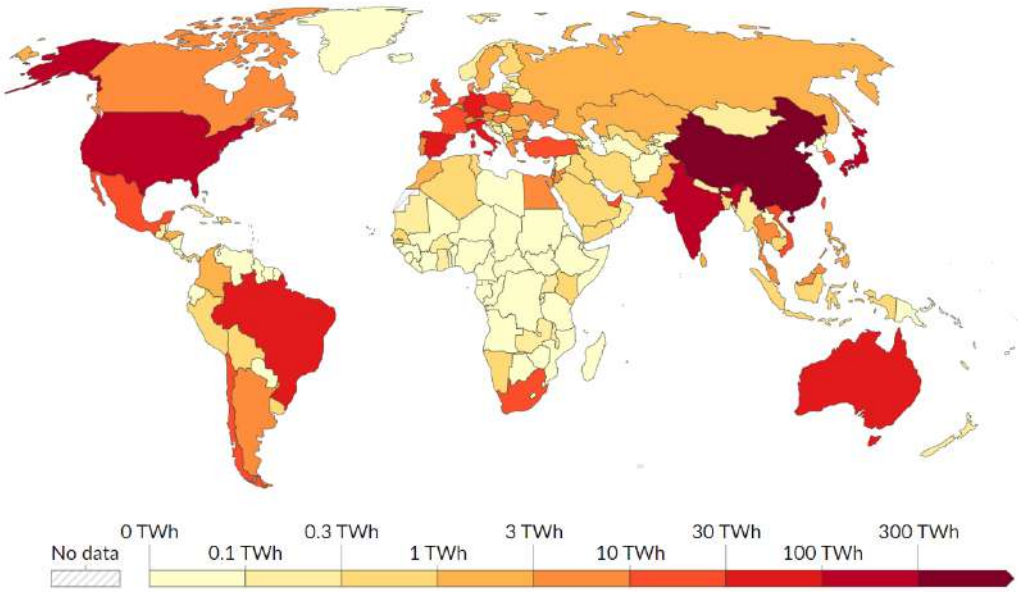



Figura 1.3: Produzione di elettricità da energia solare nel mondo nel 2023.

Fonte: Ember (2024); Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2024) – with major processing by Our World in Data. Tratto il 29 luglio 2024, 20:56 da https://ourworldindata.org/renewable-energy.

Se da un lato i pannelli fotovoltaici sfruttano un'energia rinnovabile e pulita come quella solare, dall'altro presentano problemi in tema di sostenibilità per quanto riguarda i materiali di cui sono composti e l'uso del suolo che essi comportano (Muhammad Tawalbeh et al., 2021). Per questo si stanno studiando soluzioni che ne limitino l'impatto ambientale, utilizzando materiali diversi e favorendo la loro integrazione architettonica. In questo caso si parla di BIVP (Building Integrated PhotoVoltaics), che consiste nel porre i moduli fotovoltaici nel profilo dell'edificio, ad esempio sostituendoli nel manto di copertura degli edifici o utilizzando moduli fotovoltaici strutturali (Francesco Ferrari, 2015).

## 1.2. Fotovoltaico flottante

Il fotovoltaico flottante o galleggiante (Floating PhotoVoltaic o FPV) è una tipologia di installazione di impianti fotovoltaici che, invece che essere disposti sulla terraferma o sugli edifici, sono collocati su specchi d'acqua, come invasi, laghi artificiali, laghetti per irrigazione agricola, impianti di trattamento delle acque reflue, cave e miniere abbandonate, bacini di centrali idroelettriche (Michele Sorrentino, 2023).
In questi impianti vengono utilizzati gli stessi pannelli fotovoltaici usati negli impianti terrestri, ma naturalmente occorrono specifiche tecnologie per permettere il loro galleggiamento e ancoraggio, fondamentale per evitare repentine variazioni dell'angolazione dei pannelli.
Tutte le componenti, mostrate in Figura 1.4, che costituiscono un impianto fotovoltaico flottante sono:

- una struttura galleggiante che sostenga il peso degli elementi sovrastanti. Sono generalmente realizzate in polietilene ad alta densità (HDPE), dato che è un materiale riciclabile, resistente ai raggi ultravioletti e alla corrosione, avente una buona resistenza a trazione e richiedente poca manutenzione. Più raramente vengono utilizzati acciaio o plastica rinforzata con fibra di vetro;

- i moduli fotovoltaici, realizzati in silicio con cornici in alluminio, i quali dovranno essere modificati o sostituiti per renderli adatti all'acqua salata, se il loro uso verrà esteso anche all'ambiente marino;
- linee di ormeggio e ancoraggio, per evitare che l'impianto si muova o si ribalti. Il sistema può essere ancorato sul fondale o sulla sponda. Spesso sono usate delle funi in nylon per permettere al sistema di muoversi nel caso in cui la profondità dell'acqua cambi o ci siano onde;
- cavi sottomarini, per trasportare la corrente generata a una stazione sulla terraferma;
- inverter (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022).

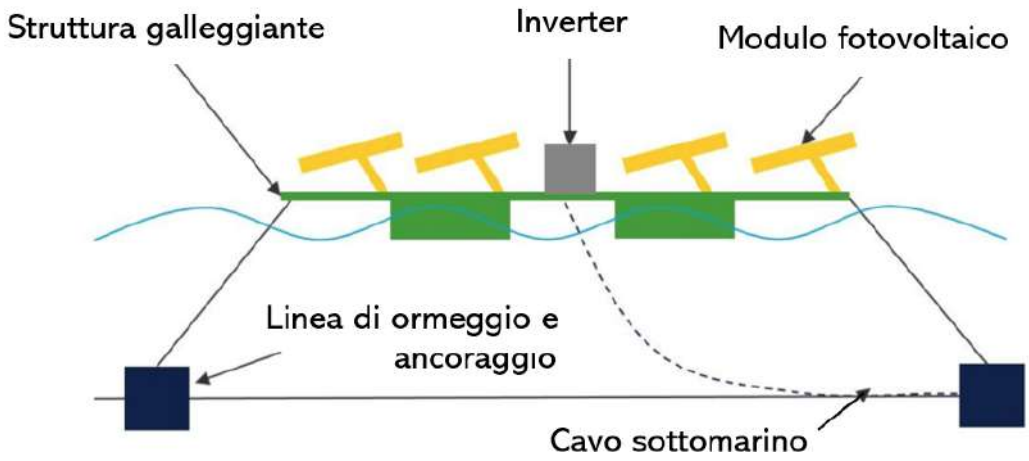



Figura 1.4: Componenti impianto fotovoltaico flottante.

Fonte: Essak, L.; Ghosh, A. Floating Photovoltaics: A Review. *Clean Technol.* 2022, *4*, 752-769. Tratto il 19 luglio 2024, 17:56 da https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030046. Modificato da Virginia Marini.

Questi impianti presentano delle caratteristiche tecniche che li rendono convenienti rispetto a quelli tradizionali su terra e questo spiega la notevole crescita che ha coinvolto il mercato di questa tecnologia, nonostante il loro costo sia superiore di circa il 20% rispetto a quello dei sistemi su terraferma (José Rojo Martín, 2019). In particolare,

i primi 20 impianti sono stati realizzati tra il 2007 e il 2013, la potenza installata ha raggiunto nel 2020 i 3 GW ed è atteso che, entro il 2025, arriverà a 10 GW (Christopher Hopson, 2020).
La prima installazione nel mondo è stata realizzata ad Aichi in Giappone nel 2007 e due anni dopo sono sorti anche in Italia gli impianti di Bubano e Solarolo (Kim Trapani, Miguel Redón, 2015).

Tali caratteristiche tecniche sono le seguenti (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022):

- consumo minimo di suolo, dato che sono interamente costruiti sull'acqua, tranne che per quegli elementi che servono per la connessione alla rete elettrica generale. Le superfici d'acqua su cui solitamente si installano questi impianti, inoltre, rispetto al suolo, hanno dei costi inferiori e presentano meno problematiche relative a permessi e autorizzazioni e, inoltre, introducono l'ulteriore beneficio di non avere elementi che possano ombreggiare i pannelli;
- aumento dell'efficienza, poiché l'acqua e l'aria sottostante i pannelli hanno l'effetto di ridurre la temperatura media e quindi di prevenire il surriscaldamento dei pannelli, aumentandone di conseguenza l'efficienza. Le alte temperature, infatti, influenzano negativamente i moduli fotovoltaici perché ne riducono sia la vita media sia l'efficienza poiché una temperatura superficiale superiore trasforma la luce del Sole in calore;
- installazione, gestione e dismissione facilitati, visto che sono più compatti di quelli utilizzati a terra. Inoltre, per la loro installazione, non sono necessari sistemi di fondazione o strutture fisse, per cui la loro realizzazione è reversibile ed è possibile, in fase di dismissione, il ripristino dello stato ambientale preesistente. Anche la loro manutenzione è più semplice, poiché richiedono meno pulizia, trovandosi in zone meno polverose;
- risparmio di acqua, poiché si limita l'evaporazione della stessa nelle zone coperte dai pannelli. Si tratta di un beneficio particolarmente importante per i

Paesi che soffrono di scarsità di acqua: è stato condotto uno studio che ha dimostrato che, coprendo con FPV il 25% della Rajghat Dam in India, la riduzione annuale di perdite d'acqua dovute all'evaporazione sarebbe pari a 1395 $m^3$ per MWp (Karmendra Kumar Agrawal et al., 2022);

- mitigazione di alcuni effetti del riscaldamento globale, come la fioritura di alghe tossiche. Uno studio del 2021 condotto da alcuni scienziati della Lancaster University e della University of Stirling, effettuato usando il programma di simulazione *MyLake* e i dati del Windermere Lake, raccolti dallo UK's Centre for Ecology and Hydrology, infatti, ha dimostrato che le installazioni FPV possono ridurre la durata della stratificazione, cui sono soggetti i laghi stagionalmente, la quale comporta la deossigenazione degli strati profondi. I cambiamenti prodotti dagli impianti hanno un'entità comparabile a quelli che il cambiamento climatico causerebbe, per questo la realizzazione di impianti FPV può essere considerata una misura di contrasto al cambiamento climatico e al riscaldamento globale (Giles Exley et al., 2021);
- tracking, poiché lo spostamento dei pannelli in acqua, per l'inseguimento solare, richiede poca energia e macchinari poco complessi;
- uso di aree già sfruttate da attività umane, dato che questi impianti possono essere installati in zone come cave inondate e centrali idroelettriche. Questo non solo limita lo sfruttamento di nuove aree inutilizzate, ma fa sì che venga aumentata la resa di zone già sfruttate o abbandonate.

  L'installazione su bacini di centrali idroelettriche, mostrata in Figura 1.5, è di particolare rilievo poiché non soltanto consente di sfruttare l'infrastruttura di distribuzione elettrica già esistente e prossima all'impianto, ma permette di coniugare i benefici dei due impianti singoli e di aumentare quindi le capacità di questo nuovo impianto "ibrido". La limitata evaporazione dell'acqua indotta dalla parziale copertura dei pannelli, infatti, migliora la resa della centrale idroelettrica e, inoltre, nelle centrali idroelettriche a pompaggio, si può

impiegare l'energia solare prodotta in eccesso durante il giorno per riempire il bacino tramite le pompe. Inoltre, usando i due sistemi complementarmente, ossia sfruttando il fotovoltaico di giorno e l'idroelettrico di notte, si potrebbe superare uno dei principali svantaggi del solare, ossia la sua intermittenza.

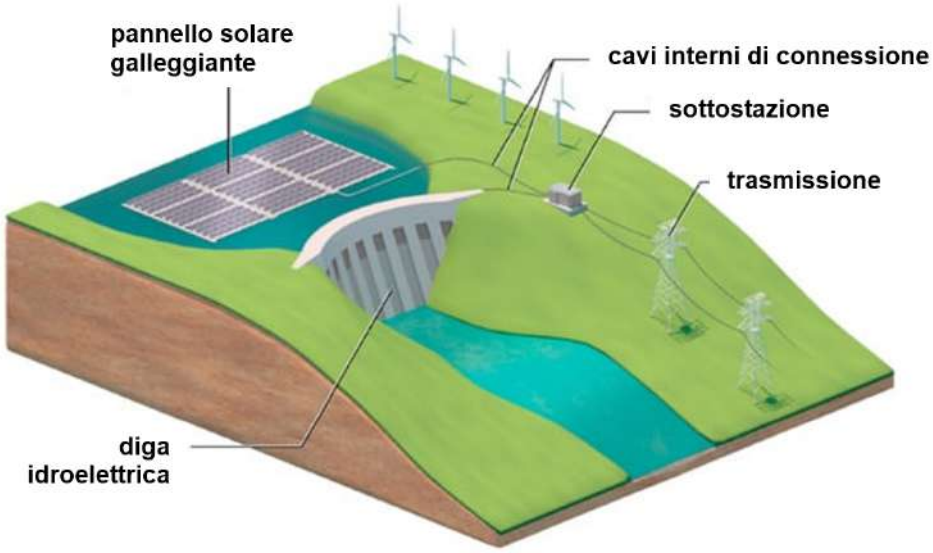



Figura 1.5: Centrale idroelettrica con FPV.

Fonte: Riccio, G. Hydroelectric dams with floating solar panels, huge potential. Tratto il 19 luglio 2024, 18:27 da https://en.futuroprossimo.it/2020/10/dighe-idroelettriche-con-pannelli-solari-galleggianti-potenziale-enorme/. Modificato da Virginia Marini.

Come quasi tutte le tecnologie di recente sviluppo, tuttavia, il fotovoltaico flottante presenta alcune caratteristiche da migliorare, come:

- sicurezza elettrica e affidabilità a lungo termine, quindi è necessario che i pannelli fotovoltaici siano resistenti alla corrosione e per questo viene utilizzato l'HDPE (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022);
- onde e vento, a cui i pannelli e tutti gli elementi connessi devono essere capaci di resistere, soprattutto se installati in mare aperto o vicino alle coste (Dricus De Rooij, 2015);
- umidità, che potrebbe aumentare la temperatura dei moduli fotovoltaici (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022);

- complessità legate ai sistemi di galleggiamento e ancoraggio, che devono essere adattati a questo tipo di tecnologia (Dricus De Rooij, 2015).

Inoltre, sono stati sollevati, da parte di alcune associazioni ambientaliste, timori circa il loro uso in aree di pregio e il loro effetto su flora e fauna acquatiche, ma sono già stati esclusi da alcuni studi, come quelli effettuati nell'impianto FPV a Zwolle, in Olanda (Energia & Mercato, Redazione, 2021). In generale, però, trattandosi di una tecnologia di recente sviluppo, non si conoscono ancora totalmente tutti i possibili effetti che le diverse dimensioni degli impianti possono generare, per cui è importante ricercare ulteriori evidenze scientifiche sugli impatti (Giles Exley et al., 2021).

Dall'analisi del loro funzionamento, delle loro caratteristiche tecniche e delle loro criticità, consegue che uno degli aspetti più importanti da considerare è la scelta del sito ove installare i pannelli fotovoltaici flottanti, che non deve trovarsi in un'area protetta (Richard Iestyn Woolway et al., 2024). L'idoneità del sito, infatti, dipende da una serie di fattori predisponenti e di caratteristiche che sappiano massimizzare l'efficienza e la durabilità dell'impianto.
Questi fattori predisponenti sono (Laura Essak, Aritra Ghosh, 2022):
1) per quanto riguarda il clima,

- alto irradiamento;
- pioggia e nebbia limitati;
- velocità del vento inferiore a 30 m/s;

2) relativamente al luogo,

- esso deve essere vicino a una connessione elettrica;
- deve essere comodo per il trasporto, l'installazione e la manutenzione dei pannelli fotovoltaici flottanti;

3) rispetto alle condizioni del terreno, esso deve essere

- resistente;

- compatto, per permettere l'ancoraggio;

4) a proposito delle caratteristiche dell'acqua,

- devono esserci poche onde;
- salinità e durezza devono essere basse.

Recentemente, inoltre, sono stati verificati i benefici derivanti dall'installazione dei pannelli fotovoltaici flottanti a elevate altitudini, nei laghi di alta montagna, in cui il manto nevoso può incrementare l'energia prodotta, a causa della sua maggiore albedo. Nel 2019, infatti, è stato installato un impianto da 448 kWp sul Lac des Toules, situato a un'altitudine di 1800 m s.l.m. in Svizzera, ed è stato stimato che la produzione elettrica è maggiore del 50% rispetto a un impianto delle stesse dimensioni ma situato in pianura (Luigi Jorio, 2020). Si tratta di un risultato di rilievo, soprattutto considerando che la domanda di energia in Svizzera è maggiore in inverno, quando la copertura nevosa è anch'essa più consistente.

# 2 Le aree protette e il sistema di vincoli in Italia

In Italia la necessità della transizione energetica e la formazione di una coscienza ecologica sono dei temi abbastanza recenti e, di conseguenza, risultano "disallineati" rispetto alla normativa costituzionale, che prevede la tutela del paesaggio quale bene primario, anche rispetto all'utilizzo di fonti di energia rinnovabile (Mariangela Crisci, 2023). Con la legge costituzionale n. 1 dell'11 febbraio 2022, però, è stato fatto un grande passo sia in tema di sviluppo sostenibile che di tutela dell'ambiente, grazie all'aggiunta del comma 3 all'articolo 9 e alla modifica dell'articolo 41 della Costituzione italiana, che recitano rispettivamente (Giovanna Basile, 2022):

«La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica.

Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione.

**Tutela l'ambiente, la biodiversità e gli ecosistemi, anche nell'interesse delle future generazioni. La legge dello Stato disciplina i modi e le forme di tutela degli animali.**»

«L'iniziativa economica privata è libera.

Non può svolgersi in contrasto con l'utilità sociale o in modo da recare danno **alla salute, all'ambiente**, alla sicurezza, alla libertà, alla dignità umana.

La legge determina i programmi e i controlli opportuni perché l'attività economica pubblica e privata possa essere indirizzata e coordinata a fini sociali **e ambientali**.» (Normattiva.it)

La normativa di riferimento in materia di disciplina delle aree protette in Italia è la Legge Quadro sulle Aree Protette (L. 394 del 6 dicembre 1991), i cui commi 2, 3 e 4 dell'Articolo 1 definiscono le aree protette e chiariscono gli scopi della loro istituzione. Tali commi recitano:

«Ai fini della presente legge costituiscono il patrimonio naturale le formazioni fisiche, geologiche, geomorfologiche e biologiche, o gruppi di esse, che hanno rilevante valore naturalistico e ambientale.

I territori nei quali siano presenti i valori di cui al comma 2, specie se vulnerabili, sono sottoposti ad uno speciale regime di tutela e di gestione, allo scopo di perseguire, in particolare, le seguenti finalità:

a) conservazione di specie animali o vegetali, di associazioni vegetali o forestali, di singolarità geologiche, di formazioni paleontologiche, di comunità biologiche, di biotopi, di valori scenici e panoramici, di processi naturali, di equilibri idraulici e idrogeologici, di equilibri ecologici;

b) applicazione di metodi di gestione o di restauro ambientale idonei a realizzare una integrazione tra uomo e ambiente naturale, anche mediante la salvaguardia dei valori antropologici, archeologici, storici e architettonici e delle attività agro-silvo-pastorali e tradizionali;

c) promozione di attività di educazione, di formazione e di ricerca scientifica, anche interdisciplinare, nonché di attività ricreative compatibili;

d) difesa e ricostituzione degli equilibri idraulici e idrogeologici.

I territori sottoposti al regime di tutela e di gestione di cui al comma 3 costituiscono le aree naturali protette. In dette aree possono essere promosse la valorizzazione e la sperimentazione di attività produttive compatibili.» (Normattiva.it)

Tale legge, inoltre, istituisce l'Elenco ufficiale delle aree protette e le classifica come (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2013):

- parchi nazionali, costituiti da aree terrestri, fluviali, lacuali o marine che contengono uno o più ecosistemi intatti o anche parzialmente alterati da interventi antropici, una o più formazioni fisiche, geologiche, geomorfologiche, biologiche, di rilievo internazionale o nazionale per valori naturalistici, scientifici, estetici, culturali, educativi e ricreativi tali da richiedere l'intervento dello Stato ai fini della loro conservazione per le generazioni presenti e future;
- parchi naturali regionali e interregionali, ossia aree terrestri, fluviali, lacuali ed eventualmente da tratti di mare prospicienti la costa, di valore naturalistico e ambientale, che costituiscono, nell'ambito di una o più regioni limitrofe, un sistema omogeneo, individuato dagli assetti naturalistici dei luoghi, dai valori paesaggistici e artistici e dalle tradizioni culturali delle popolazioni locali;
- riserve naturali, vale a dire aree terrestri, fluviali, lacuali o marine che contengono una o più specie naturalisticamente rilevanti della flora e della fauna, ossia che presentano uno o più ecosistemi importanti per la diversità biologica o per la conservazione delle risorse genetiche. Tali riserve naturali possono essere statali o regionali in base alla rilevanza degli elementi naturalistici in esse presenti;
- zone umide di interesse internazionale, costituite da aree acquitrinose, paludi, torbiere oppure zone naturali o artificiali d'acqua, permanenti o transitorie, comprese zone di acqua marina la cui profondità, quando c'è bassa marea, non superi i 6 metri che, per le loro caratteristiche, possono essere considerate di importanza internazionale ai sensi della convenzione di Ramsar (ossia la Convenzione relativa alle zone umide di importanza internazionale, firmata a Ramsar il 2 febbraio 1971);
- altre aree naturali protette, che non rientrano nelle precedenti classi, che possono essere a gestione pubblica, se istituite con leggi regionali o

provvedimenti equivalenti, o a gestione privata, se istituite invece con provvedimenti formali pubblici o con atti contrattuali, quali concessioni o forme equivalenti;

- aree di reperimento terrestri e marine, che costituiscono le aree la cui conservazione, attraverso l'istituzione di aree protette, è considerata prioritaria.

L'Italia è il Paese europeo con la maggiore biodiversità per numero di specie e processi biologici (Stefano Maglia, 2015), con 56000 specie di fauna e 8000 specie vegetali presenti sul territorio nazionale, diffusi soprattutto negli habitat nei parchi nazionali, che danno un contributo importantissimo contro l'effetto serra e il consumo di suolo (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2022). Le aree protette in Italia sono 871, per un totale di più di 3 milioni di ettari tutelati a terra, 2850 mila ettari a mare e 658 chilometri di costa circa. I parchi nazionali sono 24 e le aree marine protette 32, a cui va aggiunto il sistema di siti di interesse comunitario appartenenti alla Rete Natura 2000 (WWF).

Quest'ultima è una rete ecologica diffusa su tutto il territorio dell'Unione Europea volta a garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie minacciate o rare. Si tratta dello strumento principale della politica dell'UE per la conservazione della biodiversità ed è stata istituita con la Direttiva 92/43/CEE "Habitat". Questa rete è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), adottati dalla Commissione Europea, i quali vengono poi designati come Zone Speciali di Conservazione (ZSC) con decreto ministeriale, e dalle Zone di Protezione Speciale (ZPS), istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE "Uccelli" e designate direttamente dagli Stati membri. SIC, ZSC e ZPS, che coprono il 19% circa del territorio terrestre italiano e oltre il 6% di quello marino, non sono zone in cui l'attività umana è esclusa ma, come citato nell'articolo 2 della Direttiva Habitat, si tiene conto "delle esigenze economiche, sociali

e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali" (Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, 2023).

Per quanto riguarda i parchi, vige per ognuno il Regolamento del parco, che disciplina le attività consentite, come le attività sportive, ricreative ed educative, di ricerca scientifica e biosanitaria, ecc. e quelle vietate in quanto potrebbero compromettere la salvaguardia del paesaggio e degli ambienti naturali tutelati; le sanzioni di natura penale, invece, sono riportate nella L. 394/91 (Stefano Maglia, 2015).

Nella legislazione italiana, inoltre, è previsto un ulteriore strumento di tutela delle aree di particolare pregio paesaggistico: il vincolo paesaggistico, introdotto nel 1985 dalla Legge Galasso (L. 431/85). Si tratta di un insieme di norme e regolamenti che disciplinano gli interventi edilizi e le opere di urbanizzazione in zone geografiche caratterizzate da particolare bellezza paesaggistica e da importanza ambientale, che in Italia si stima che siano circa metà del territorio nazionale. Tali aree sono elencate nel Codice dei beni culturali e del paesaggio (D.Lgs. 42/2004), nel cui articolo 136 sono citati gli immobili e le aree di notevole interesse pubblico, e nell'articolo 142 sono riportate le aree tutelate per legge, ossia:

- i territori costieri e contermini ai laghi compresi in una fascia della profondità di 300 metri dalla linea di battigia, anche per i terreni elevati sul mare;
- i fiumi, i torrenti, i corsi d'acqua iscritti negli elenchi previsti dal Testo Unico delle disposizioni di legge sulle acque ed impianti elettrici;
- le montagne per la parte eccedente 1.600 metri sul livello del mare per la catena alpina e 1.200 metri sul livello del mare per la catena appenninica e per le isole;
- i ghiacciai e i circhi glaciali;
- i parchi e le riserve nazionali o regionali, nonché i territori di protezione esterna dei parchi;

- i territori coperti da foreste e da boschi, ancorché percorsi o danneggiati dal fuoco, e quelli sottoposti a vincolo di rimboschimento;
- le aree assegnate alle università agrarie e le zone gravate da usi civici;
- le zone umide incluse nell'elenco previsto dal D.P.R. 13 marzo 1976, n. 448;
- i vulcani;
- le zone di interesse archeologico.

Il vincolo paesaggistico impone, quindi, delle restrizioni per perseguire il fine di bilanciare conservazione del territorio e sviluppo umano e, di conseguenza, prima di avviare un progetto in un'area soggetta a questo tipo di vincolo, è necessario ottenere un'autorizzazione paesaggistica da enti gerarchicamente sovraordinati, come la Regione, previa valutazione e parere vincolante della Sovrintendenza ai Beni Paesaggistici e Ambientali. Esistono dei casi in cui si può richiedere una deroga, ossia la rimozione del vincolo imposto dalla Soprintendenza: se l'intervento proposto produce un impatto ambientale minimo, se esso contribuisce a preservare o ripristinare un bene di valore storico o culturale, se ha un grande interesse pubblico e i benefici superano i possibili danni al paesaggio, se non esistono alternative realistiche all'intervento (BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica, 2023).

Per snellire, tuttavia, l'iter burocratico previsto dall'autorizzazione ordinaria, con il Regolamento sull'autorizzazione semplificata (DPR 31/2017) si distinguono oggi tre diverse procedure, in base al tipo di intervento da eseguire:

- intervento libero, nel caso in cui le opere non modifichino la struttura del territorio o dell'immobile tutelato. In questo caso non è prevista alcuna autorizzazione paesaggistica;
- autorizzazione semplificata, se le opere prevedono delle modifiche strutturali. Questo iter dura circa 30 giorni e bisogna presentare al Comune una Relazione

Paesaggistica semplificata redatta da un tecnico abilitato e il Comune potrà autorizzarla o meno;

- autorizzazione ordinaria in luoghi soggetti a vincolo paesaggistico, se l'intervento è importante e complesso. In questo caso l'iter dura circa 5 mesi e prevede la produzione di diversi documenti: il progetto, una documentazione fotografica dello stato di fatto e la Relazione Paesaggistica. Bisogna inoltre dimostrare la regolarità urbanistica e catastale di quanto preesistente. Questa autorizzazione ha una validità di cinque anni (GMG, 2023).

# 3 Materiali e metodi

Il presente lavoro ha come area di studio l'intero territorio italiano, in modo da individuare tutti quegli specchi d'acqua che, in seguito a una fase di selezione e una di gerarchizzazione, possano ritenersi idonei a ospitare impianti fotovoltaici flottanti.

Trattandosi di un'area vasta, con una superficie complessiva pari a 302073 $km^2$ (Istat, 2013), e suddivisa in venti Regioni, è stato necessario aggregare tra loro e integrare diversi database, in modo da ottenere una copertura del territorio quanto più completa possibile.

## 3.1. DBPrior10k

La fonte principale per quanto riguarda gli specchi d'acqua presenti in Italia è il DBPrior10k, database contenente la copertura della viabilità stradale e ferroviaria, dell'idrografia e dei limiti amministrativi del territorio nazionale, in scala 1:10000.
Si tratta di un progetto, "Strati Prioritari di Interesse Nazionale", realizzato nell'ambito dell'IntesaGIS (Intesa Stato-Regioni-Enti Locali sui Sistemi Informativi Geografici), a partire dal 2003, in tre fasi (2003, 2006, 2007).
Gli obiettivi della prima fase erano:

- per le Regioni, l'acquisizione di tutto il materiale disponibile presso gli Enti Regionali, l'assegnazione a ditte private, mediante gare di appalto, dei lotti regionali per la digitalizzazione e la codifica degli strati informativi necessari, la rielaborazione dei dati, dopo opportuno collaudo, secondo il modello dati esposto nel *Documento_DBPrior.pdf* ("1N1005v1.0.doc");

- per la Provincia Autonoma di Trento, l'acquisizione di tutto il materiale e la successiva realizzazione del DBPrior10K secondo il medesimo modello dati;
- per Piemonte, Liguria, Lombardia, Emilia-Romagna, Toscana, Marche, Abruzzo, Lazio, Umbria, Veneto, l'acquisizione degli strati informativi già disponibili presso gli Enti Regionali (giudicati dagli Enti stessi idonei al loro inserimento nel progetto), la rielaborazione dei dati e l'adattamento delle tabelle associate ai dati geografici, secondo il modello dati esposto nel documento *Documento_DBPrior.pdf* ("1N1005v1.0.doc");
- la realizzazione degli "attacchi" sui confini regionali, allo scopo di rendere continue le coperture degli strati informativi per tutto il territorio nazionale;
- la conversione delle coperture complete nel sistema di riferimento geografico WGS84, standard nazionale.

Durante la seconda fase è stata completata dalla RSDE (Remote Sensing for Digital Earth) l'attività di *"Pubblicazione del DBPRIOR10k su www.IntesaGIS ed omogeneizzazione preliminare del grafo della viabilità"*.

Nel corso della terza fase, il Centro Interregionale ha svolto, dopo aver acquisito e rielaborato secondo il modello dati i dati dagli Enti responsabili, le seguenti attività:

- Regione Valle d'Aosta (integrazione);
- Regione Veneto (revisione/integrazione);
- Regione Friuli-Venezia Giulia (integrazione);
- Regione Lazio (revisione/integrazione);
- Provincia Autonoma di Bolzano (integrazione).

Anche in questa fase è stata eseguita la realizzazione degli "attacchi" sui confini regionali e la conversione delle coperture nel sistema di riferimento geografico WGS84.

Dato che risale a ottobre 2007, il DbPrior10k è un database non recente, ma comunque molto consistente, ottenuto da diverse fonti, riportate in Tabella 3.1 con il rispettivo

numero identificativo (Strati Prioritari di Interesse Nazionale DBPrior10k, 2007). Il fatto che sia un prodotto omogeneo a copertura nazionale, anche se in alcuni casi meno aggiornato, lo rende un'ottima base per condurre uno studio che non sia su scala regionale, ma nazionale.

Tabella 3.1: Origine del dato.

Fonte: Strati Prioritari di Interesse Nazionale DBPrior10k, 2007.

| ORIGINE | |
|---|---|
| 0 | Non codificato |
| 1 | Da dati SIT |
| 2 | Da CTR |
| 3 | Da ortofoto |
| 4 | Da dati ISTAT |
| 5 | Da altra fonte |
| 6 | Introdotti da Centro Interregionale |
| 99 | Da verificare |

Nell'ambito di questo lavoro, degli strati informativi presenti, sono stati utilizzati quello sulla viabilità (stradale) e quello sull'idrografia.

Lo strato della viabilità è costituito da elementi tabellari, puntuali e lineari, continui da intersezione a intersezione (segmentazione dinamica). Le elaborazioni sono state svolte sia sugli elementi puntuali, le intersezioni stradali, suddivise nelle categorie mostrate in Tabella 3.2, sia sugli elementi lineari, i tratti stradali che, tramite la tabella contenente l'anagrafe delle strade, sono stati categorizzati come mostrato in Tabella 3.3.

Tabella 3.2: Tipo di intersezione stradale.

Fonte: Strati Prioritari di Interesse Nazionale DBPrior10k, 2007.

| TIPO I.S. | |
|---|---|
| 0 | Non codificato |
| 1 | Ordinaria: intersezione a raso/biforcazione |
| 2 | Intersezione a livelli sfalsati con svincoli |
| 3 | Casello/barriera autostradale |
| 4 | Rotatoria e minirotatoria |
| 5 | Passaggio a livello |
| 6 | Inizio/fine tratto stradale |
| 7 | Cambio toponimo/patrimonialità |
| 8 | Nodo intermodale |
| 9 | Interruzione loop |
| 72 | Area a traffico non strutturato |
| 81 | Nodo intermodale - Ferrovia |
| 82 | Nodo intermodale - Aeroporto |
| 83 | Nodo intermodale - Porto Marittimo |
| 84 | Nodo intermodale - Porto Fluviale |
| 85 | Nodo intermodale - Porto Lacuale |
| 95 | Variazione tecnico funzionale |
| 96 | Intersezione + Variazione tecnico funzionale |
| 99 | Da verificare |
| 100 | Intersezione con confine regionale |

Tabella 3.3: Tipo di tratto stradale.

Fonte: Strati Prioritari di Interesse Nazionale DBPrior10k, 2007.

| TIPO T.S. | |
|---|---|
| SC | Strada comunale |
| COM/URB | Strada comunale/urbana |
| SP | Strada provinciale |
| SR | Strada regionale |
| SS | Strada statale |
| A o SM | Autostrada |
| PR | Strada privata |
| FOR | Strada forestale/alpestre |
| NC | Non classificato |

Lo strato informativo dell'idrografia è costituito da elementi tabellari, poligonali, puntuali e lineari, spezzati in corrispondenza dei cambi di attributo (segmentazione

fisica). Le elaborazioni sono state svolte soltanto sugli elementi poligonali, ossia gli specchi d'acqua, suddivisi nelle sette categorie riportate in Tabella 3.4.

Tabella 3.4: Natura dello specchio d'acqua.

Fonte: Strati Prioritari di Interesse Nazionale DBPrior10k, 2007.

| NATURA | |
|---|---|
| 0 | Non codificato |
| 1 | Lago |
| 2 | Stagno/palude |
| 3 | Torbiera |
| 4 | Laguna/valle |
| 5 | Bacino artificiale |
| 6 | Altro |

Nel *Documento_DBPrior.pdf* ("1N1005v1.0.doc") le diverse categorie sono definite come segue:

- per "lago" «si intende uno specchio d'acqua alimentato da uno o più corsi d'acqua superficiali o sotterranei»;
- per "stagno/palude" «si intende una distesa d'acqua di scarsa profondità, costituita da un ristagno d'acqua in terreno pianeggiante o con leggere depressioni o con pendenze troppo piccole per consentire il normale deflusso delle acque»;
- per "torbiera" «si intende un ecosistema paludoso, popolato da piante igrofile, che si sviluppa in zone dove sussiste ristagno permanente di acque; la massa vegetale accumulata deve contenere dal 20 al 30% di materia organica ed avere uno spessore di almeno 40 cm (tratto da Corine Land-cover – guida tecnica)»;

- per “laguna” «si intende una distesa d’acqua salata o salmastra, separata dal mare a causa di sbarramenti naturali o artificiali; è comunicante con il mare in forma permanente o temporanea»;
- per “bacino artificiale” «si intende uno specchio d’acqua generato da opere di ritenuta».

Gli specchi d’acqua contenuti nel rispettivo file del DBPrior 10k sono mostrati in Figura 3.1, in cui inoltre sono riportati soltanto i confini regionali dell’Italia, in modo da favorire la visualizzazione degli specchi stessi.

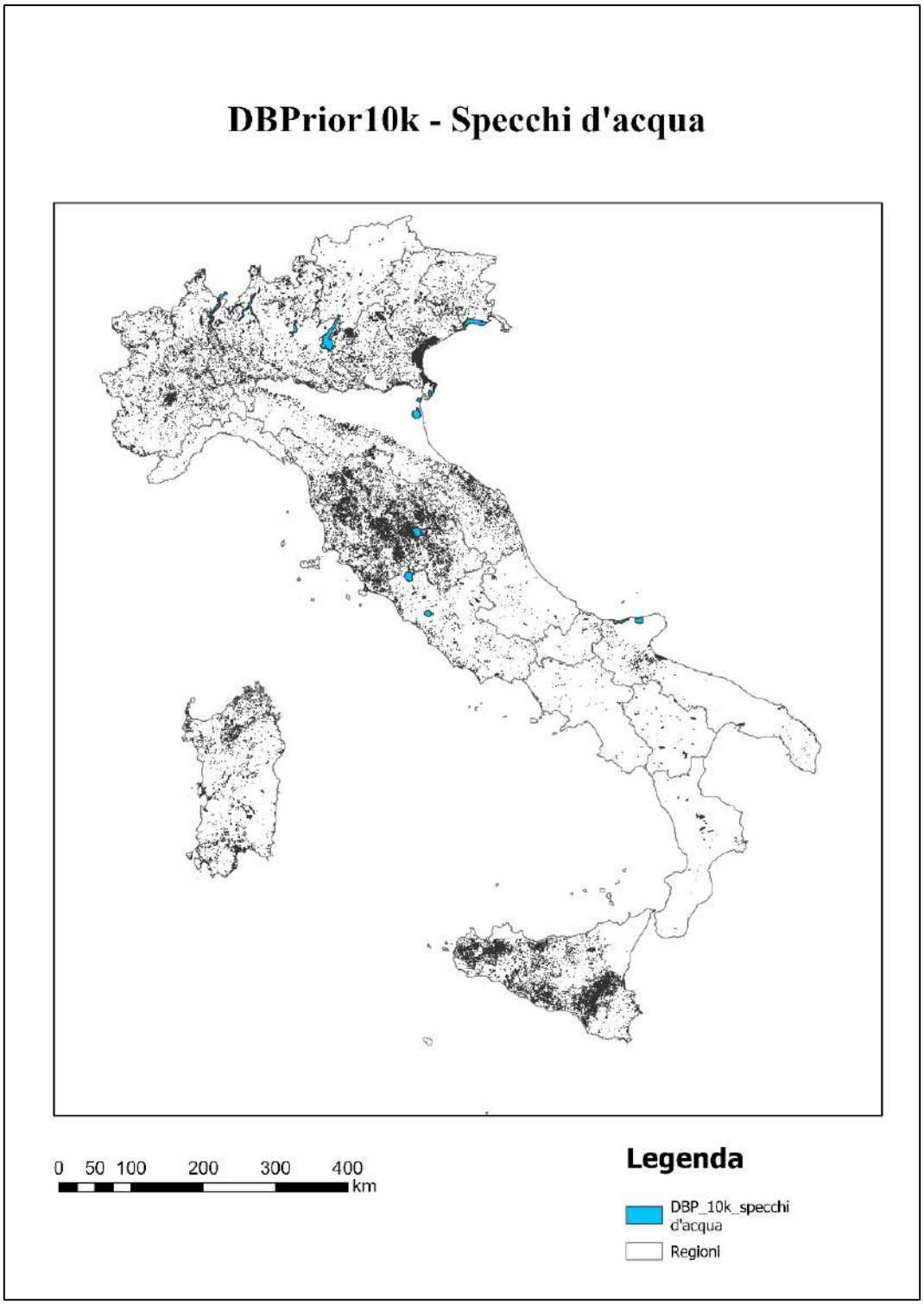



Figura 3.1: Specchi d'acqua (DBPrior10k).

## 3.2. DBTR Emilia-Romagna

In Figura 3.1, si nota in Emilia-Romagna una differenza netta a livello di copertura di specchi d'acqua, per cause non note con certezza. Una volta verificato, tramite confronti con i database aggiornati di altre Regioni e controlli visivi, che la mancanza di una porzione di dati è un caso isolato della Regione Emilia-Romagna, si è proceduto a integrare il DBPrior10k con il Database Topografico Regionale (Acque interne – Specchi d'acqua) della Regione in questione.

Per ottenere un prodotto omogeneo, gli elementi presenti nel DBTR sono stati categorizzati come nel DBPrior10k, utilizzando la Tabella 3.5 come tabella di conversione tra le sette categorie del DBPrior10k e quelle usate nel DBTR. Dalla totalità degli specchi d'acqua presenti in Emilia-Romagna sono stati esclusi quelli definiti "maceri" poiché non idonei ai fini di questo progetto.

Tabella 3.5: Tabella di conversione categorie DBPrior10k e DBTR Emilia-Romagna.

| NATURA | Tipi specchi d'acqua CTR Emilia-Romagna |
|---|---|
| 0 | Non assegnato |
| 1 | Lago |
| | Naturale |
| | Altra naturale |
| | Cava in falda |
| | Lago per alimentazione impianti irrigui |
| 2 | Palude |
| | Stagno |
| 4 | Laguna |
| 5 | Lago artificiale |
| | Invaso artificiale |
| | Altro invaso artificiale |
| | Altro lago artificiale |
| | Lago per produzione energia elettrica |
| 6 | Altro |
| | Salina |

Dall'integrazione, quindi, degli specchi d'acqua contenuti nel DBPrior10k e di quelli del DBTR che non fossero già presenti nel DBPrior10k, è stato ottenuto l'insieme di

elementi di riferimento, su cui eseguire tutte le elaborazioni successive, ossia il complesso di specchi d'acqua presenti sul territorio italiano, mostrato in Figura 3.2.

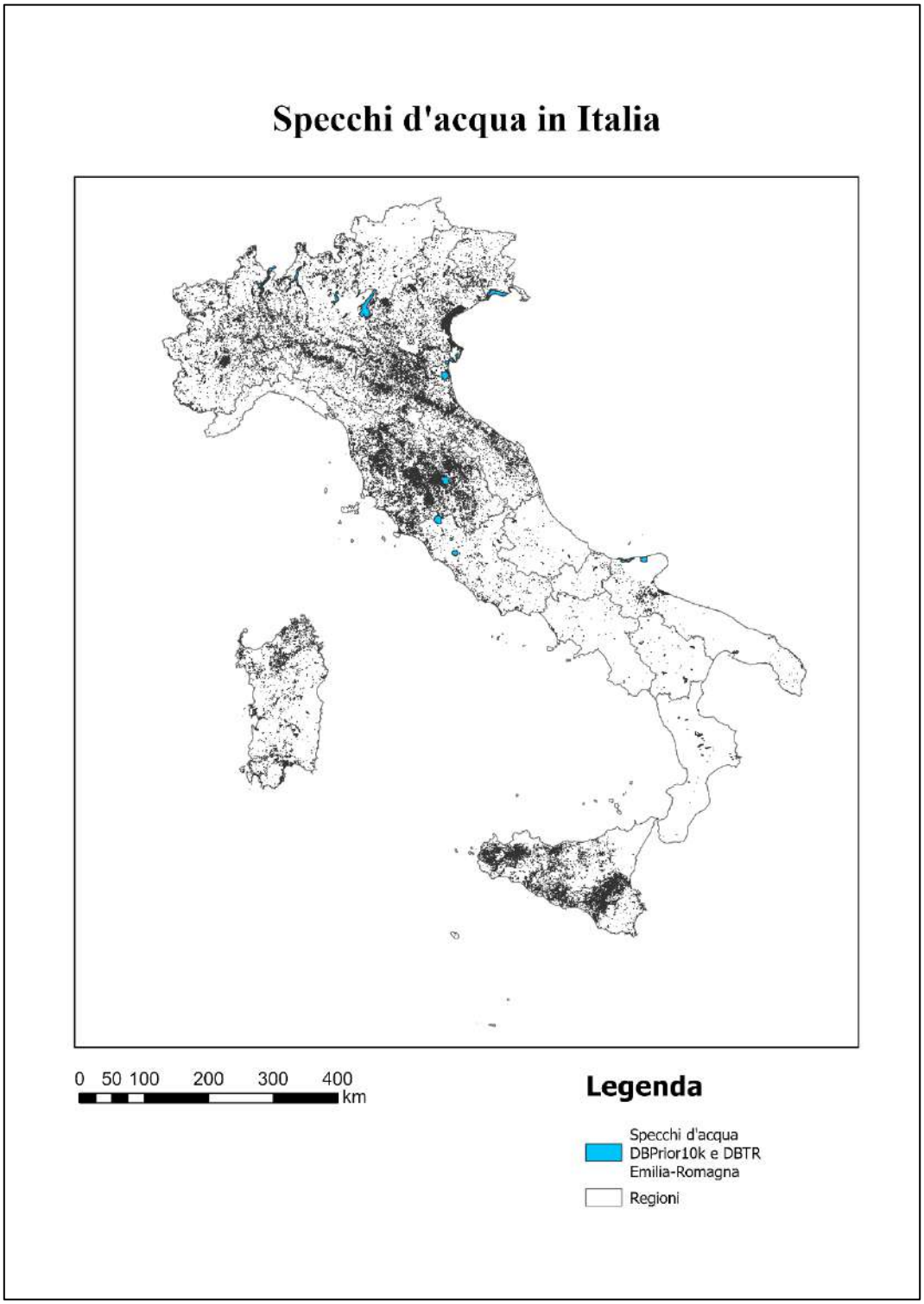



Figura 3.2: Specchi d'acqua ottenuti dall'integrazione del DBPrior10k con il DBTR Emilia-Romagna.

Nell'ambito di questo studio, quindi, sono stati considerati 81253 specchi d'acqua, con una superficie complessiva pari a 3226.2 km$^2$.

Dato il numero considerevole di elementi, per "sintetizzare" e rappresentare in modo efficace le informazioni in essi contenute, sono state calcolate le distribuzioni di frequenza della superficie e della natura degli specchi d'acqua, riportate rispettivamente in Figura 3.3 e in Figura 3.4.

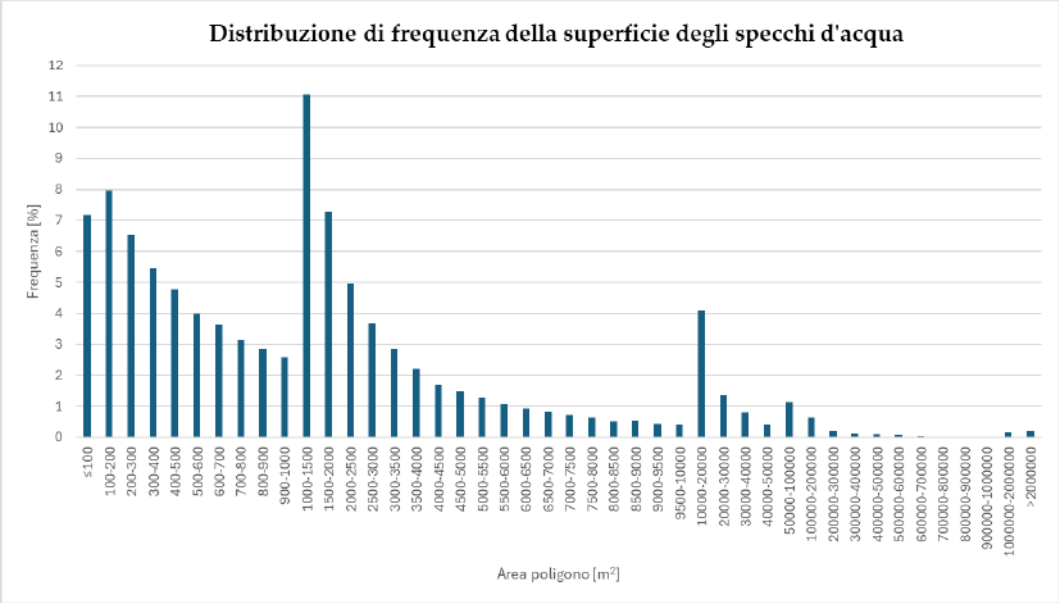



Figura 3.3: Distribuzione di frequenza della superficie degli specchi d'acqua (DBPrior10k-DBTR E.-R.).

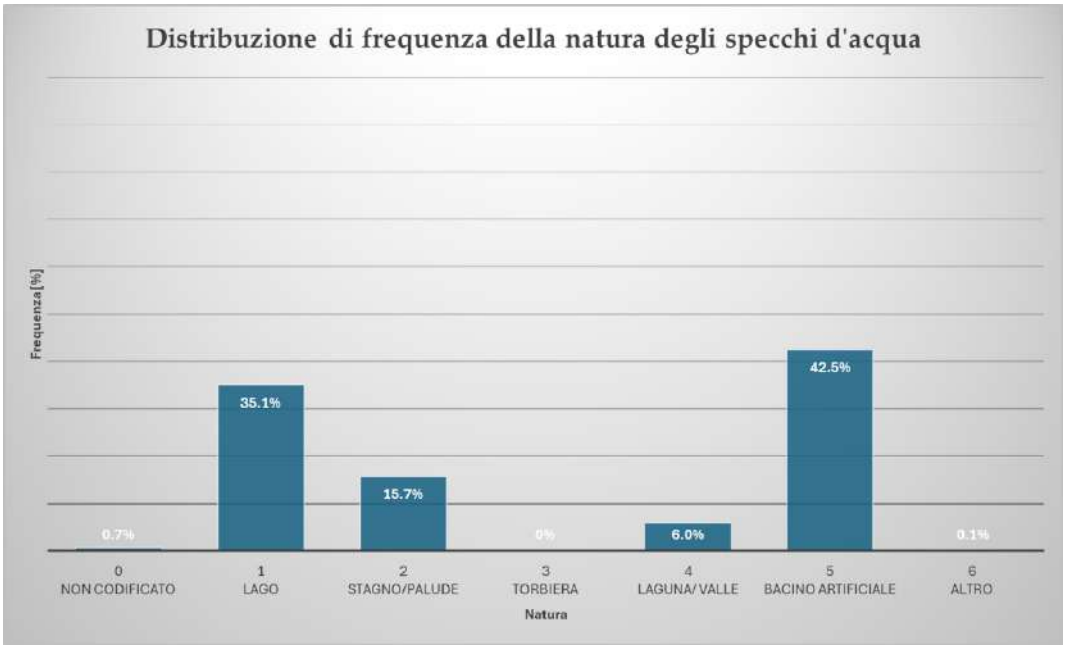



Figura 3.4: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua (DBPrior10k-DBTR E.-R.).

Da questi grafici si può dedurre, quindi, che la classe con il maggior numero di specchi d'acqua è quella con superfici comprese tra 1000 $m^2$ e 1500 $m^2$ e che la maggior parte delle aree selezionate è classificata come "lago" o "bacino artificiale".

# 4 Laghi di cava

I laghi di cava si originano a causa dell'affioramento della falda freatica, in seguito ad attività estrattiva (Ermanno Dolci, 2017). Si tratta di corpi idrici la cui profondità dipende dalla litologia locale e dallo stato di escavazione al momento dell'abbandono, ma che può comunque arrivare a diversi metri. Il perimetro è segnato generalmente da segmenti più o meno rettilinei. Una volta cessata l'attività estrattiva essi vengono spesso abbandonati, per cui un tema di grande interesse è la loro riqualificazione e valorizzazione (Città metropolitana di Milano). In questo modo potrebbero essere sfruttati per molteplici usi, tra cui quello di ospitare impianti fotovoltaici flottanti, la cui installazione potrebbe essere favorita dal fatto che questi corpi idrici non siano già designati ad altri scopi. È per questo che si è deciso di individuare quali, tra gli specchi d'acqua derivanti dall'integrazione del DBPrior10k e il DBTR Emilia-Romagna, siano specchi di cava.

Nel DBPrior10k, infatti, non è presente una categoria che identifichi univocamente questo tipo di corpo idrico; nel DBTR Emilia-Romagna, invece, alcuni elementi sono categorizzati come "cava in falda". La Regione Toscana, inoltre, fornisce la mappa delle cave inattive presenti sul territorio (SIPT: Piano regionale Cave). Andando a selezionare quelle molto prossime agli specchi d'acqua del DBPrior10k, è stato possibile comprendere quali di quei siti inattivi siano divenuti dei laghi di cava. In questo modo sono stati ottenuti 67 nuovi esempi di questa tipologia di corpo idrico.
È per questo che è stato deciso di utilizzare il DBTR e questi siti così individuati sia per determinare delle caratteristiche che permettano di identificare i laghi di cava sia per

localizzare, tramite l'addestramento di un modello, quali siano appunto i laghi di cava nel novero degli specchi d'acqua italiani.

Il metodo adottato è un'applicazione del Machine Learning (ML), ossia una branca dell'intelligenza artificiale il cui scopo è "apprendere" dai dati, dall'ambiente circostante, emulando l'intelligenza umana (Issam El Naqa, Martin J. Murphy, 2015). Il Machine Learning o "apprendimento automatico" consiste nello studio scientifico di algoritmi e dei modelli statistici che i sistemi informatici utilizzano, senza essere esplicitamente programmati, per eseguire un compito specifico. Una volta che un algoritmo "apprende" cosa fare con i dati forniti, infatti, svolgerà il suo compito automaticamente. Il suo scopo è, dunque, quello di "imparare" dai dati e quindi di "insegnare" ai computer a gestirli in maniera più efficiente (Batta Mahesh, 2018).

Tecniche basate sul ML vengono applicate in diversi campi, come l'elaborazione di immagini, il riconoscimento di pattern, l'ingegneria, la finanza o la medicina (Issam El Naqa, Martin J. Murphy, 2015).

Il Machine Learning può essere (Batta Mahesh, 2018):

- supervisionato (Supervised Learning) se inferisce una funzione basandosi su un set di esempi di addestramento input-output, ossia di dati "etichettati";
- non supervisionato (Unsupervised Learning) se non ci sono degli esempi input-output da cui apprendere, quindi l'algoritmo identifica da solo la struttura dei dati, le loro relazioni;
- semi-supervisionato (Semi-supervised learning), una combinazione dei precedenti due tipi, se sono presenti sia dati "etichettati" che "non etichettati".

Nel caso in esame sono stati eseguiti tre passaggi:

- preparazione dei dati;
- addestramento del modello utilizzando la *Classification Learner* app di Matlab, eseguito sul dataset del DBTR Emilia-Romagna;

- predizione dei risultati, eseguita sul dataset contenente la totalità degli specchi d'acqua.

È bene sottolineare che questa analisi è stata eseguita soltanto su una porzione del territorio italiano, ossia quella pianeggiante, per cui sono stati analizzati soltanto gli specchi d'acqua presenti sulle pianure italiane, mostrate in Figura 4.1 (ISPRA).

Figura 4.1: Pianura (ISPRA).

## 4.1. Preparazione dei dati

Per permettere al modello di apprendere quali siano laghi di cava è necessario individuare delle caratteristiche, dei fattori predisponenti che li identifichino e, per farlo, sono stati analizzati gli elementi di tipo "cava in falda" presenti nel DBTR Emilia-Romagna e quelli individuati utilizzando la mappa dei siti inattivi della Regione Toscana. Le caratteristiche più importanti dedotte dall'osservazione di tali elementi sono: la vicinanza di questi laghi a grandi corsi fluviali e grandi infrastrutture, come le autostrade, e la mancanza di una forma ricorrente per cui, per caratterizzarli, è stato calcolato un parametro di forma, dato dal rapporto tra la superficie e il perimetro degli specchi d'acqua. Per quanto attiene alla prossimità alle autostrade, si ricorda a puro titolo di esempio che l'A1-Milano Napoli fu terminata nel 1964 dopo soli 8 anni di lavori. La costruzione richiese grandi quantità di inerti e il percorso, per buona parte adagiato nei fondivalle, facilitò l'approvvigionamento del materiale con l'apertura di numerose cave di prestito nei materassi alluvionali sulle fasce fluviali prossime all'infrastruttura. È noto, inoltre, che i laghi di cava sorgano soltanto in aree con un determinato tipo di litologia locale, per questo è stata utilizzata la carta geologica d'Italia, fornita dal Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica sul Geoportale Nazionale, tramite il servizio WFS.

In questo modo è stato possibile associare a ogni specchio d'acqua del DBTR Emilia-Romagna e a quelli individuati in Toscana le seguenti informazioni:

- parametro di forma;
- distanza dal tratto autostradale più vicino, estrapolato dal DBPrior10k;
- distanza dal corso fluviale principale o secondario più vicino, tratto dal reticolo idrografico italiano fornito, ancora una volta, dal MASE sul Geoportale Nazionale. Non sono stati considerati, quindi, torrenti o elementi idrici minori, poiché solitamente i laghi di cava non si trovano nei loro pressi;
- litotipo presente nella zona in cui sorge il corpo idrico.

La carta geologica, i tratti autostradali e i fiumi principali e secondari sono mostrati in Figura 4.2.

Figura 4.2: Carta geologica (MASE), tratti autostradali (DBPrior10k), fiumi principali e secondari (MASE).

Successivamente, per rendere il dataset di addestramento di più facile lettura per la *Classification Learner* app, si è proceduto ad assegnare:

- dei punteggi da 1 a 5 alle distanze dai tratti di strada autostradali e dai corsi fluviali, secondo i criteri riportati in Tabella 4.1;

Tabella 4.1: Punteggi distanza dal tratto autostradale/fiume principale o secondario più vicino.

| SCORE | DISTANZA DA AUTOSTRADA/ FIUME [m] |
|---|---|
| 1 | > 5000 |
| 2 | ≤ 5000 |
| 3 | ≤ 1000 |
| 4 | ≤ 500 |
| 5 | ≤ 100 |

- l'etichetta *0* ai litotipi non idonei alla presenza di laghi di cava e *1*, invece, a quelli che potrebbero suggerire la presenza di questo tipo di corpo idrico. I litotipi presenti nella carta geologica d'Italia a cui è stata associata l'etichetta *1* sono: argilla, argillite, calcare, conglomerato, evaporite, fillade, marna, materiale non consolidato, materiale sedimentario e roccia detritica;
- l'etichetta *0* agli specchi d'acqua che, nel DBTR, non sono categorizzati come "cava in falda" e l'etichetta *1* a quelli in Emilia-Romagna e Toscana che, invece, lo sono. In questo modo è stato possibile fornire in ingresso un dataset contenente degli esempi di addestramento input-ouput.

## 4.2. Addestramento del modello

Il dataset di addestramento così ottenuto è stato utilizzato nella *ClassificationLearner* app di Matlab, impostando come variabile di risposta le etichette (*1* per i laghi di cava, *0* per gli altri) e come predittori i fattori predisponenti: il parametro di forma, le etichette dei litotipi, i punteggi delle distanze dalle autostrade e dai fiumi principali e

secondari.

La *ClassificationLearner* app esegue addestramenti automatici, usando algoritmi di Machine Learning supervisionati, per classificare i dati con il miglior modello possibile. Il modello addestrato verrà poi utilizzato per fare predizioni su un altro set di dati (MathWorks).

I risultati ottenuti, tuttavia, non erano soddisfacenti poiché a molti laghi di cava veniva associata l'etichetta sbagliata, ossia *0*. La causa della generazione di tanti falsi negativi risiede nel fatto che i laghi di cava sono soltanto il 4.5% circa della totalità di specchi d'acqua e questo fa sì che il modello riscontri problemi nell'individuarli. Una delle soluzioni che si applicano in dataset di questo tipo, con una classe di elementi molto "sbilanciata" rispetto all'altra, consiste nel generare degli elementi "sintetici", che abbiano le caratteristiche da ricercare. In questo modo, quindi, ci saranno più elementi di tipo *1* e il modello sarà più facilitato nell'individuarli. Per farlo è stato implementato il seguente codice in Matlab, in cui è stata utilizzata la funzione "smote" (Synthetic Minority Over-sampling Technique) che, appunto, crea dati di training in più, basandosi su dati reali e su un approccio k-nearest neighbor. In particolare, si considera ogni campione della classe minoritaria e si introducono nuovi elementi lungo i segmenti che congiungono i k vicini più prossimi, come mostrato in Figura 4.3 (Nitesh V. Chawla et al., 2002).

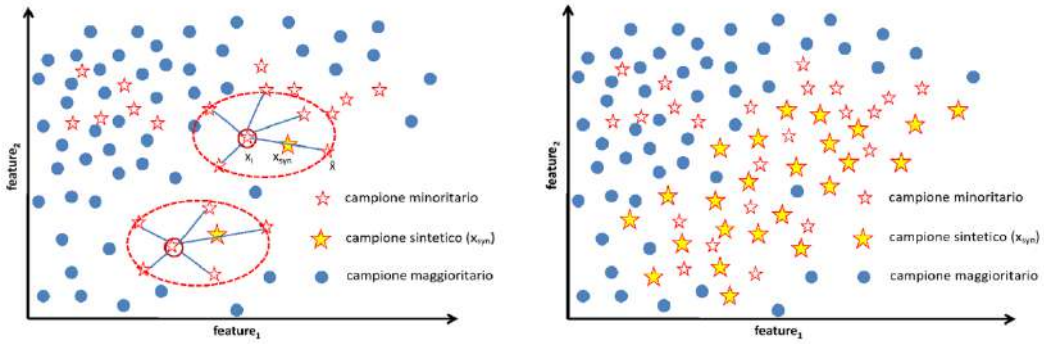



Figura 4.3: Generazione dei dati sintetici.

Fonte: Raghuwanshi, B.S., Shukla, S. Classifying imbalanced data using SMOTE based class specific kernelized ELM. *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.* **12**, 1255–1280 (2021). Tratto il 9 novembre 2024, 20:39 da https://doi.org/10.1007/s13042-020-01232-1. Modificato da Virginia Marini.

Di seguito viene riportata la porzione di codice con cui è stato generato il nuovo dataset di addestramento, successivamente inserito come input nella *Classification Learner* app.

```
%estrazione delle colonne da 'datitrain'
forma=datitrain.indice_forma(datitrain.Label==1);
litotipo=datitrain.Label_litho1(datitrain.Label==1);
dist_A=datitrain.score_dist_A(datitrain.Label==1);
dist_fiumi=datitrain.score_dist_fiumi(datitrain.Label==1);

%generazione valori sintetici
k=5; %numero di nearest neighbors
num=3; %campione aumentato del 300%
[forma_sintetic, ~] = smote(forma, num, k);
[litotipo_sintetic, ~] = smote(litotipo, num, k);
[dist_A_sintetic, ~] = smote(dist_A, num, k);
[dist_fiumi_sintetic, ~] = smote(dist_fiumi, num, k);

%generazione tabella di valori sintetici
N=length(forma_sintetic);
datitrain_sintetic=table(ones(N,1), forma_sintetic, litotipo_sin-
tetic, dist_A_sintetic, dist_fiumi_sintetic, 'VariableNames',
{'Label', 'indice_forma', 'Label_litho1', 'score_dist_A',
'score_dist_fiumi'});
```

```
%generazione nuovo dataset di addestramento
datitrain_new=[datitrain; datitrain_sintetic];

%generazione variabili categoriche
datitrain_new.Label= categorical(datitrain_new.Label);
datitrain_new.Label_litho1= categorical(datitrain_new.Label_li-
tho1);
datitrain_new.score_dist_A= categorical(dati-
train_new.score_dist_A);
datitrain_new.score_dist_fiumi= categorical(dati-
train_new.score_dist_fiumi);
```

Il modello che, tra tutti, restituisce l'accuratezza migliore, pari a 86.4%, è "bagged tree", uno dei classificatori di tipo "ensemble". L'apprendimento d'insieme (ensemble larning) è una tecnica del ML che si basa sulla combinazione di diversi modelli per migliorare la performance predittiva. In particolare, più modelli sono addestrati indipendentemente e poi le loro predizioni sono aggregate in diversi modi possibili, come la media o la maggioranza. Il bagging o bootstrap aggregating è un metodo che prevede l'addestramento di modelli multipli in parallelo e indipendentemente, basandosi su sottoinsiemi di dati scelti casualmente (Abid Ali Awan, 2023).

Va specificato che in dataset sbilanciati solitamente non ci si aspetta un'accuratezza elevata, per cui il valore ottenuto si ritiene soddisfacente.

Due dei metodi di visualizzazione dei risultati della classificazione sono la matrice di confusione e la ROC (Receiver Operating Characteristic) curve e sono riportate rispettivamente in Figura 4.4 e in Figura 4.5.

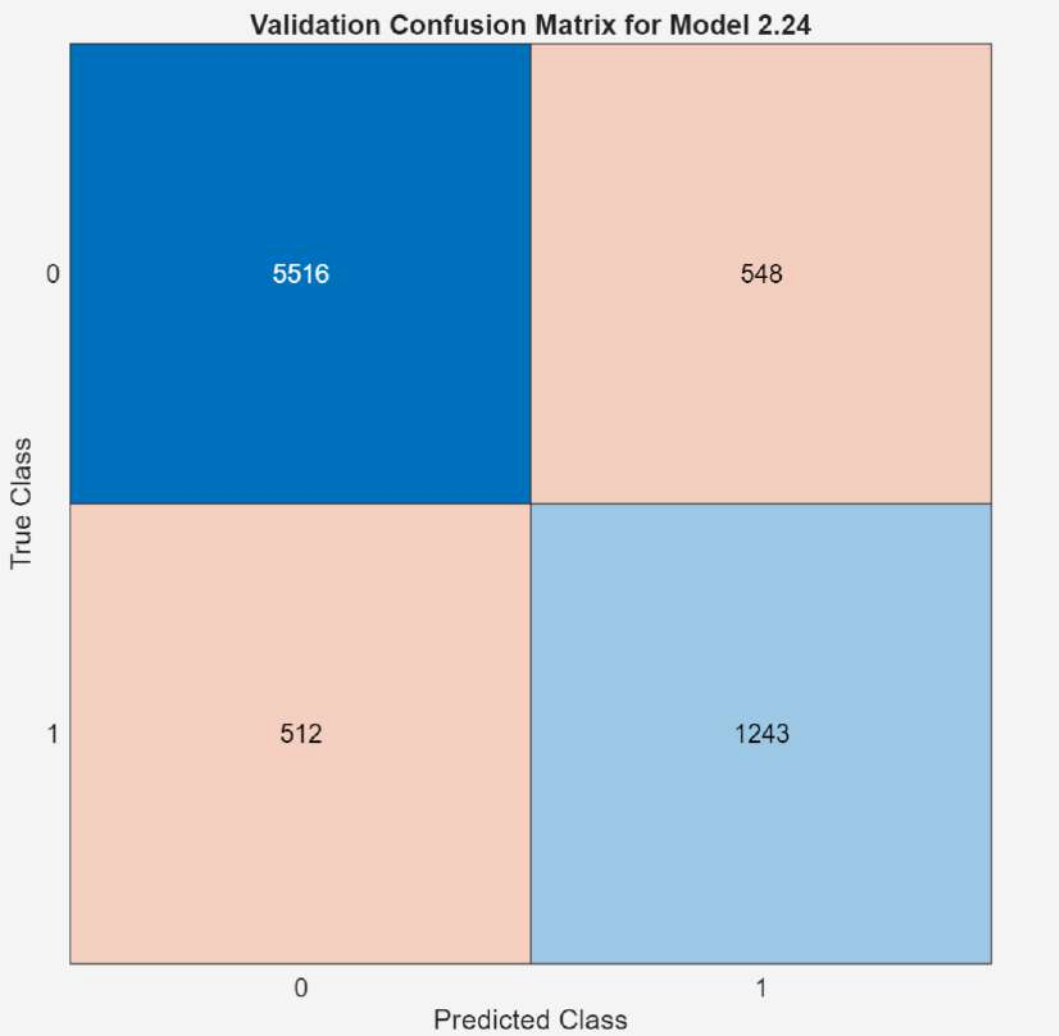



Figura 4.4: Matrice di confusione.

In questo grafico è possibile vedere il numero di osservazioni che sono state correttamente classificate come laghi di cava (“true positive”) e come laghi di altro tipo (“true negative”), oltre al numero di falsi positivi e falsi negativi.

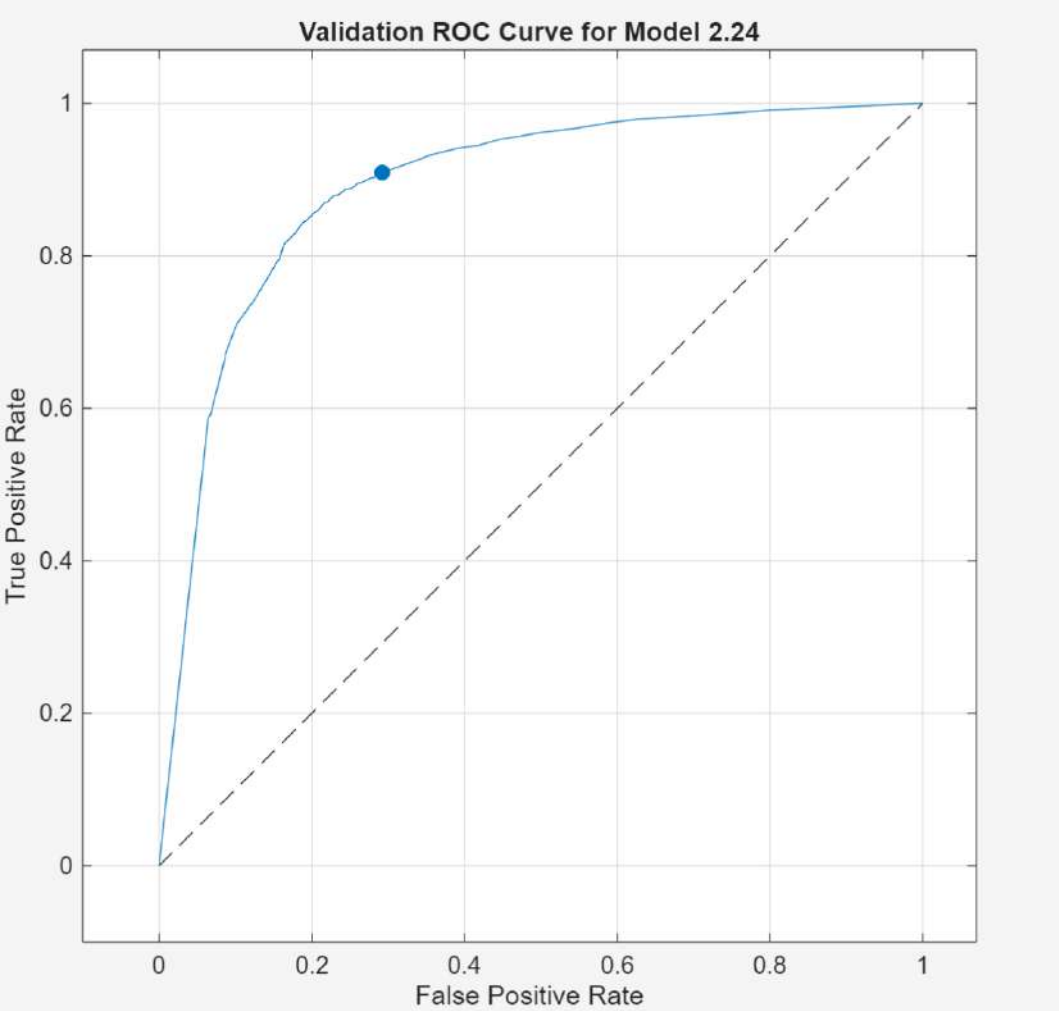



Figura 4.5: ROC curve.

Questa curva mostra la relazione tra il tasso di veri positivi e di falsi positivi: nel caso del punto rappresentato in figura o Model Operating Point, il tasso di veri positivi è pari a 0.9 e quello di falsi negativi a 0.29, quindi si tratta di valori soddisfacenti. Un altro indicatore di qualità è l'AUC (Area Under the Curve), i cui valori sono compresi tra 0 e 1 e a valori maggiori corrispondono prestazioni migliori. Nel caso mostrato in Figura 4.5 l'AUC vale circa 0.89.

## 4.3. Risultati del modello

Il modello addestrato è stato utilizzato per eseguire classificazioni predittive sul data-set costituito dagli specchi d'acqua del DBPrior10k e del DBTR Emilia-Romagna situati

in pianura. I risultati ottenuti, ossia le etichette *1* per i laghi di cava e *0* per i laghi di altro tipo, sono stati associati al dataset di partenza ed è stato quindi possibile comprendere quali e quanti degli specchi d'acqua considerati fossero laghi di cava.
I laghi di cava così individuati sono 2585 e appartengono soprattutto alle categorie 1 (laghi) e 5 (bacini artificiali). Essi sono mostrati in Figura 4.6.

È bene sottolineare che, nel presente studio, continueranno ad essere considerate soltanto le sette categorie presenti nel DBPrior10k, in cui sono stati classificati anche gli specchi d'acqua presenti nel DBTR Emilia-Romagna.

Figura 4.6: Laghi di cava.

# 5 Fattori predisponenti

Al fine di riuscire a selezionare e, successivamente, gerarchizzare quegli specchi d'acqua che si possano ritenere idonei a ospitare impianti fotovoltaici flottanti, nel presente studio sono stati individuati dei fattori predisponenti all'idoneità di un sito.

Tali fattori sono:

- vincoli del sito;
- utilizzo prevalente dello specchio d'acqua;
- radiazione solare;
- vento;
- distanza dalle cabine elettriche;
- accessibilità del sito.

Nel seguito verranno descritte nel dettaglio le loro caratteristiche, le fonti utilizzate e le analisi svolte.

## 5.1. Vincoli del sito

Un sito designato area protetta o sottoposto a vincolo paesaggistico, come analizzato nel capitolo 1, è di certo non idoneo a ospitare un impianto fotovoltaico flottante o, in ogni modo, l'autorizzazione di tale impianto prevederebbe un determinato iter burocratico.

In questo studio, quindi, al fine di determinare quei siti che sarebbero sicuramente idonei, è stato adottato il criterio cautelativo di esclusione degli specchi d'acqua che ricadono all'interno di aree protette.

Il dato contenente la localizzazione e le caratteristiche delle aree protette in Italia è stato ricavato dal WDPA (World Database on Protected Areas).

Il World Database on Protected Areas è il database mondiale più completo delle aree protette terrestri e marine. Si tratta di un progetto congiunto tra UNEP (Programma delle Nazioni Unite per l'Ambiente) e IUCN (Unione Internazionale per la Conservazione della Natura) ed è gestito da UNEP-WCMC (Centro di monitoraggio della conservazione mondiale del Programma ambientale delle Nazioni Unite), in collaborazione con governi, organizzazioni non governative, mondo accademico e industrie.
Il database viene aggiornato mensilmente e, al momento, in Italia conta 3955 aree protette, mostrate in Figura 5.1, per una copertura pari al 21.57% della superficie terrestre nazionale e del 10.6% di quella marina e costiera.

Figura 5.1: Aree protette in Italia (WDPA).

Gli specchi d'acqua che ricadono all'interno oppure intersecano tali aree protette sono 17384 e occupano una superficie complessiva di 2802.6 km$^2$. La distribuzione di

frequenza della natura di queste aree, denominate "specchi d'acqua vincolati", è riportata in Figura 5.2 e rivela che esse ricadono prevalentemente nelle categorie 1, 2, 4 e 5.

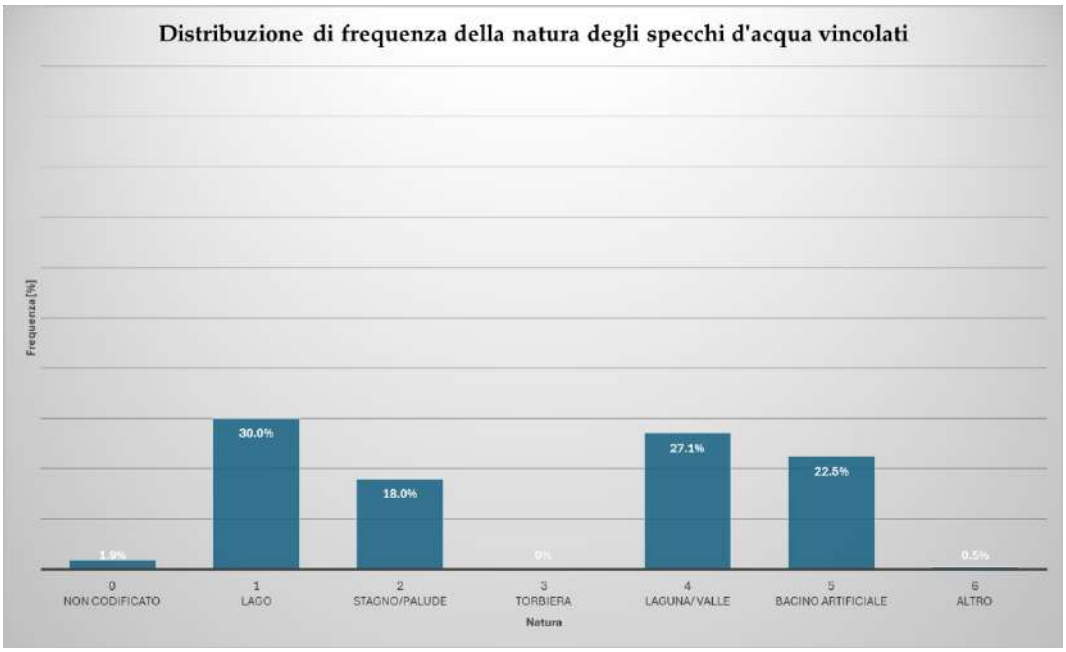



Figura 5.2: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua vincolati (WDPA).

Questi elementi sono stati quindi eliminati dagli 81253 iniziali e ciò ha determinato una perdita in termini di numero di specchi d'acqua pari al 21.4% e una perdita in termini di superficie dell'86.9%. Tale considerevole diminuzione di superficie è spiegata dal fatto che la quasi totalità dei grandi laghi italiani ricade all'interno o al confine di aree protette: il Lago di Garda, ad esempio, è costeggiato da diversi parchi, tra cui il Parco regionale dell'Alto Garda bresciano; il Lago di Bolsena, invece, è un Sito di Interesse Comunitario.

Le analisi successive, quindi, sono state svolte soltanto sugli specchi d'acqua "non vincolati", i quali sono 63869 e occupano una superficie pari a 423.7 $km^2$. Essi sono mostrati in Figura 5.3, insieme alle aree del WDPA e ai soli confini regionali.

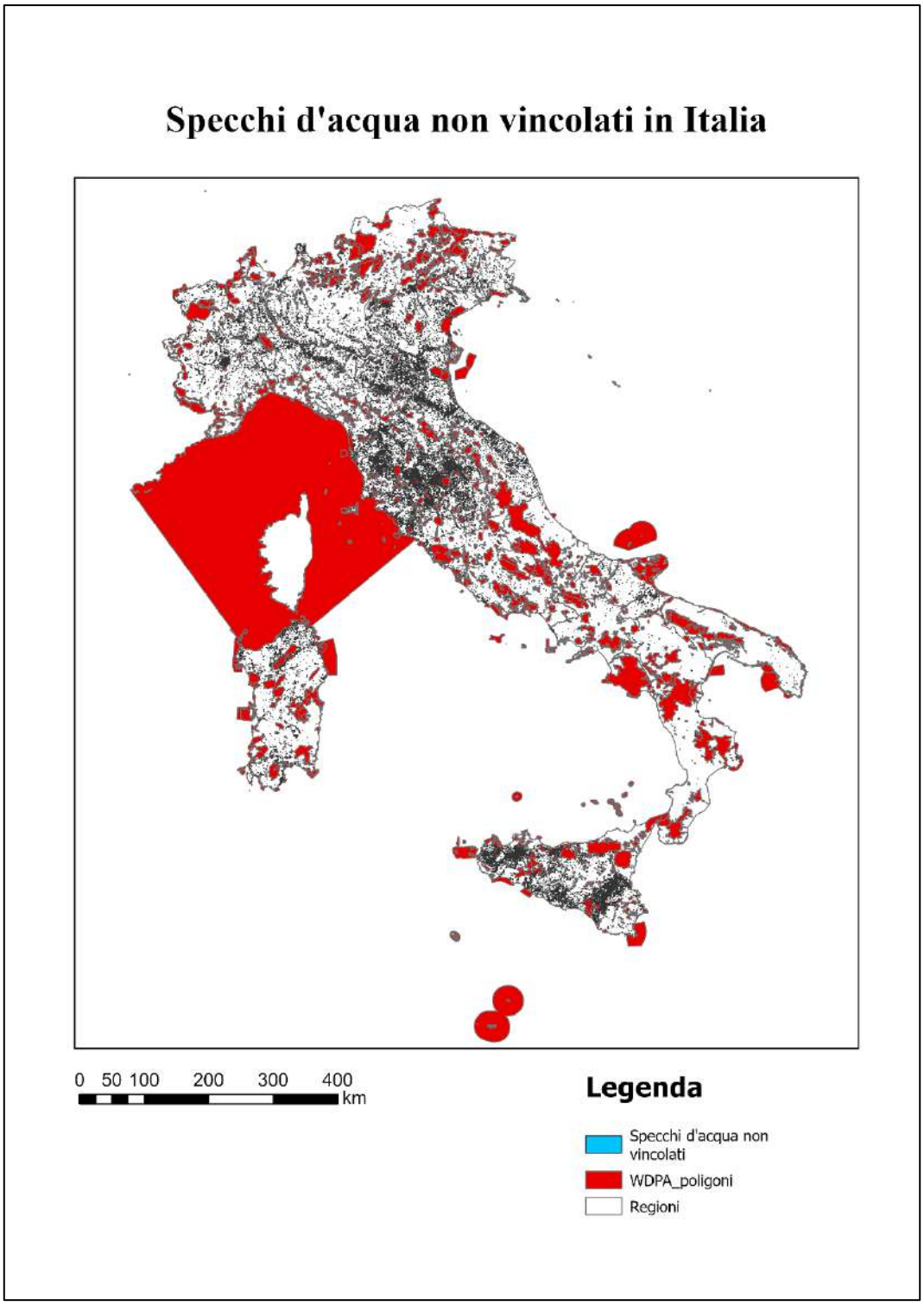



Figura 5.3: Specchi d'acqua non vincolati.

Anche in questo caso sono state ricavate la distribuzione di frequenza della superficie degli specchi d'acqua, mostrata in Figura 5.4 insieme alla cumulata del numero di specchi, e la distribuzione della loro natura, riportata in Figura 5.5.

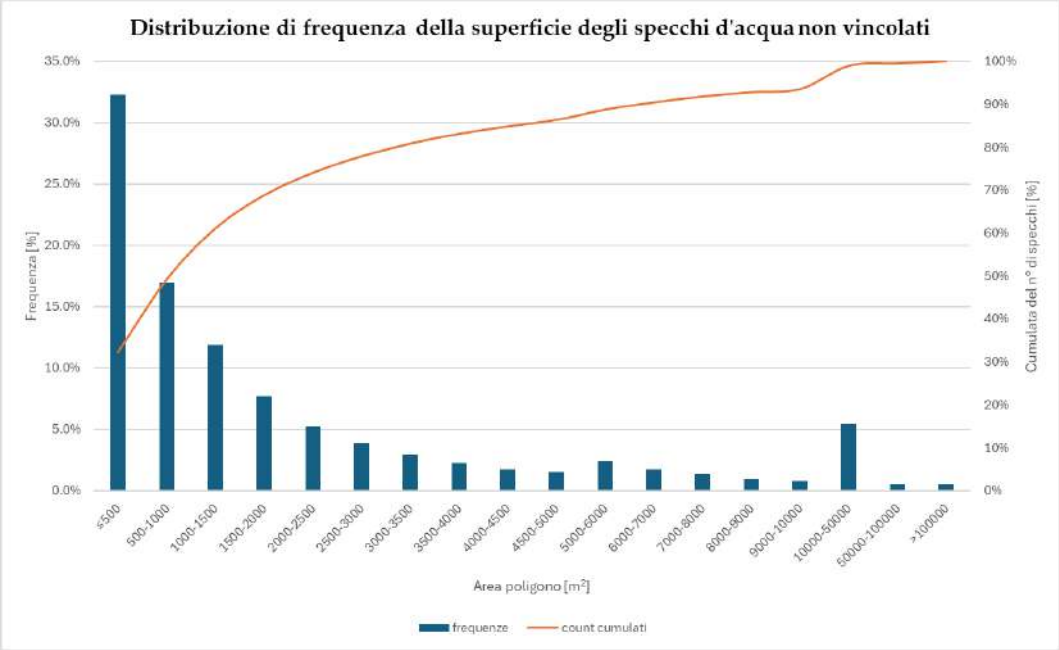



Figura 5.4: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di specchi d'acqua non vincolati (WDPA).

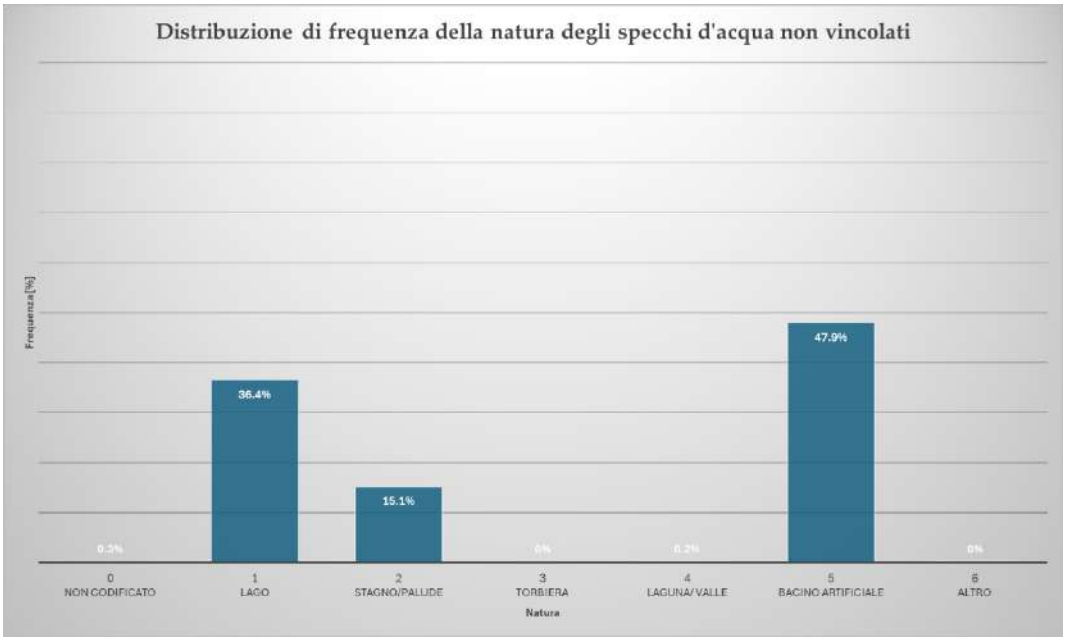



Figura 5.5: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua non vincolati (WDPA).

Quasi un terzo, quindi, degli specchi d'acqua non vincolati ha una superficie inferiore a 500 $m^2$ e quasi la metà è costituita da bacini artificiali.

Le stesse informazioni di Figura 5.5, ma in una rappresentazione più efficace per valutare come gli specchi d'acqua sono suddivisi nelle sette categorie, sono fornite dal grafico a torta di Figura 5.6.

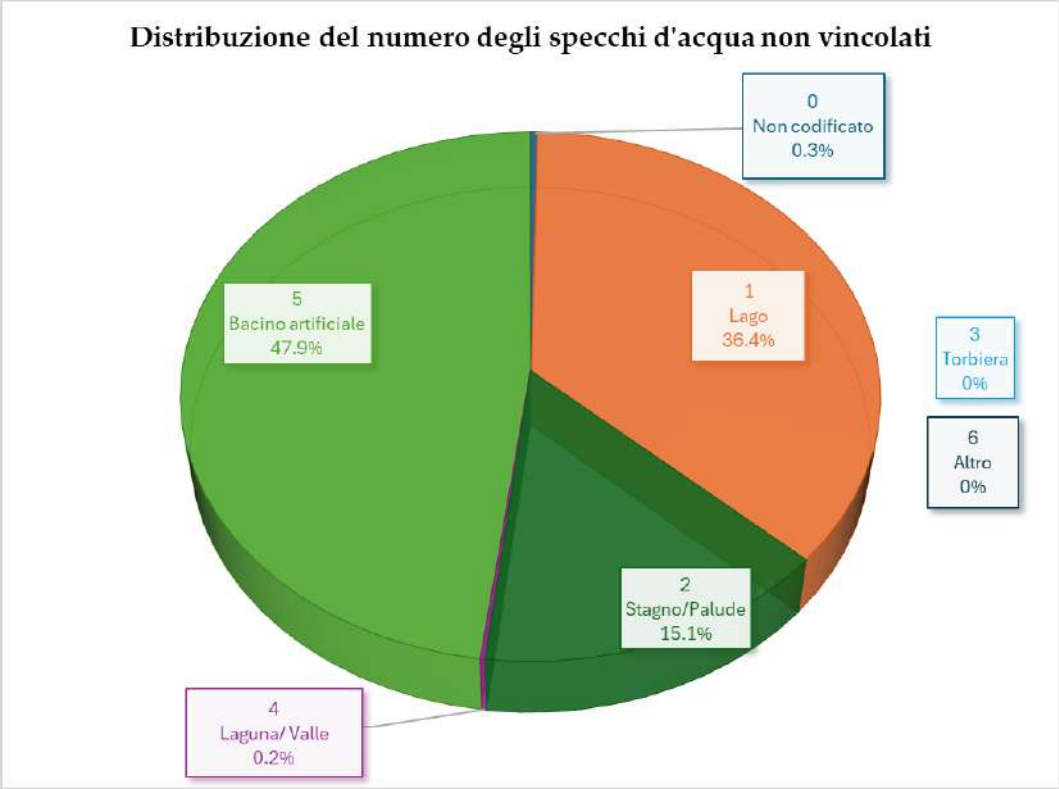



Figura 5.6: Suddivisione degli specchi d'acqua nelle sette categorie in termini di numero.

Per riassumere, in Tabella 5.1 è riportato il numero di specchi presente in ogni categoria nei tre scenari fino a ora considerati, ossia:

- totalità degli specchi (ottenuti dal DBPrior10k e dal DBTR Emilia-Romagna, esclusi i maceri);
- specchi d'acqua vincolati;
- specchi d'acqua non vincolati.

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva del numero di specchi d'acqua nelle sette categorie.

| Natura | Specchi totali | Specchi vincolati | Specchi non vincolati |
|---|---|---|---|
| **0** Non codificato | 554 | 333 | 221 |
| **1** Lago | 28484 | 5218 | 23266 |
| **2** Stagno/ Palude | 12770 | 3127 | 9643 |
| **3** Torbiera | 0 | 0 | 0 |
| **4** Laguna/ Valle | 4841 | 4711 | 130 |
| **5** Bacino artificiale | 34511 | 3911 | 30600 |
| **6** Altro | 93 | 84 | 9 |
| **TOT** | **81253** | **17384** | **63869** |

Tramite il grafico riportato in Figura 5.7, inoltre, è stato possibile ottenere una rappresentazione chiara di come la superficie degli specchi d'acqua sia suddivisa nelle diverse categorie.

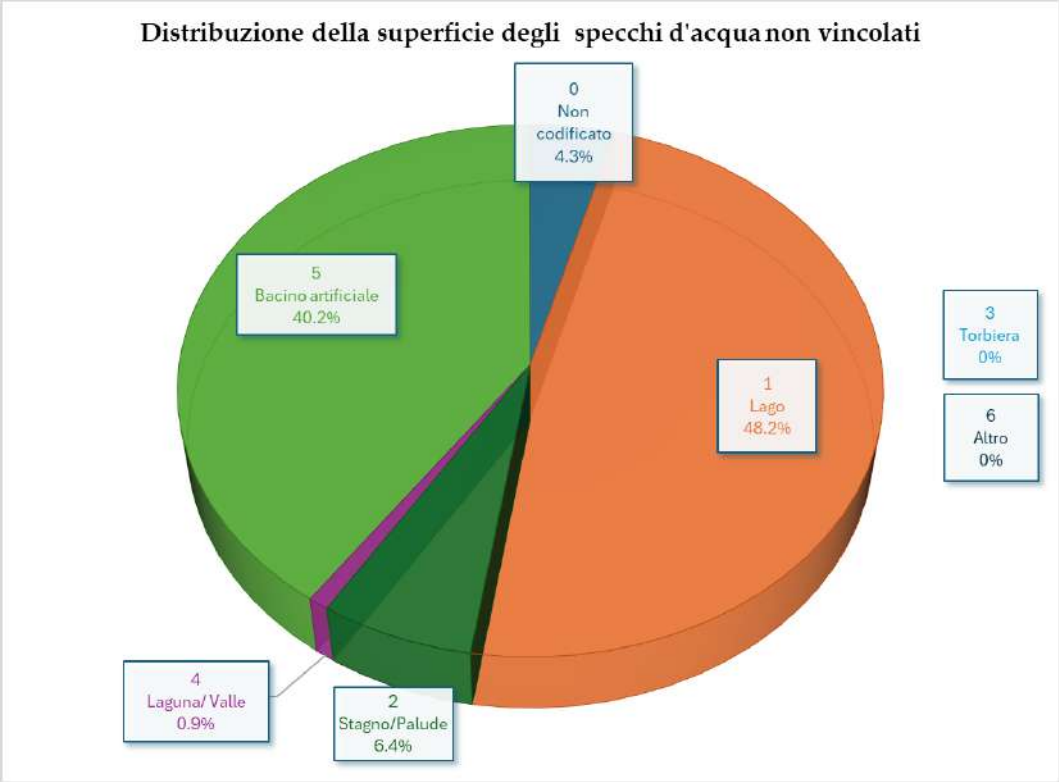



Figura 5.7: Suddivisione degli specchi d'acqua nelle sette categorie in termini di superficie.

Una sintesi chiara, infine, dell'entità, per ogni categoria, del numero di specchi d'acqua, della superficie occupata e della superficie media è riportata in Tabella 5.2.

Tabella 5.2: Suddivisione specchi d'acqua non vincolati e loro superficie nelle sette categorie.

| Natura | n° specchi | Superficie [km$^2$] | Superficie media [km$^2$] |
|---|---|---|---|
| **0** Non codificato | 221 | 18.08 | 0.082 |
| **1** Lago | 23266 | 204.17 | 0.009 |
| **2** Stagno/ Palude | 9643 | 27.29 | 0.003 |
| **3** Torbiera | 0 | 0.00 | 0.000 |
| **4** Laguna/ Valle | 130 | 3.71 | 0.029 |
| **5** Bacino artificiale | 30600 | 170.20 | 0.006 |
| **6** Altro | 9 | 0.20 | 0.023 |

Data la quantità di bacini artificiali, che costituiscono quasi la metà del totale, è stata indagata separatamente anche la loro distribuzione di frequenza in termini di superficie che, invece, rappresenta il 40 % del totale. Dal grafico mostrato in Figura 5.8, si constata che la maggior parte dei bacini artificiali non vincolati ha una superficie inferiore a 2500m$^2$.

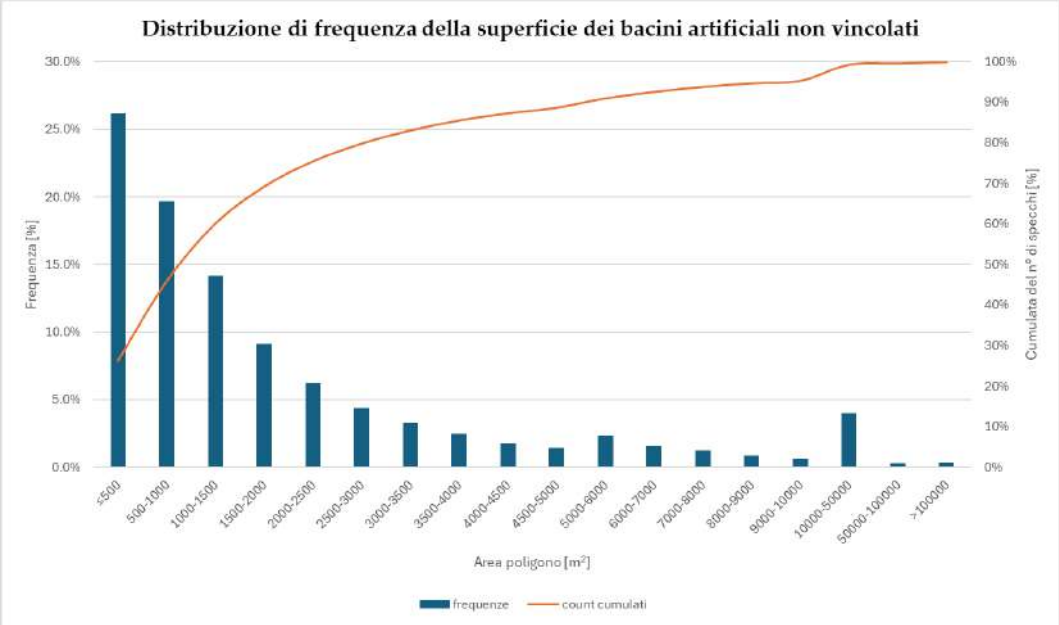



Figura 5.8: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di bacini artificiali non vincolati.

## 5.2. Utilizzo prevalente

Un'informazione rilevante al fine di valutare l'idoneità di uno specchio d'acqua a ospitare un impianto FPV è la sua politica di utilizzo: un'area poco utilizzata, infatti, potrebbe prestarsi a questo tipo di installazione; una già usata per altri scopi, invece, potrebbe essere più o meno adatta, a seconda della "compatibilità" tra l'uso attuale e quello potenziale, ossia la produzione di energia elettrica tramite impianti fotovoltaici flottanti.

Al fine di ricavare l'informazione circa l'uso degli specchi d'acqua è stato utilizzato il database contenente la localizzazione delle grandi dighe presenti in Italia insieme ad alcune informazioni utili, tra cui il loro utilizzo prevalente.

Si definisce grande diga un'opera avente un'altezza superiore a 15 m o capace di trattenere un volume di acqua superiore a 1000000 $m^3$ (Dipartimento della Protezione Civile). In Italia attualmente sono presenti 531 grandi dighe, mostrate in Figura 5.9. Di queste, tuttavia, nel presente studio, sono state considerate soltanto quelle che non si trovassero in zone protette e che non fossero fuori esercizio.
Le dighe selezionate, quindi, sono 310 e sono mostrate in Figura 5.10, in cui per completezza sono riportate anche le dighe "escluse".

Figura 5.9: Grandi dighe.

Figura 5.10: Selezione delle grandi dighe.

Dall'integrazione del dato iniziale, ossia la totalità degli specchi d'acqua in Italia, con le grandi dighe selezionate, è stato possibile non solo capire quali degli specchi d'acqua

fossero anche invasi di grandi dighe, ma anche ottenere l'informazione aggiuntiva circa l'utilizzo prevalente degli specchi d'acqua.

Questo sottoinsieme della totalità degli specchi d'acqua non vincolati, denominato nel seguito "specchi d'acqua-grandi dighe", è costituito da 152 elementi, che occupano una superficie complessiva di 96.6 km$^2$.

Su di esso sono state condotte le medesime analisi statistiche svolte in precedenza e i relativi grafici sono mostrati in Figura 5.11, Figura 5.12 e Figura 5.13.

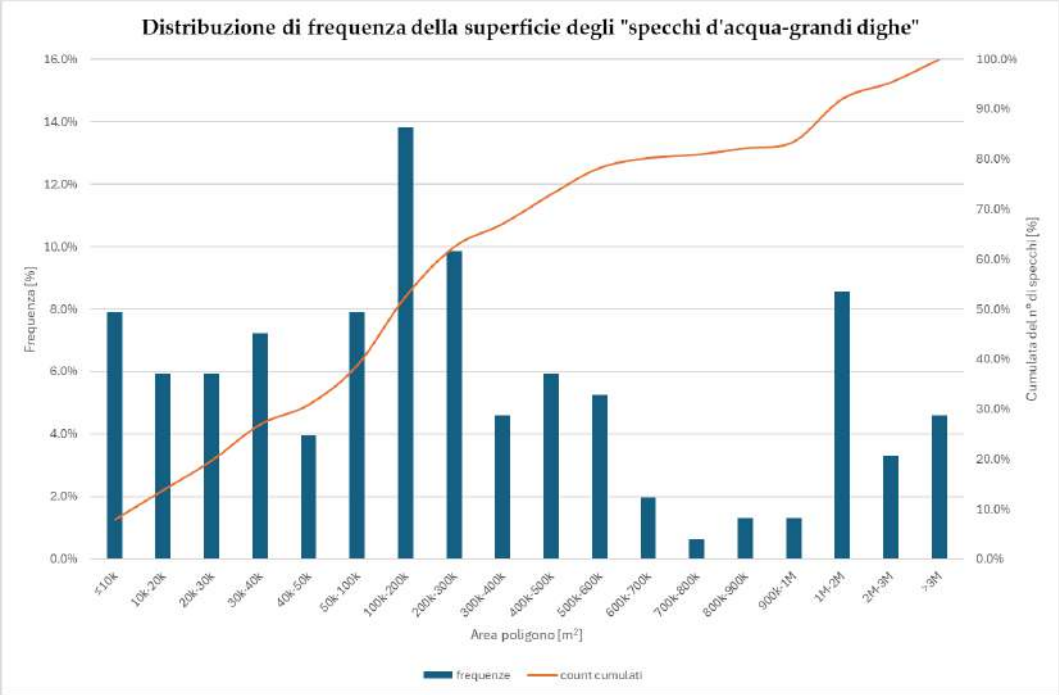



Figura 5.11: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di "specchi d'acqua-grandi dighe".

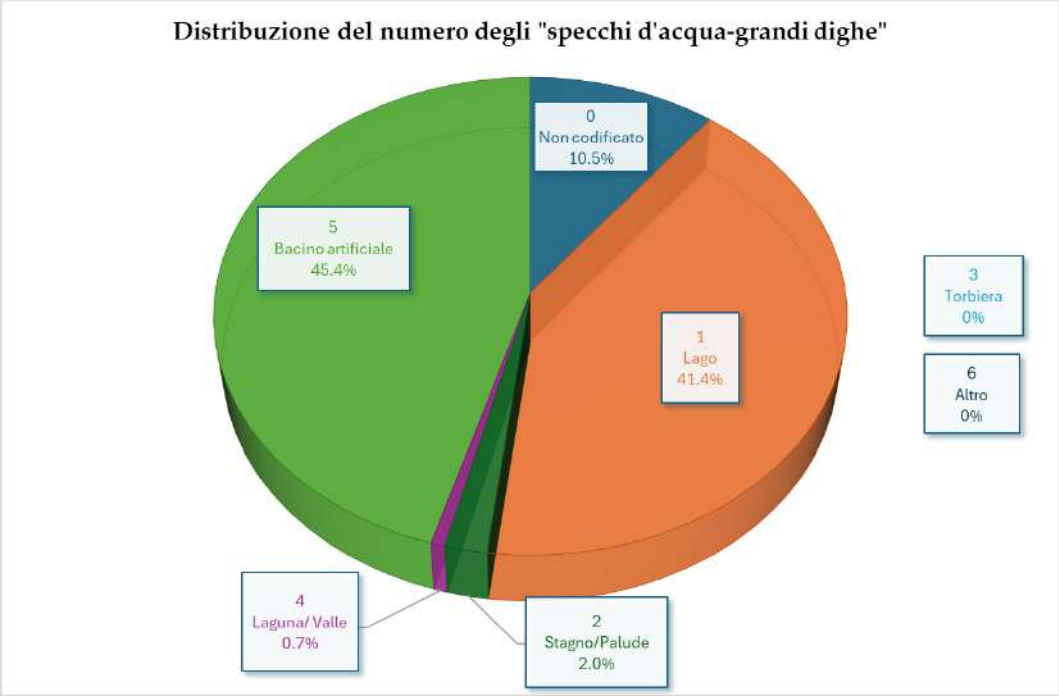



Figura 5.12: Suddivisione degli "specchi d'acqua-grandi dighe" nelle sette categorie in termini di numero.

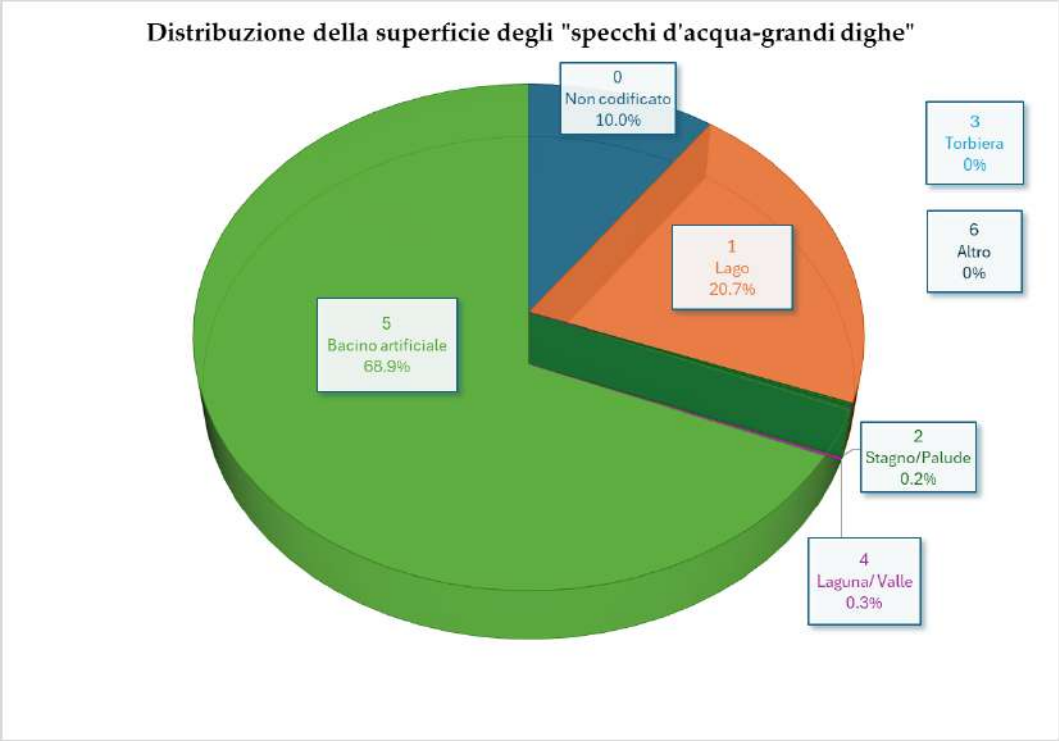



Figura 5.13: Suddivisione degli "specchi d'acqua-grandi dighe" nelle sette categorie in termini di superficie.

Le informazioni più rilevanti che si possono trarre da questi grafici sono:

- la maggioranza degli "specchi d'acqua-grandi dighe" ha una superficie superiore a 10000 $m^2$;
- non si tratta soltanto di bacini artificiali, ma una porzione considerevole è costituita da laghi, come ad esempio il Lago di Trona (SO);
- quasi il 70% della superficie complessiva degli "specchi d'acqua-grandi dighe" è occupata da bacini artificiali.

Anche in questo caso una sintesi chiara dell'entità, per ogni categoria, del numero di "specchi d'acqua-grandi dighe", della superficie occupata e della superficie media è riportata in Tabella 5.3.

Tabella 5.3: Suddivisione "specchi d'acqua-grandi dighe" e loro superficie nelle sette categorie.

| Natura | n° specchi | Superficie [$km^2$] | Superficie media [$km^2$] |
|---|---|---|---|
| **0** Non codificato | 16 | 9.66 | 0.60 |
| **1** Lago | 63 | 20.01 | 0.32 |
| **2** Stagno/ Palude | 3 | 0.17 | 0.06 |
| **3** Torbiera | 0 | 0.00 | 0.00 |
| **4** Laguna/ Valle | 1 | 0.25 | 0.25 |
| **5** Bacino artificiale | 69 | 66.55 | 0.96 |
| **6** Altro | 0 | 0.00 | 0.00 |

Come citato in precedenza, il dato aggiuntivo più rilevante ottenibile da questo sottoinsieme di specchi d'acqua è il loro utilizzo prevalente. I possibili utilizzi sono:

- idroelettrico;
- industriale;

- irriguo;
- laminazione;
- potabile;
- varie;
- nessun utilizzo.

Gli "specchi d'acqua-grandi dighe" che hanno come uso prevalente quello idroelettrico sono 85 e occupano una superficie complessiva pari a 35.6 km². Si tratta di un sottoinsieme di elementi molto importante, visto il grande potenziale dell'accoppiamento fotovoltaico flottante - idroelettrico, già descritto nel paragrafo 1.2. È stata, quindi, studiata separatamente la distribuzione di frequenza delle loro superfici, mostrata in Figura 5.14, utile per capire quali siano le dimensioni più frequenti di questi specchi, ove la predisposizione a produrre energia elettrica è già presente.

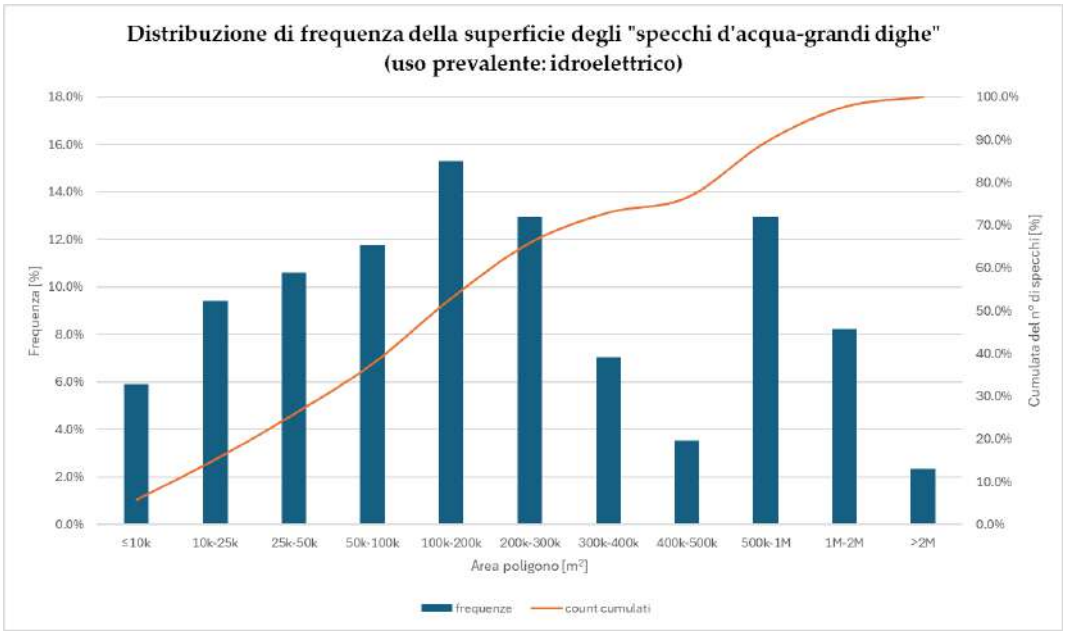



Figura 5.14: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" con uso prevalente idroelettrico.

## 5.3. Radiazione solare

Un altro dei parametri fondamentali per decretare e gerarchizzare l'idoneità di un sito a ospitare un impianto fotovoltaico flottante è la radiazione solare, da cui dipende la quantità di energia elettrica che può essere prodotta.

Con il termine radiazione si fa riferimento al trasporto di energia nello spazio senza il movimento di corpi macroscopici e senza l'uso di mezzi materiali. Il Sole libera grandissime quantità di energia, prodotta dalle incessanti reazioni di fusione termonucleare che avvengono nel suo nucleo, sottoforma di radiazioni elettromagnetiche.
L'intensità di radiazione solare incidente su una superficie di area unitaria si definisce irraggiamento solare [kW/m$^2$]. L'irraggiamento medio o costante solare (misurata sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre) è pari a circa 1367±3% kW/m$^2$.
L'irraggiamento solare in un determinato periodo di tempo è la radiazione solare [kWh/m$^2$] (Massimo Bonini).
La radiazione incidente su una superficie orizzontale è composta da:

- una radiazione diretta, che arriva dal Sole direttamente alla Terra, senza essere perturbata;
- una radiazione diffusa, che arriva sulla superficie terrestre mediante il vapore acqueo o le particelle sospese nell'atmosfera, che diffondono, appunto, la radiazione, rendendola meno potente di quella diretta;
- una radiazione riflessa o albedo, ossia la frazione di radiazione solare che viene riflessa dalla superficie terrestre. L'albedo è un valore compreso tra 0 e 1 e dipende anche dal colore dell'elemento in cui viene riflessa la luce: nel campo della luce visibile, un oggetto bianco ha un'albedo pari a 1 e un oggetto nero a 0 (BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica, 2023).

L'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) mette a disposizione le tabelle della radiazione solare. Esse contengono,

relativamente al periodo 2006-2022 e a 243 località italiane, le medie mensili e annuali dei valori giornalieri di tre tipi di irradiazione:

- irradiazione diretta normale (DNI);
- irradiazione diffusa orizzontale (Diff);
- irradiazione globale orizzontale (GHI), data dalla somma delle componenti diretta e diffusa (ENEA).

Dall'interpolazione dei valori medi annuali, sono state ottenute le mappe di radiazione mostrate in Figura 5.15, Figura 5.16 e Figura 5.17.

Come metodo di interpolazione è stato scelto il kriging poiché particolarmente adatto a dati ambientali o climatologici e poiché le mappe ottenute sono coerenti con quelle fornite da ENEA. Si tratta di un metodo di regressione geostatistico che stima il valore incognito di una variabile come media pesata delle osservazioni; il peso dipende dalla dipendenza spaziale delle osservazioni stesse, descritta dal semivariogramma (Francesco Fiorenzo et al., 2008).

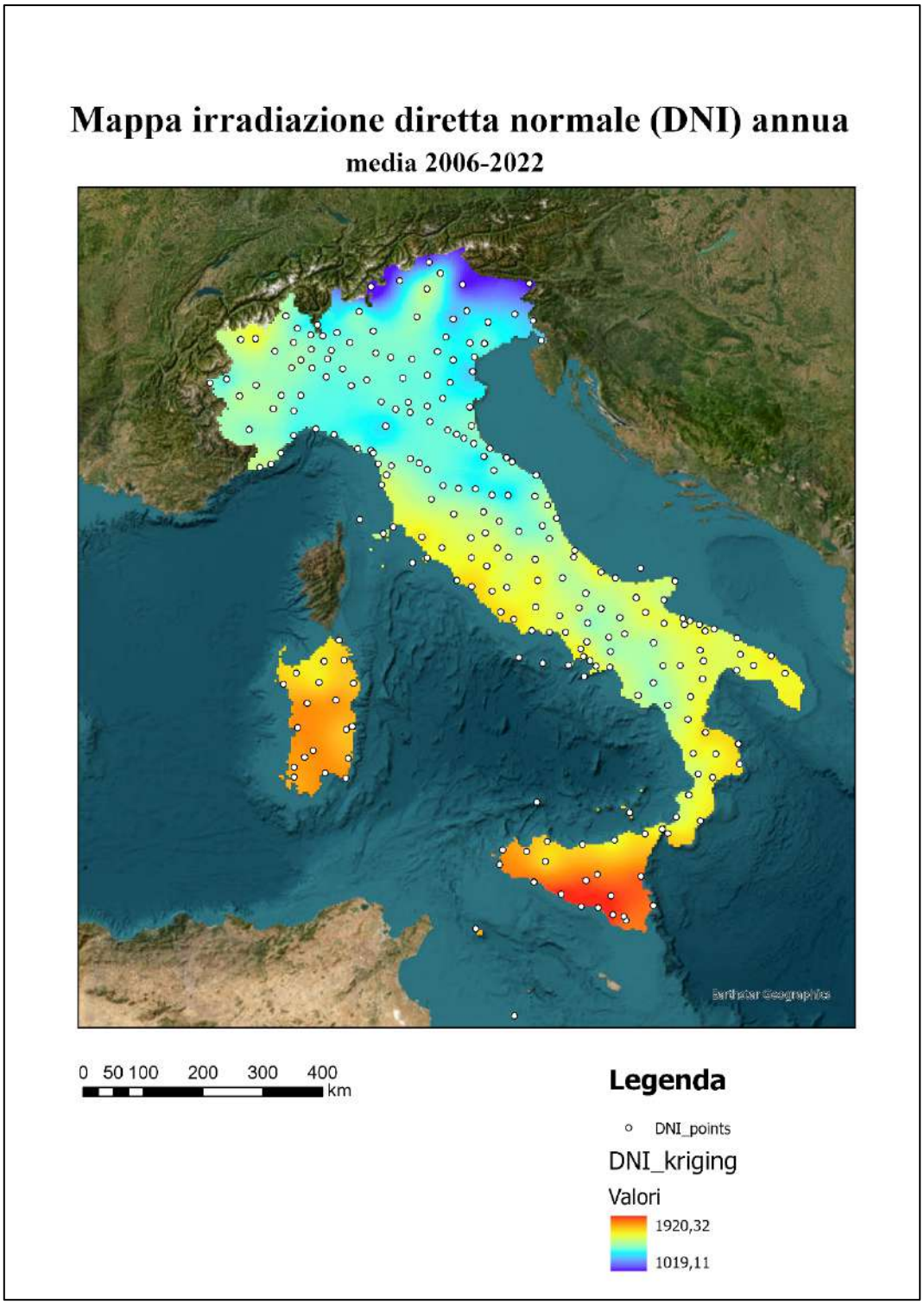



Figura 5.15: Mappa DNI.

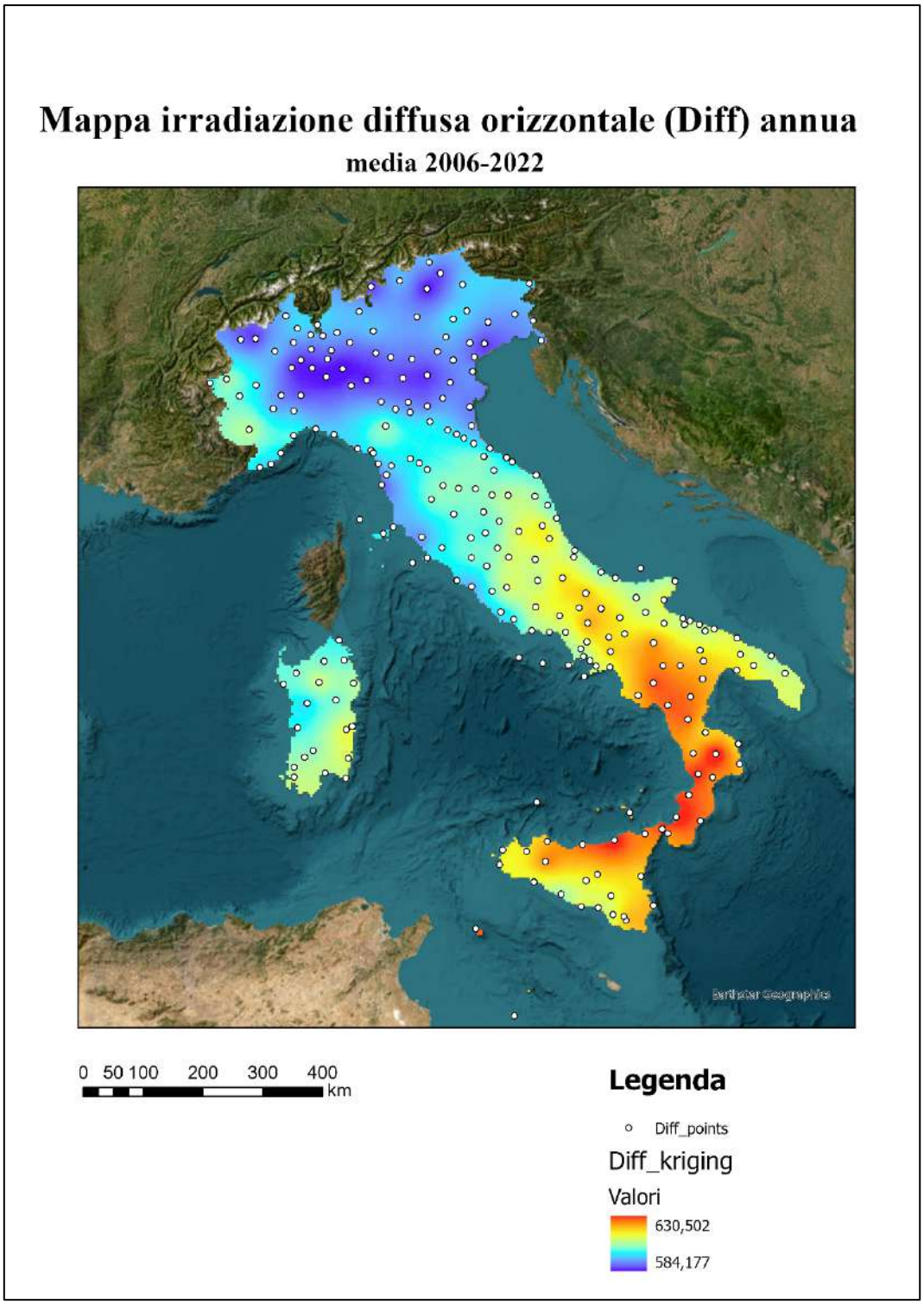



Figura 5.16: Mappa Diff.

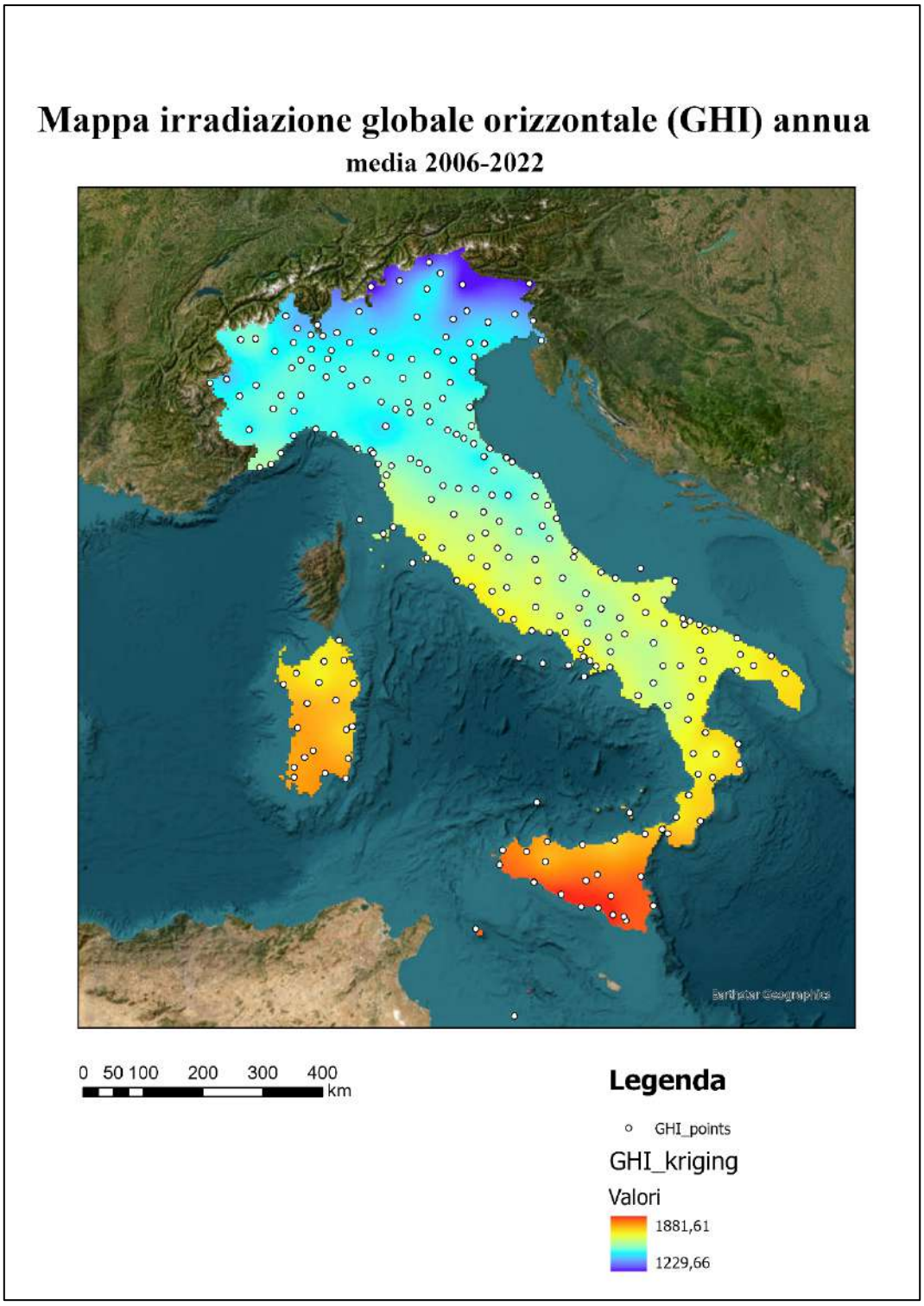



Figura 5.17: Mappa GHI.

## 5.4. Vento

Come citato nel paragrafo 1.2, anche il vento è un fattore predisponente all'idoneità di un sito e, in particolare, è importante che la sua velocità sia inferiore a 30 m/s. È stato, quindi, utilizzato l'Atlante Eolico Italiano (AEOLIAN), in cui i parametri sono rappresentati su una griglia con passo 1.4x1.4 km e, in particolare, sono stati considerati i valori di velocità media annua onshore e offshore del vento, relativa al livello di quota sul livello del terreno/mare di 10 m (RSE).
AEOLIAN è stato sviluppato da una collaborazione tra RSE (Ricerca sul Sistema Energetico) e NCAR (National Center for Atmospheric Research) con lo scopo di supportare la generazione di energia dal vento, per perseguire gli obiettivi di decarbonizzazione e abbattimento delle emissioni di gas serra.

L'Atlante è stato ottenuto dall'uso combinato del modello WRF (Weather Research and Forecasting model), un sistema numerico di previsione meteorologica, e della tecnica statistica AnEn (Analog Ensemble), usata per generare delle previsioni probabilistiche. In particolare, WRF è stato usato per generare output, per il periodo 1990-2019, su una griglia con spaziatura di 4 km e, per il periodo 2015-2019, su una griglia più fitta, con passo di 1.33 km. AnEn è stato utilizzato per "estendere" al periodo 1990-2014 i risultati ad alta risoluzione ottenuti per l'intervallo 2015-2019, in modo da ottenere un dataset esteso su un trentennio e su tutto il territorio italiano e il mare circostante.
È stata inoltre effettuata una verifica utilizzando le osservazioni ottenute in 104 stazioni distribuite omogeneamente sul territorio (Simone Sperati et al., 2023).

## 5.5. Distanza dalle cabine elettriche

Prima di passare all'analisi di questo fattore predisponente è opportuno approfondire le fasi di consegna dell'energia elettrica prodotta da un generico impianto fotovoltaico.

I moduli fotovoltaici producono corrente continua, che viene trasformata in corrente alternata tramite un inverter. Esistono diversi tipi di inverter, tra cui gli inverter centralizzati, che raccolgono potenze elevate (1-4 MW), e gli inverter a stringa che, invece, raccolgono potenze inferiori (150-300 kW).
Gli inverter lavorano in bassa tensione BT (fino a 1 kV) per cui, se è necessario passare alla media tensione MT (1-30 kV), occorre utilizzare un trasformatore.

In seguito si può procedere in due modi: si può immettere l'energia prodotta nella rete di distribuzione, tramite una cabina di consegna (cabina secondaria), oppure, nel caso di grandi impianti, occorre trasformare l'energia elettrica a media tensione in energia ad alta tensione AT (30-150 kV).

Per farlo, bisogna prima passare da una sottostazione elettrica, che raccoglie le linee di MT, e poi attraverso un grande trasformatore, che porta la corrente all'alta tensione.
Infine, tramite una cabina di consegna (cabina primaria), si transita dalla rete di trasmissione a quella di distribuzione (Enel Green Power S.p.A - Communications).

Le cabine primarie hanno una struttura complessa, che comprende diverse componenti, tra cui linee elettriche ad alta tensione, trasformatori di tensione e di corrente e interruttori. Le cabine secondarie, invece, possono essere a torretta, se hanno le linee elettriche visibili, o a box, se le linee elettriche sono in cavo interrato (Capital PV, 2024).

Per valutare l'idoneità di un sito, quindi, è opportuno anche determinare la distanza esistente tra l'impianto fotovoltaico e le cabine elettriche. Dato che le cabine, appunto, possono essere sia primarie che secondarie, occorre anche comprendere quando è necessario che la corrente passi in media o alta tensione e questo dipende, generalmente, dall'area utile per installare i pannelli (Capital PV, 2024).

Le forniture domestiche e di piccole imprese sono generalmente in bassa tensione e viene immessa in rete solo quella parte di energia che non viene autoconsumata. Con il meccanismo dello "scambio sul posto" tale energia può essere utilizzata quando c'è

più richiesta ma meno produzione. Gli scambi tra energia immessa e prelevata vengono misurati tramite un contatore bidirezionale (Enel X Italia S.r.l.).

Per impianti con estensioni comprese tra i 2 e i 12 ettari o per potenze comprese tra i 100kW e i 10 MW, invece, generalmente si usano le cabine secondarie (ARERA, 2017; Capital PV, 2024).

Per impianti, infine, che superano i 12 ettari di superficie o per potenze superiori ai 10 MW si utilizzano le cabine primarie (Capital PV, 2024).

Sono state, quindi, utilizzate queste soglie di dimensione e potenza per determinare il livello di tensione a cui verrebbe portata la corrente prodotta dai potenziali impianti installati sugli specchi d'acqua.

Per quanto riguarda la dimensione, sono stati ipotizzati tre scenari: uno intermedio, in cui si prevede che il potenziale impianto copra il 10% della superficie dello specchio d'acqua, e due "estremi", in cui la copertura è fissata al 5% e al 15%.
Questi valori "estremi" di copertura fanno riferimento alle soglie fissate dal Governo spagnolo nel Regio decreto che regola la concessione dei permessi per installare impianti fotovoltaici flottanti nei bacini idrici pubblici, il cui stato trofico determina la scelta della percentuale di copertura (Pilar Sánchez Molina, 2024).

Per quanto riguarda la potenza, essa è stata ricavata nel seguente modo:

$$P\ [kW] = E/h_{eq} \tag{6.1}$$

in cui $P$ è la potenza nominale o di picco, $E$ è l'energia elettrica totale annua è $h_{eq}$ indica le ore equivalenti, ossia il numero di ore annue in cui un impianto genera ipoteticamente elettricità alla potenza di picco (EdilTecnico, Redazione tecnica, 2023). Il numero di ore equivalenti varia in Italia a seconda della zona, ma un valore medio si attesta a circa 1170 ore equivalenti (GSE, 2019).
L'energia elettrica totale annua si calcola in questo modo:

$$E\ [kWh] = A \cdot r \cdot H \cdot PR \tag{6.2}$$

in cui $A$ è la superficie occupata dai moduli fotovoltaici [m²], $r$ è il rendimento dei moduli stessi, $H$ è la radiazione solare media annua [kWh/m²] e $PR$ (Performance Ratio) è una costante che tiene conto delle diverse perdite energetiche che possono verificarsi e solitamente viene posto pari a 0.75 (Saur News Bureau, 2016).

Per quanto riguarda i valori di $H$, sono stati utilizzati quelli ricavati dalla mappa di irradiazione globale orizzontale (GHI) annua, mostrata in Figura 5.17; per quanto concerne, invece, i valori di $A$ e $r$, sono stati considerati i tre scenari mostrati in Tabella 5.4.

Tabella 5.4: Scenari considerati per il calcolo di $E$.

| SCENARIO | $A$ | $r$ |
|---|---|---|
| "Worst" | copertura pari al 5% | 16.5% |
| "Intermediate" | copertura pari al 10% | 20.2% |
| "Best" | copertura pari al 15% | 24% |

Tali valori di rendimento sono stati ricavati considerando che i pannelli fotovoltaici flottanti hanno un rendimento superiore del 10% rispetto ai pannelli fotovoltaici "tradizionali", il cui valore di $r$ varia tra il 15% e il 22% (Young-Kwan Choi et al., 2013; Roberta Nicora, 2024).

Noti i valori di dimensione e potenza dei potenziali impianti, nei diversi scenari, sono stati assegnati i livelli di tensione a cui verrebbe erogata la corrente elettrica generata, tramite il seguente codice, in cui vengono prese come riferimento le soglie prima citate.

```
def calcola_tensione (area, potenza):
    # area in [m^2], potenza in [kW]
    if area<=20000 or potenza<=100:
        return "BT"
    elif (20000<area<=120000) or (100<potenza<=10000):
        return "MT"
    elif area>120000 or potenza>10000:
        return "AT"
    else:
        return "NA"
```

Conseguentemente, è stata valutata l'idoneità dei siti a ospitare impianti fotovoltaici flottanti andando a determinare la distanza geodetica esistente tra i siti stessi, e quindi i potenziali impianti, e la cabina elettrica necessaria.

I dati riguardanti la localizzazione delle cabine elettriche sono sensibili, per cui non vengono diffusi. È stato possibile, però, estrapolare dall'Atlante Eolico dell'Italia (AEOLIAN) il dato della distanza tra il centroide di ogni cella della griglia e la cabina primaria più vicina. Per quanto riguarda le cabine secondarie, invece, non si hanno a disposizione dati, ma è noto che esse siano molto diffuse sul territorio, soprattutto in zone ad alta utenza. Di conseguenza, è stato assunto che in una zona abitata ci sia sicuramente almeno una cabina secondaria e quindi è stato deciso di utilizzare i dati Istat, aggiornati al 2021, delle località italiane. Queste località sono di quattro tipi (Istat, 2015):

1. centro abitato;
2. nucleo abitato;
3. località produttiva;
4. case sparse.

A causa dell'assunzione fatta e per fini conservativi, nel calcolo delle distanze tra specchi d'acqua e località non sono state considerate le case sparse, essendo zone piuttosto estese e non densamente abitate. Le località italiane prese in considerazione, di tipo 1, 2 e 3, sono mostrate in Figura 5.18, insieme ai soli confini regionali.

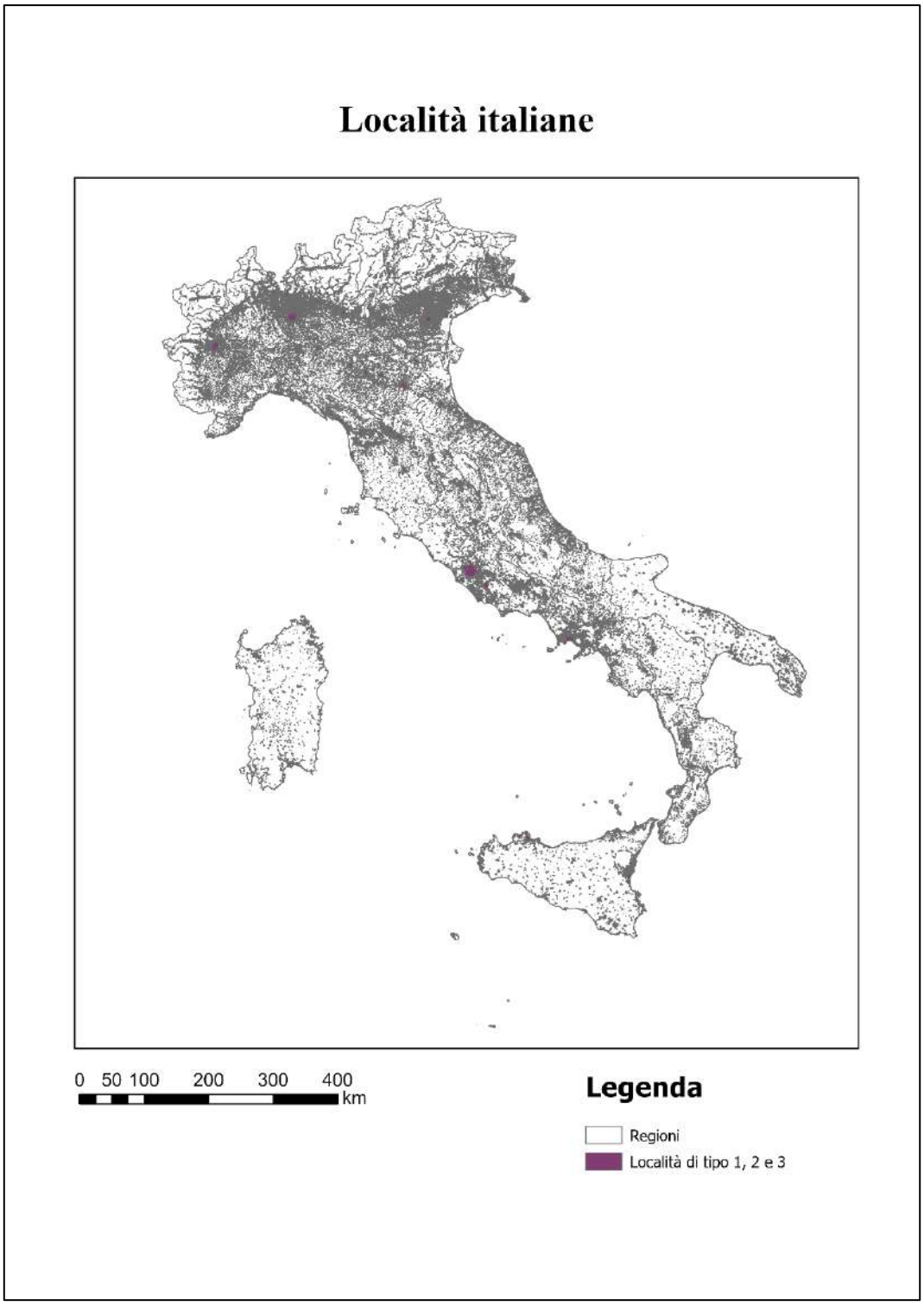



Figura 5.18: Località italiane di tipo 1, 2 e 3 (Istat).

## 5.6. Accessibilità del sito

Al fine di installare un impianto fotovoltaico flottante su uno specchio d'acqua è necessario che tale sito sia accessibile dai mezzi preposti e quindi che ci sia un tratto di strada nell'intorno del sito stesso. Le informazioni e la localizzazione dei tratti di strada presenti sul territorio italiano sono, come già accennato nel paragrafo 3.1, fornite nel DBPrior10k, che riporta 482173 tratti stradali. Essi sono mostrati in Figura 5.19, ove è possibile vedere anche la loro classificazione, eseguita sulla base della Tabella 3.3.

Per valutare effettivamente l'accessibilità dei siti, è stata calcolata la distanza geodetica tra il perimetro di ogni specchio d'acqua e ogni "specchio d'acqua-grande diga" e il tratto di strada più vicino. Dei tratti di strada autostradali, però, sono stati selezionati soltanto quelli che fossero nelle vicinanze di un casello autostradale (intersezione stradale di categoria 3, come mostrato in Tabella 3.2). Se un sito dovesse avere come tratto di strada più vicino un tratto autostradale, infatti, potrebbe essere considerato accessibile soltanto se quest'ultimo si trovasse in prossimità di un casello.

In particolare, sono stati considerati solo quei tratti autostradali che fossero all'interno di una zona buffer di 500 m costruita attorno a ogni casello. A titolo di esempio, in Figura 5.20 viene mostrato un tratto di A14 selezionato poiché interno al buffer.

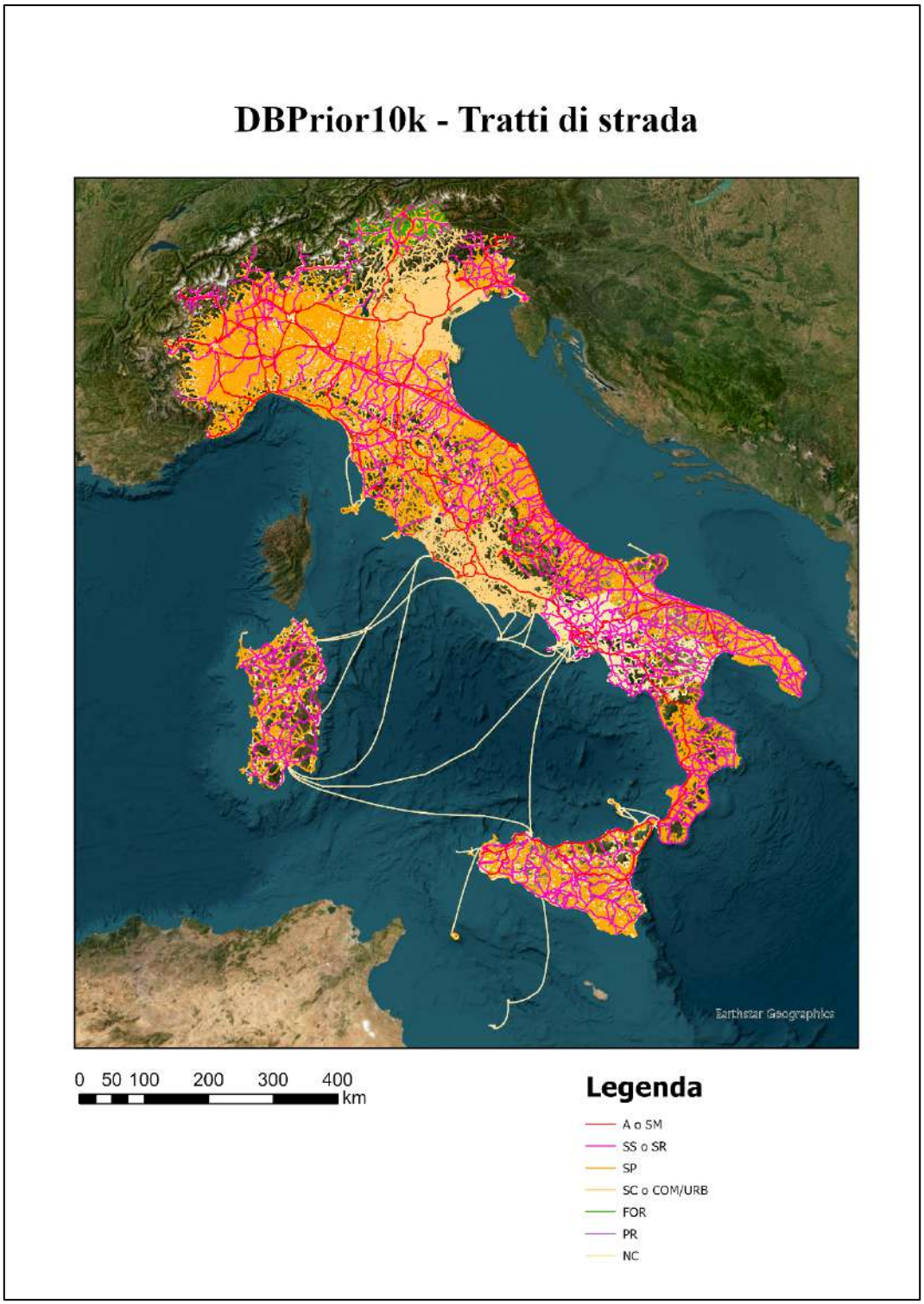



Figura 5.19: Tratti di strada (DBPrior10k).

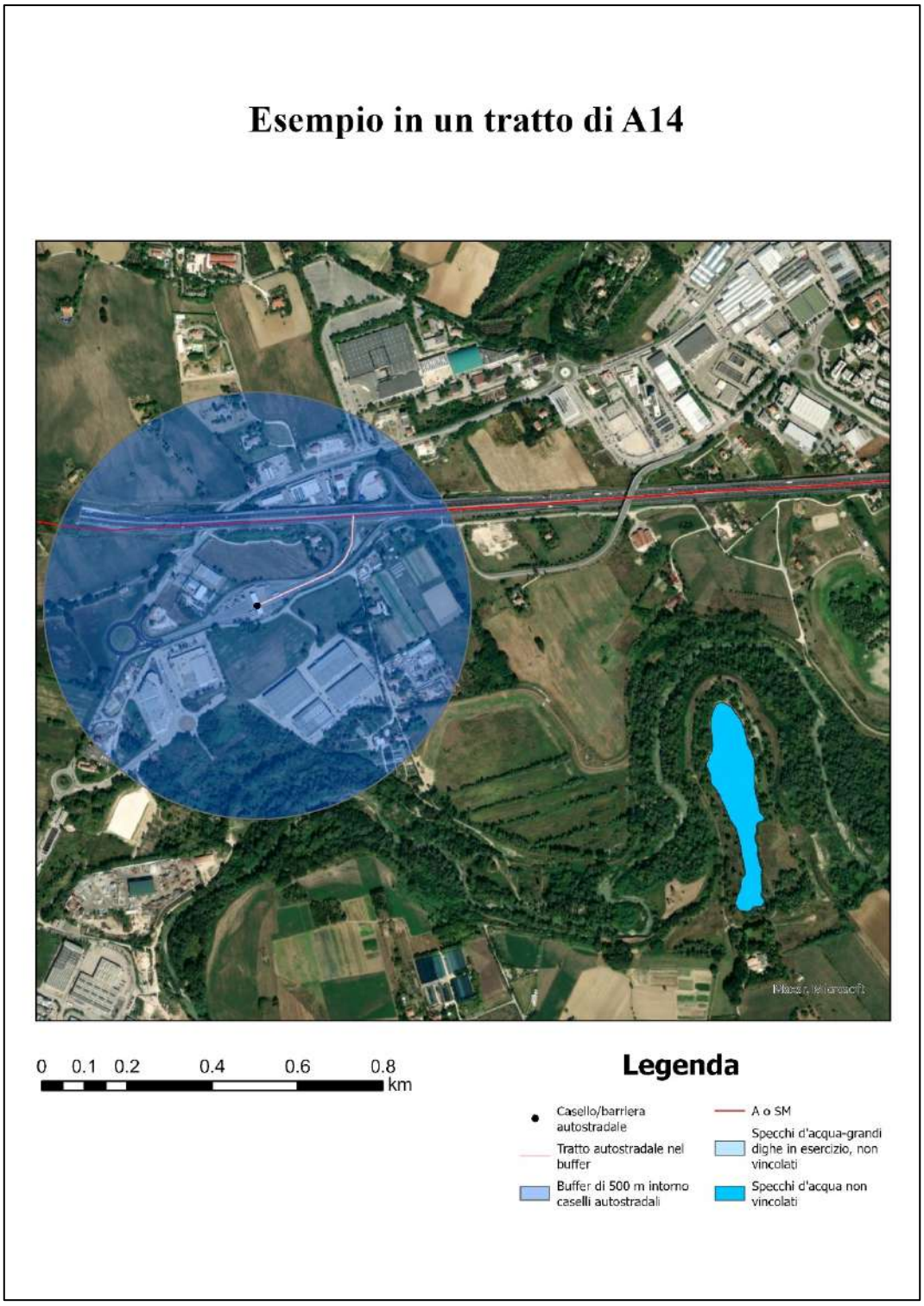



Figura 5.20: Esempio di selezione di tratto autostradale interno al buffer.

# 6 Assegnazione dei punteggi

La fase successiva alla definizione dei fattori predisponenti all'idoneità di un sito e alla selezione degli specchi d'acqua è stata la gerarchizzazione degli stessi, tramite l'assegnazione di punteggi, denominati "scores". L'obiettivo, infatti, era ottenere una "scala di idoneità" dei siti considerati, in modo tale da capire dove sia più conveniente installare un impianto e l'area utile eventualmente a disposizione.

La scala, per ogni fattore predisponente considerato, va da 1 a 5, valutando con 1 un sito meno idoneo a ospitare impianti fotovoltaici flottanti e con 5, invece, una situazione "ideale".

I metodi utilizzati e i criteri scelti per l'assegnazione degli scores verranno di seguito descritti.

## 6.1. Utilizzo prevalente

È stato possibile assegnare il punteggio sull'utilizzo prevalente, come già spiegato nel paragrafo 5.2, soltanto al sottoinsieme di elementi denominato "specchi d'acqua-grandi dighe", poiché l'informazione circa l'utilizzo degli invasi è stata ricavata dal database delle grandi dighe italiane. A questa informazione è stato direttamente associato un punteggio, come mostrato in Tabella 6.1: ai bacini idroelettrici è stato naturalmente assegnato il punteggio massimo, poiché dispongono già delle infrastrutture utili alla produzione e distribuzione di energia e poiché la creazione di un sistema ibrido "FPV-idroelettrico" aumenterebbe l'efficienza di entrambi i sistemi singoli. Le motivazioni che, invece, hanno determinato l'assegnazione degli altri punteggi sono:

- un bacino usato a scopo potabile appare il meno idoneo alla coesistenza con altri impianti, viste la priorità di questo utilizzo e l'attività di monitoraggio cui l'acqua viene sottoposta;
- invasi usati come vasche di laminazione o a scopi irrigui sono ancora poco adatti a ospitare impianti FPV a causa delle escursioni del livello che si verificano periodicamente, spesso considerevoli;
- ai bacini con utilizzo "vario" o non utilizzati si è deciso di assegnare un punteggio intermedio, ma l'effettiva idoneità andrà analizzata caso per caso;
- alle dighe a uso industriale è stato assegnato un punteggio pari a 4 poiché spesso sono già connesse alla rete elettrica e, in alcuni casi, sono sfruttate proprio per produrre energia elettrica.

Tabella 6.1: Punteggi utilizzo prevalente.

| SCORE | USO PREVALENTE |
|---|---|
| 1 | Potabile |
| 2 | Laminazione |
| | Irriguo |
| 3 | Varie |
| | Nessun utilizzo |
| 4 | Industriale |
| 5 | Idroelettrico |

## 6.2. Radiazione solare

In questo caso, e in tutti quelli analizzati nel seguito, è stato possibile assegnare un punteggio sia al sottoinsieme "specchi d'acqua-grandi dighe" che all'insieme dei dati di riferimento, costituito dagli specchi d'acqua del DBPrior10k e del DBTR Emilia-Romagna (esclusi i maceri) non vincolati.

Avendo creato le mappe dei tre tipi di radiazione, è stato possibile associare i valori di DNI, GHI e Diff ai vari specchi d'acqua: in particolare, a ogni specchio è stato assegnato il valore di radiazione della cella in cui si trova il centroide dello specchio stesso. Come riportato in Figura 6.1, Figura 6.2 e Figura 6.3 per gli specchi d'acqua e in Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6 per gli "specchi d'acqua-grandi dighe", è stato quindi possibile trovare quali fossero il numero e la superficie degli specchi disponibili per ogni intervallo di radiazione.

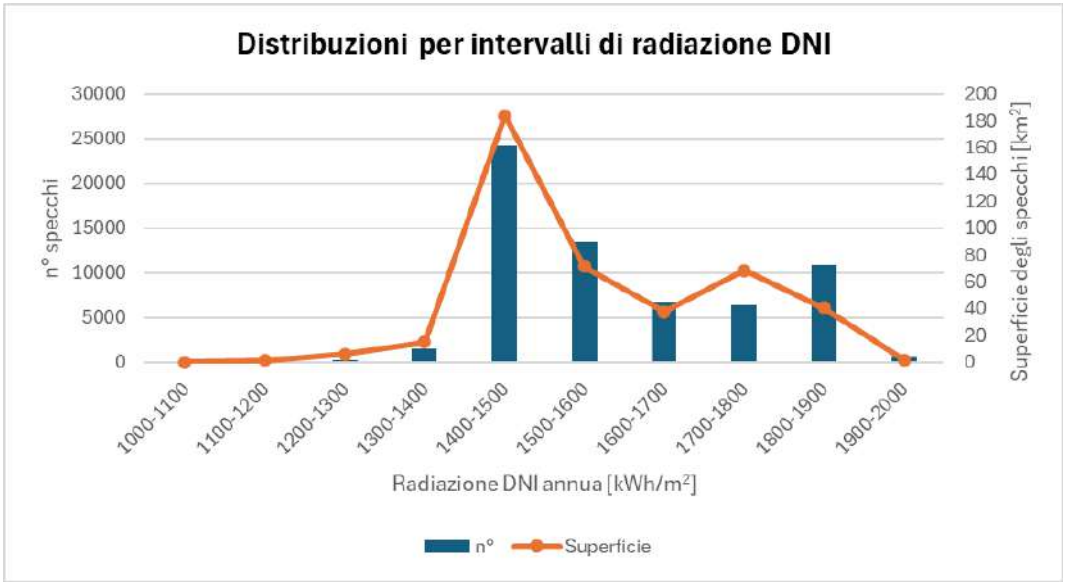



Figura 6.1: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione DNI.

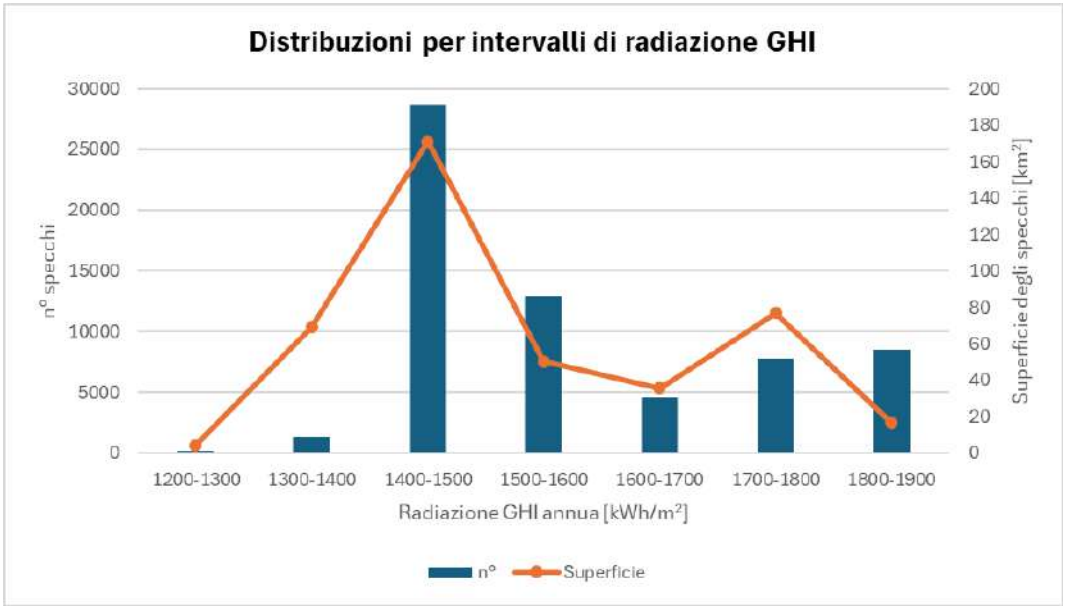



Figura 6.2: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione GHI.

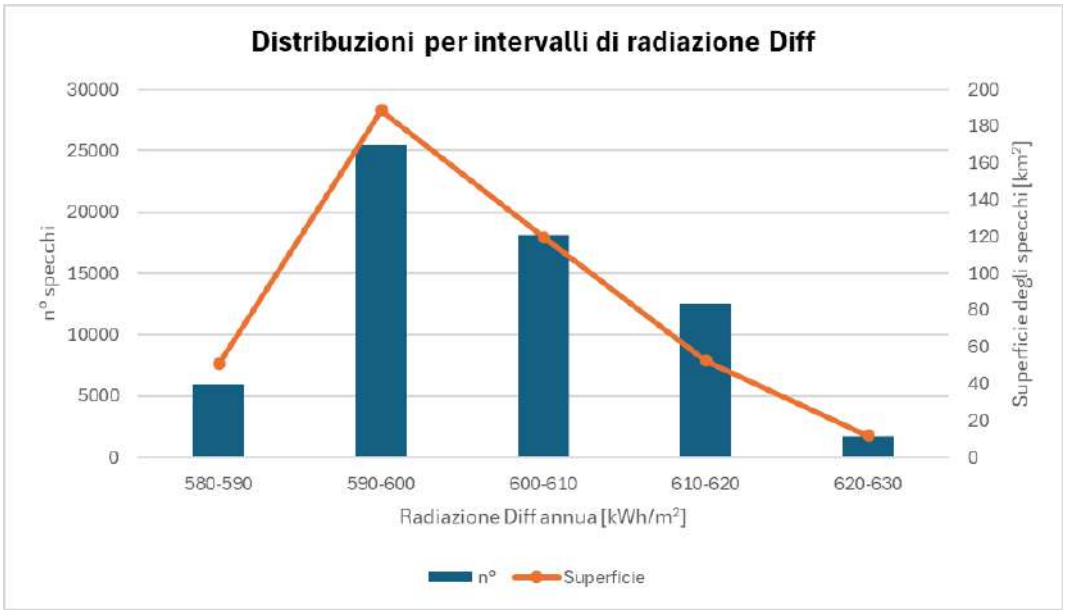



Figura 6.3: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione Diff.

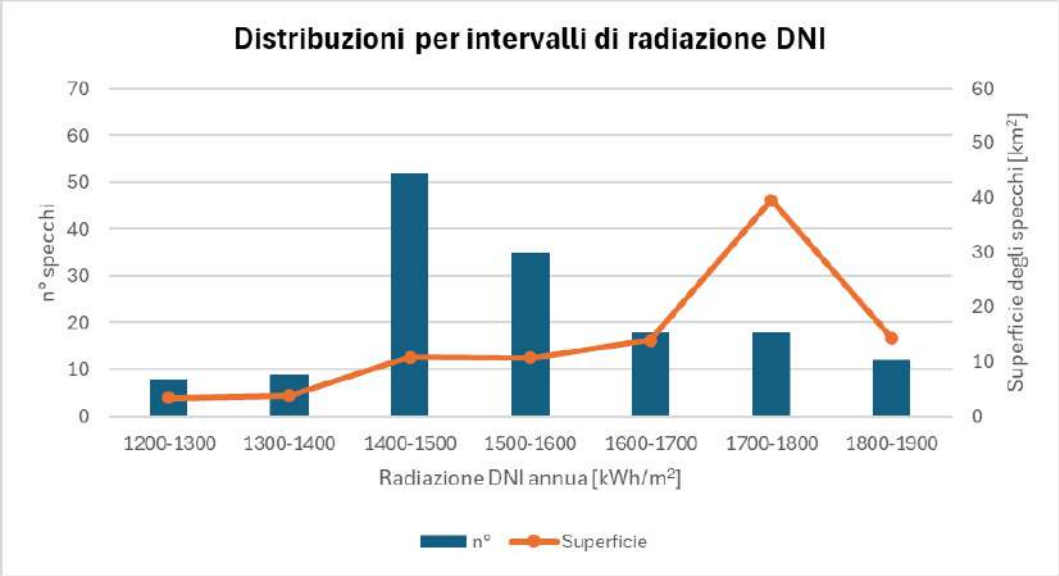



Figura 6.4: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione DNI.

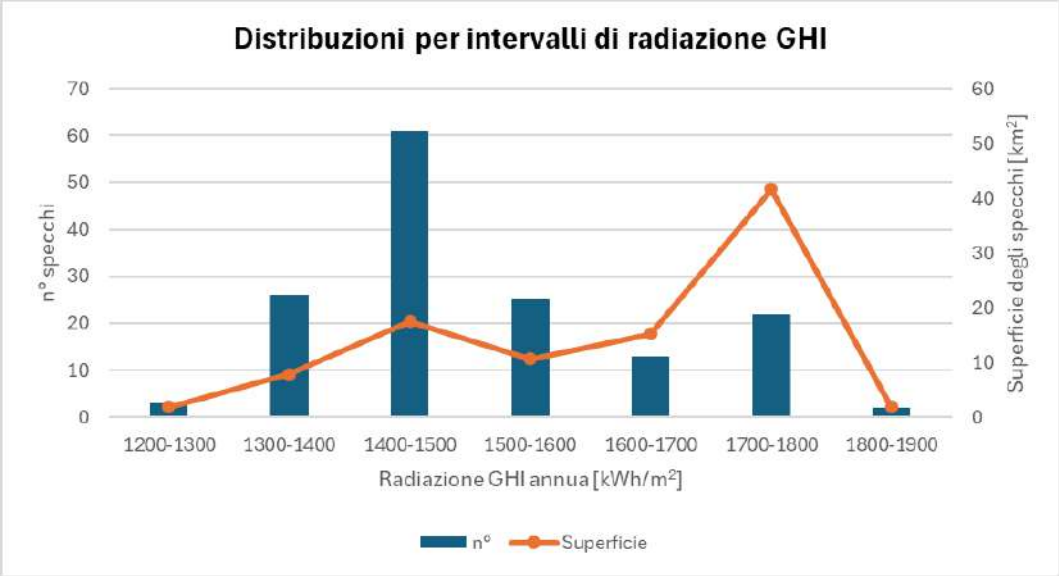



Figura 6.5: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione GHI.

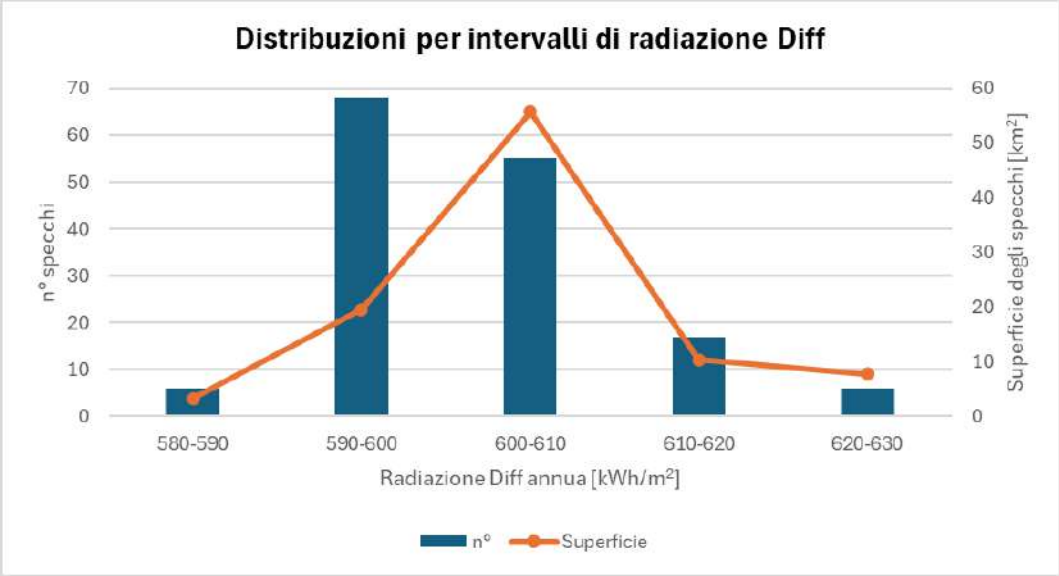



Figura 6.6: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione Diff.

Sia per quanto riguarda gli specchi d'acqua che gli "specchi d'acqua-grandi dighe" l'intervallo di radiazione con il maggior numero di elementi è sempre quello compreso tra 1400 kWh/m² e 1500 kWh/m² per le radiazioni DNI e GHI e tra i 590 kWh/m² e i 600 kWh/m² per l'irradiazione diffusa orizzontale. Queste classi di radiazione sono anche quelle caratterizzate dalla maggiore superficie disponibile per quanto concerne gli specchi d'acqua, ma non per gli "specchi d'acqua-grandi dighe", per cui le classi contraddistinte da una maggiore superficie complessiva sono 1700-1800 kWh/m² per DNI e GHI e 600-610 kWh/m² per l'irradiazione Diff.

Successivamente sono stati assegnati i punteggi ai diversi siti: al crescere della radiazione il punteggio aumenta, poiché naturalmente un sito colpito da una radiazione più intensa è più adatto a ospitare impianti fotovoltaici.

I criteri adottati per l'assegnazione degli scores sono mostrati in Tabella 6.2 e sono diversi nel caso della radiazione diffusa orizzontale poiché, essendo tali valori significativamente inferiori rispetto a quelli degli altri due tipi di irradiazione, è stata scelta una scala differente.

Tabella 6.2: Punteggi radiazione solare.

| SCORE | DNI, GHI [kWh/mq] | Diff [kWh/mq] |
|---|---|---|
| 1 | ≤ 1400 | ≤ 590 |
| 2 | ≤ 1500 | ≤ 600 |
| 3 | ≤ 1600 | ≤ 610 |
| 4 | ≤ 1700 | ≤ 620 |
| 5 | > 1700 | > 620 |

Gli specchi d'acqua che hanno i punteggi di tutti e tre i tipi di radiazione pari a 5 sono 1629 e sono tutti, tranne uno, ubicati in Sicilia; gli "specchi d'acqua-grandi dighe", invece, sono 2 e sono situati entrambi in Sicilia.

## 6.3. Vento

I valori della velocità media annua del vento a 10 m s.l.t. ottenuti dall'Atlante Eolico dell'Italia sono stati associati ai diversi specchi d'acqua. In particolare, a uno specchio d'acqua che interseca una singola cella è stato assegnato il valore della velocità del vento di tale cella; a uno specchio d'acqua che interseca più celle, è stato assegnato il valore medio delle velocità del vento delle celle intersecate.

I criteri adottati per l'assegnazione del punteggio sono mostrati in Tabella 6.3 e, come si può notare, a velocità del vento maggiori corrispondono punteggi più bassi.

Tabella 6.3: Punteggi vento.

| SCORE | VELOCITÀ DEL VENTO [m/s] |
|---|---|
| 1 | ≤ 30 |
| 2 | ≤ 20 |
| 3 | ≤ 10 |
| 4 | ≤ 5 |
| 5 | ≤ 2.5 |

## 6.4. Distanza dalle cabine elettriche

Come specificato nel Paragrafo 5.5, i dati riguardanti le cabine elettriche che è stato possibile ottenere sono:

- la distanza tra il centroide di ogni cella della griglia dell'Atlante Eolico Italiano e la cabina primaria più vicina;
- i poligoni rappresentanti le località italiane (Istat), in cui sicuramente è presente almeno una cabina secondaria.

Considerando gli scenari riportati in Tabella 5.4, a partire da questi dati sono stati calcolati, sia per gli specchi d'acqua che per gli "specchi d'acqua-grandi dighe", i valori di distanza geodetica tra il loro perimetro e:

- la cabina primaria più vicina;
- il centroide della località italiana più vicina. È stato utilizzato come estremo della distanza il centroide, e non il punto più vicino del perimetro della località, sia per motivi conservativi, trattandosi di una distanza maggiore, sia perché solitamente le cabine secondarie sono dislocate soprattutto nelle zone centrali delle località abitate. Questo valore rappresenta la distanza tra il perimetro degli specchi d'acqua e il punto in cui è più probabile trovare almeno una cabina secondaria. Si tratta comunque di un criterio approssimativo per valutare la

distanza dalle cabine secondarie quindi, una volta scelti gli specchi su cui installare gli impianti, sarà necessario rintracciare una cabina secondaria ed eseguire una stima corretta della distanza caso per caso.

Tali valori di distanza sono stati associati ai siti in base al livello di tensione a cui verrebbe erogata la corrente elettrica prodotta dai potenziali impianti installabili sui siti stessi. In particolare: se la corrente verrà erogata in alta tensione, si considera la distanza dalla cabina primaria più vicina; se verrà erogata in media o bassa tensione, invece, si considera la distanza dal centroide della località abitata più vicina, per i motivi sopra citati.

Sulla base di tali distanze sono stati poi assegnati i punteggi nei tre scenari, più elevati per distanze minori, come mostrato in Tabella 6.4.

Tabella 6.4: Punteggi distanza dalle cabine elettriche.

| SCORE | DISTANZA DALLE CABINE ELETTRICHE [m] |
|---|---|
| 1 | > 10000 |
| 2 | ≤ 10000 |
| 3 | ≤ 5000 |
| 4 | ≤ 1000 |
| 5 | ≤ 500 |

## 6.5. Accessibilità del sito

Come descritto nel paragrafo 5.6, per valutare l'accessibilità di un sito è stata calcolata la distanza geodetica tra il sito stesso e il tratto di strada (nei pressi di un casello autostradale per quanto riguarda i tratti autostradali) più vicino.

Sulla base di tali valori di distanza calcolati sono stati assegnati i punteggi che, come mostrato in Tabella 6.5, sono maggiori al diminuire della distanza.

Tabella 6.5: Punteggi accessibilità del sito.

| SCORE | DISTANZA DAL TS [m] |
|---|---|
| 1 | > 500 |
| 2 | ≤ 500 |
| 3 | ≤ 200 |
| 4 | ≤ 50 |
| 5 | ≤ 10 |

In conclusione, per avere un'idea chiara di quanti siano gli elementi aventi un punteggio pari a 1, 2, 3, 4 o 5, in Tabella 6.6 e in Tabella 6.7 è riportato, per ogni fattore predisponente e per ogni score, il numero di specchi d'acqua e il numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" rispettivamente.

Tabella 6.6: Numero specchi d'acqua per punteggio.

| SCORE | Radiazione solare | | | Vento | Distanza cabine elettriche | | Accessibilità |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | DNI | GHI | Diff | | WORST | BEST | |
| 1 | 1802 | 1495 | 5980 | 0 | 53 | 53 | 19829 |
| 2 | 24139 | 28667 | 25507 | 0 | 3825 | 3823 | 19558 |
| 3 | 13421 | 12879 | 18150 | 457 | 35608 | 35589 | 16789 |
| 4 | 6735 | 4581 | 12535 | 34779 | 15159 | 15156 | 6459 |
| 5 | 17772 | 16247 | 1697 | 28633 | 9224 | 9248 | 1234 |

Tabella 6.7: Numero "specchi d'acqua-grandi dighe" per punteggio.

| SCORE | Utilizzo prevalente | Radiazione solare | | | Vento | Distanza cabine elettriche | | Accessibilità |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | DNI | GHI | Diff | | WORST | BEST | |
| 1 | 13 | 17 | 29 | 6 | 0 | 0 | 0 | 33 |
| 2 | 45 | 52 | 61 | 68 | 0 | 6 | 5 | 14 |
| 3 | 5 | 35 | 25 | 55 | 2 | 59 | 51 | 29 |
| 4 | 4 | 18 | 13 | 17 | 71 | 19 | 17 | 28 |
| 5 | 85 | 30 | 24 | 6 | 79 | 68 | 79 | 48 |

## 6.6. Punteggio complessivo del sito

Conoscere il punteggio associato a ogni fattore predisponente di ogni sito è utile al fine di sapere come, singolarmente, i fattori e quindi le caratteristiche di un sito

contribuiscano alla sua idoneità a ospitare un impianto fotovoltaico flottante.

È bene, tuttavia, anche caratterizzare un sito, tenendo conto delle sue caratteristiche singole e della loro "importanza", con un unico score, in modo da avere una gerarchizzazione dei siti univoca.

Tale "punteggio complessivo" $S$ è stato calcolato come una media ponderata dei punteggi $s_i$ associati ai singoli fattori predisponenti, nel seguente modo:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{n}(s_i \cdot p_i)}{\sum_{i=1}^{n} p_i} \tag{7.1}$$

I pesi $p_i$ associati ai diversi fattori predisponenti sono funzione dell'importanza di ogni fattore predisponente per l'idoneità complessiva di un sito. Nel caso di installazioni di impianti fotovoltaici flottanti, ad esempio, è più rilevante il dato sulla radiazione solare che quello sul vento. Di conseguenza, alla radiazione GHI è stato dato il peso massimo, pari a 10 e al vento quello minimo, pari a 4; agli altri fattori predisponenti, ossia, uso prevalente per gli "specchi d'acqua-grandi dighe", distanza dalle cabine elettriche e accessibilità è stato associato il peso 8. Si tratta di un peso alto poiché anche questi sono fattori determinanti per l'idoneità di un sito, ma meno della radiazione che il sito stesso riceve.

Una volta calcolati i punteggi complessivi nei tre scenari, è stato possibile ottenere delle mappe con gli specchi d'acqua gerarchizzati in base a essi; a titolo di esempio in Figura 6.7 è mostrata quella riferita allo scenario "Intermediate" degli specchi d'acqua, con soltanto i confini regionali mostrati per facilitare la visualizzazione.

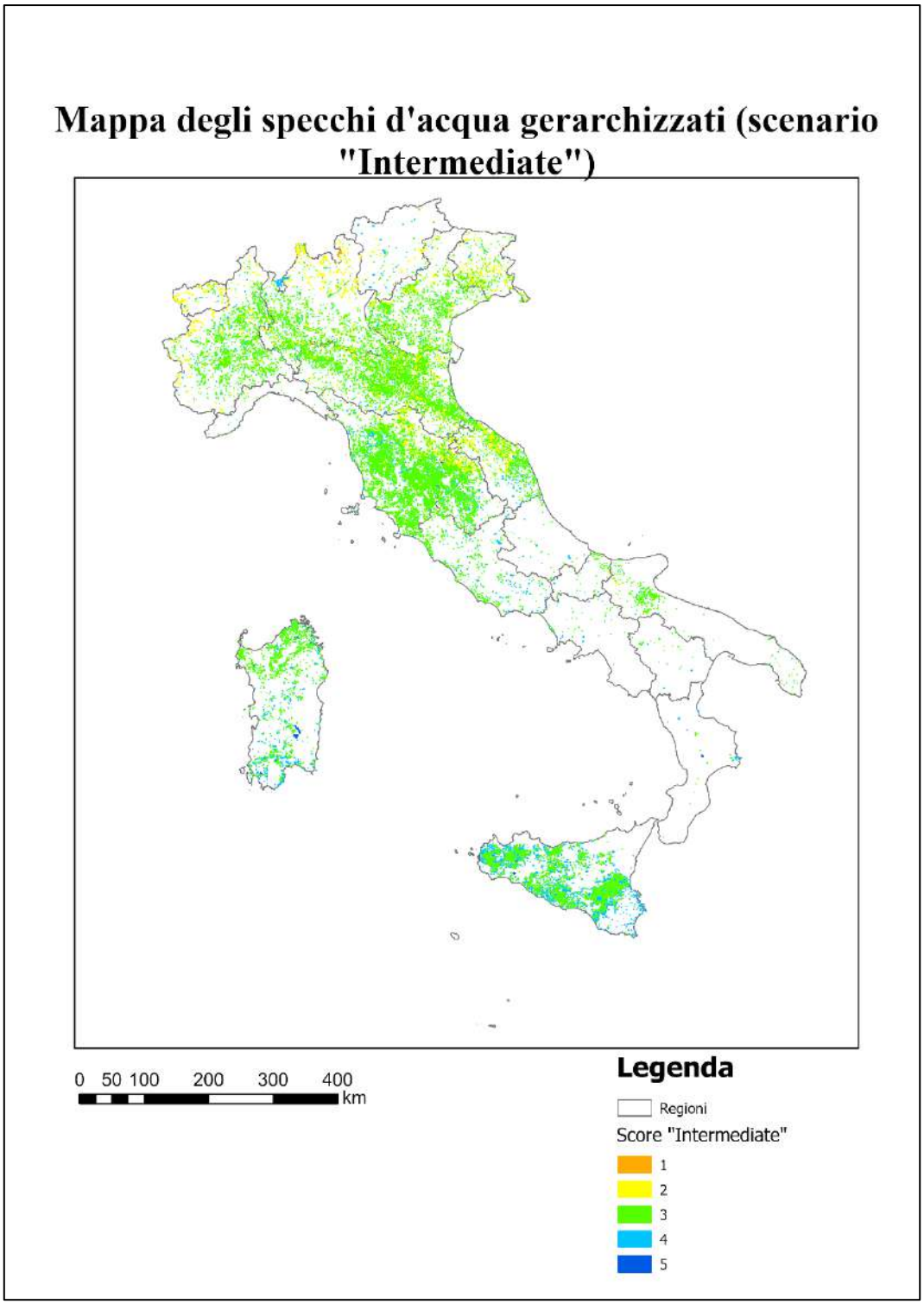



Figura 6.7: Esempio mappa punteggio complessivo.

Il numero di specchi d'acqua e il numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" per ogni punteggio complessivo ottenuto sono riportati, rispettivamente in Tabella 6.8 e in Tabella 6.9 , per i tre scenari considerati.

Tabella 6.8: Numero specchi d'acqua per ogni punteggio complessivo.

| SCORE | Worst | Intermediate | Best |
|---|---|---|---|
| 1 | 49 | 49 | 49 |
| 2 | 4833 | 4833 | 4833 |
| 3 | 44557 | 44554 | 44550 |
| 4 | 14354 | 14353 | 14354 |
| 5 | 76 | 80 | 83 |

Tabella 6.9: Numero "specchi d'acqua-grandi dighe" per ogni punteggio complessivo.

| SCORE | Worst | Intermediate | Best |
|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 8 | 8 | 8 |
| 3 | 66 | 64 | 64 |
| 4 | 76 | 78 | 78 |
| 5 | 2 | 2 | 2 |

In questo modo è possibile notare, innanzitutto, che il numero di specchi aventi un determinato punteggio non cambia di molto nei tre scenari considerati; questo è dovuto al fatto che l'unico fattore predisponente che varia negli scenari è quello relativo alla distanza dalle cabine elettriche, mentre gli altri restano invariati.

L'informazione più rilevante, tuttavia, risiede nel fatto che gli specchi d'acqua "migliori", ossia quelli con uno score maggiore o uguale a 3, sono nettamente di più rispetto agli specchi valutati come poco idonei, ossia con un punteggio pari a 1 o 2, come si può osservare in Figura 6.8 e in Figura 6.9 (le figure sono rappresentative di tutti e tre gli scenari). Questo potrebbe essere un primo elemento per comprendere che l'Italia potrebbe essere un buon territorio, date le caratteristiche dei suoi corpi idrici, per ospitare impianti fotovoltaici flottanti.

Figura 6.8: Distribuzione dello score degli specchi d'acqua nei tre scenari.

Figura 6.9: Distribuzione dello score degli “specchi d'acqua-grandi dighe” nei tre scenari.

# 7 Conclusioni e sviluppi futuri

## 7.1. Producibilità e ricavo

Per confermare se effettivamente l'Italia sia un territorio adatto o meno a ospitare impianti fotovoltaici flottanti su specchi d'acqua, che non è altro che l'obiettivo posto al principio di questo studio, occorre considerare due fattori importanti: la producibilità degli eventuali impianti e il ricavo in termini economici che si potrebbe ottenere.

Per calcolarli, sono stati considerati soltanto impianti con una dimensione minima di un ettaro, poiché impianti fotovoltaici flottanti più piccoli risultano non sufficientemente remunerativi in termini energetici ed economici. In particolare, gli impianti di dimensioni superiori a tre ettari sono quelli su cui si pone maggior interesse. La dimensione dell'impianto corrisponde alla copertura dello specchio d'acqua prevista, per cui sia per il calcolo della superficie complessiva disponibile che per quello dell'energia totale annua prodotta $E$ si fa riferimento ai tre scenari descritti nel paragrafo 5.5 e mostrati in Tabella 5.4.

Conoscendo il valore dell'energia totale annua è stato possibile quantificare sia:

- il ricavo economico che si avrebbe immettendo sul mercato l'energia elettrica prodotta da tali impianti fotovoltaici flottanti. Esso si può ricavare conoscendo il PUN (Prezzo Unico Nazionale), ossia il prezzo all'ingrosso dell'energia elettrica che viene acquistata sul mercato della Borsa Elettrica Italiana (IPEX – Italian Power Exchange). Esso rappresenta la media pesata nazionale dei prezzi di vendita dell'energia elettrica, formati nelle diverse zone d'Italia e nelle diverse

ore del giorno (Enel Italia S.p.a.). Esso, quindi, oscilla molto nell'arco del tempo, ma è stato assunto come riferimento il PUN medio annuo base-load del 2023, pari a 127.24 €/MWh (GME, 2023);

- la quota di domanda di energia elettrica italiana che potrebbe soddisfare la produzione di tali impianti. Come riferimento sono stati assunti i consumi elettrici italiani del 2023, pari a 306.1 miliardi di kWh (Terna, 2024).

I risultati relativi agli specchi d'acqua e agli "specchi d'acqua-grandi dighe" sono riportati, rispettivamente, in Tabella 7.1 e in Tabella 7.2.

Tabella 7.1: Valori utili specchi d'acqua con superficie maggiore di 1 ha.

| | Superficie [ha] | | |
|---|---|---|---|
| | 1-3 | > 3 | |
| n° specchi | 101 | 65 | WORST |
| Sup. complessiva [ha] | 177.08 | 883.60 | |
| E annua [MWh] | 332 539.47 | 1 690 546.40 | |
| Ricavo annuo [M €] | 42.31 | 215.11 | |
| % consumi | 0.11 | 0.55 | |
| n° specchi | 214 | 119 | INT. |
| Sup. complessiva [ha] | 339.63 | 2005.87 | |
| E annua [MWh] | 761 570.79 | 4 643 367.64 | |
| Ricavo annuo [M €] | 96.90 | 590.82 | |
| % consumi | 0.25 | 1.52 | |
| n° specchi | 341 | 166 | BEST |
| Sup. complessiva [ha] | 547.44 | 3182.03 | |
| E annua [MWh] | 1 468 777.38 | 8 828 011.05 | |
| Ricavo annuo [M €] | 186.89 | 1123.28 | |
| % consumi | 0.48 | 2.88 | |

Tabella 7.2: Valori utili "specchi d'acqua-grandi dighe" con superficie maggiore di 1 ha.

| | Superficie [ha] | | |
|---|---|---|---|
| | 1-3 | > 3 | |
| n° specchi | 39 | 33 | WORST |
| Sup. complessiva [ha] | 73.73 | 385.62 | |
| E annua [MWh] | 136 774.92 | 787 615.08 | |
| Ricavo annuo [M €] | 17.40 | 100.22 | |
| % consumi | 0.04 | 0.26 | |
| n° specchi | 36 | 57 | INT. |
| Sup. complessiva [ha] | 66.80 | 881.74 | |
| E annua [MWh] | 148 587.89 | 2 158 667.16 | |
| Ricavo annuo [M €] | 18.91 | 274.67 | |
| % consumi | 0.05 | 0.71 | |
| n° specchi | 24 | 72 | BEST |
| Sup. complessiva [ha] | 48.31 | 1378.06 | |
| E annua [MWh] | 128 077.97 | 4 033 701.87 | |
| Ricavo annuo [M €] | 16.30 | 513.25 | |
| % consumi | 0.04 | 1.32 | |

Si tratta di risultati incoraggianti poiché, innanzitutto, il numero di corpi idrici avente una piccola porzione, come il 5%, il 10% o il 15% della superficie, di dimensioni superiori a un ettaro può arrivare, nello scenario migliore, anche a 507 specchi d'acqua o 96 "specchi d'acqua-grandi dighe". In secondo luogo, l'energia elettrica totale annua e i ricavi che si potrebbero ottenere sono notevoli, se si considera che si tratta di una tecnologia nuova e che sfrutta siti già presenti sul territorio italiano, il che potrebbe anche diminuire il quantitativo di energia importata dall'estero.

Anche la quota di domanda elettrica italiana che si riuscirebbe a soddisfare soltanto con l'energia prodotta da questi nuovi impianti potenziali è un risultato interessante: nel migliore dei casi si arriva a quasi il 3%. Anche valori che possono sembrare modesti, infatti, sono importanti in un contesto di transizione energetica in cui si mira a dipendere sempre più da fonti rinnovabili e ad abbattere le emissioni. Ogni kWh prodotto da una fonte fotovoltaica, infatti, fa risparmiare circa 0.53 kg di $CO_2$ (Sigeim Energia srl). Soltanto considerando gli impianti di dimensione superiore a 3 ettari, infatti, si potrebbero risparmiare le quantità di anidride carbonica riportate in Tabella 7.3.

Tabella 7.3: Risparmio di $CO_2$.

| | $CO_2$ "risparmiata" [t] | | |
|---|---|---|---|
| | WORST | INTERMEDIATE | BEST |
| specchi d'acqua | 895989.59 | 2460984.85 | 4678845.86 |
| "specchi d'acqua-grandi dighe" | 417435.99 | 1144093.59 | 2137861.99 |

I risultati ottenuti, al netto della grande selezione di specchi d'acqua effettuata, dimostrano che l'Italia è un territorio in cui il fotovoltaico flottante potrebbe trovare una sua applicazione, poiché vi sono diversi siti ritenuti idonei a ospitare questo tipo di impianto. L'introduzione di questa nuova tecnologia in Italia potrebbe segnare un grande passo in termini di innovazione, produzione rinnovabile e decarbonizzazione, obiettivi di portata non soltanto nazionale, ma anche europea e globale.

Il numero di specchi d'acqua e di "specchi d'acqua-grandi dighe" in cui potrebbero sorgere impianti di dimensioni superiori a 3 ettari e la relativa superficie complessiva degli impianti stessi, infine, sono riportati, per i tre scenari, rispettivamente in Tabella 7.4 e in Tabella 7.5, per ogni Regione italiana. La Regione in cui, in entrambi i casi, non potrebbero sorgere impianti di queste dimensioni è la Liguria; quella, invece, che potrebbe ospitarne di più è la Sardegna.

Tabella 7.4: Numero specchi con potenziali impianti superiori a 3 ha e superficie complessiva per ogni Regione.

| | WORST | | INTERMEDIATE | | BEST | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Regione | n° specchi | Sup. complessiva [ha] | n° specchi | Sup. complessiva [ha] | n° specchi | Sup. complessiva [ha] |
| P. A. Trento | 3 | 33.80 | 8 | 89.04 | 11 | 144.99 |
| Piemonte | 0 | 0.00 | 4 | 16.19 | 5 | 28.77 |
| Valle d'Aosta | 3 | 14.83 | 4 | 34.42 | 6 | 58.45 |
| Lombardia | 8 | 329.54 | 10 | 666.46 | 18 | 1028.01 |
| P. A. Bolzano | 4 | 18.33 | 8 | 51.89 | 11 | 88.44 |
| Veneto | 2 | 7.46 | 6 | 32.43 | 12 | 72.65 |
| Friuli-Venezia Giulia | 3 | 16.42 | 4 | 38.82 | 5 | 61.28 |
| Liguria | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| Emilia-Romagna | 2 | 9.96 | 8 | 44.53 | 15 | 92.99 |
| Toscana | 3 | 24.83 | 8 | 71.06 | 11 | 117.73 |
| Umbria | 0 | 0.00 | 1 | 5.88 | 2 | 12.62 |
| Marche | 0 | 0.00 | 5 | 25.52 | 6 | 42.38 |
| Lazio | 1 | 26.85 | 1 | 53.70 | 3 | 88.08 |
| Abruzzo | 1 | 13.35 | 2 | 30.38 | 3 | 48.95 |
| Molise | 0 | 0.00 | 1 | 5.45 | 1 | 8.18 |
| Campania | 1 | 3.59 | 1 | 7.18 | 1 | 10.77 |
| Puglia | 1 | 3.44 | 3 | 16.45 | 3 | 24.67 |
| Basilicata | 3 | 16.16 | 5 | 41.91 | 5 | 62.86 |
| Calabria | 3 | 25.37 | 4 | 54.39 | 5 | 84.78 |
| Sicilia | 13 | 113.33 | 18 | 248.18 | 19 | 376.53 |
| Sardegna | 14 | 226.34 | 18 | 472.00 | 24 | 728.91 |

Tabella 7.5: Numero "specchi d'acqua-grandi dighe" con potenziali impianti superiori a 3 ha e superficie complessiva per ogni Regione.

| | WORST | | INTERMEDIATE | | BEST | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Regione | n° specchi | Sup. complessiva [ha] | n° specchi | Sup. complessiva [ha] | n° specchi | Sup. complessiva [ha] |
| P. A. Trento | 1 | 18.85 | 5 | 55.59 | 6 | 87.19 |
| Piemonte | 0 | 0.00 | 1 | 4.27 | 1 | 6.40 |
| Valle d'Aosta | 3 | 14.83 | 4 | 34.42 | 5 | 55.39 |
| Lombardia | 2 | 11.63 | 2 | 23.26 | 4 | 42.14 |
| P. A. Bolzano | 2 | 10.68 | 4 | 29.43 | 6 | 51.67 |
| Veneto | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 1 | 3.99 |
| Friuli-Venezia Giulia | 1 | 7.17 | 1 | 14.34 | 2 | 24.57 |
| Liguria | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| Emilia-Romagna | 1 | 4.23 | 3 | 17.58 | 3 | 26.37 |
| Toscana | 1 | 5.25 | 4 | 22.95 | 6 | 41.97 |
| Umbria | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 1 | 3.80 |
| Marche | 0 | 0.00 | 5 | 25.52 | 5 | 38.28 |
| Lazio | 1 | 26.85 | 1 | 53.70 | 2 | 84.72 |
| Abruzzo | 0 | 0.00 | 1 | 3.68 | 2 | 8.90 |
| Molise | 0 | 0.00 | 1 | 5.45 | 1 | 8.18 |
| Campania | 1 | 3.59 | 1 | 7.18 | 1 | 10.77 |
| Puglia | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 | 0 | 0.00 |
| Basilicata | 1 | 4.63 | 2 | 14.97 | 2 | 22.45 |
| Calabria | 3 | 25.37 | 3 | 50.75 | 3 | 76.12 |
| Sicilia | 6 | 49.26 | 7 | 103.15 | 7 | 154.73 |
| Sardegna | 10 | 203.27 | 12 | 415.50 | 14 | 630.41 |

## 7.2. Considerazioni finali

L'analisi svolta e descritta nel presente studio ha consentito di affermare che l'Italia è un territorio idoneo a ospitare impianti fotovoltaici flottanti sugli specchi d'acqua ivi presenti, i quali costituiscono una risorsa e anche un elemento di salvaguardia del territorio. Il metodo utilizzato è composto essenzialmente da due fasi: una prima selezione e una successiva gerarchizzazione degli specchi d'acqua presenti sul territorio, i quali sono stati ottenuti dall'integrazione di dataset diversi. Parallelamente è stata svolta l'identificazione dei laghi di cava esistenti nelle pianure italiane, essendo corpi idrici di particolare interesse per i fini di questo studio, mediante l'utilizzo di tecniche di Machine Learning.

Fondamentale è stata l'individuazione di alcuni fattori predisponenti all'idoneità di un sito: eventuali vincoli presenti, l'utilizzo prevalente (soltanto per quegli specchi che sono anche grandi dighe italiane), l'irradiazione solare ricevuta, il vento, la distanza dalle cabine elettriche e l'accessibilità.
Questi fattori hanno permesso, durante la selezione, di escludere tutti quegli specchi che intersecassero aree protette; durante la gerarchizzazione degli stessi, invece, ha reso possibile l'attribuzione di un punteggio, per ogni fattore predisponente, ai diversi siti selezionati. Successivamente è stato attribuito, in tre scenari, un punteggio complessivo a ogni specchio d'acqua, basato sull'importanza relativa dei singoli fattori predisponenti, in modo da ottenere una gerarchizzazione univoca.

L'analisi sulla producibilità e sui ricavi infine eseguita sui potenziali impianti, di dimensione superiore a un ettaro, che potrebbero sorgere nei siti selezionati ha permesso di dare una risposta alla domanda che dà origine a questo lavoro. Realizzare impianti fotovoltaici flottanti in Italia non soltanto è possibile, ma potrebbe dare contributi importanti in termini di decarbonizzazione e in risposta al cambiamento climatico in atto.

Il metodo utilizzato, infatti, risulta essere rilevante non soltanto perché è stato svolto su un'area di studio vasta e soggetta a vincoli come l'Italia, ma perché si inserisce perfettamente in un contesto europeo e mondiale in cui si cercano e si incoraggiano soluzioni che limitino il più possibile conseguenze ambientali negative. Il fotovoltaico flottante, con i suoi numerosi vantaggi e la sua efficienza, può essere una di queste soluzioni.

## 7.3. Sviluppi futuri

Il presente studio, essendo stato svolto a una scala nazionale, ha come conseguenza "naturale" l'applicazione a una scala di maggior dettaglio. Una volta appurato che in Italia è possibile e conveniente realizzare impianti fotovoltaici flottanti, infatti, è ovviamente possibile pensare di concentrarsi su siti idonei specifici: in questo modo, trattandosi di aree circoscritte, si potrebbe anche fare la ricognizione delle cabine secondarie presenti, in modo da stimare con esattezza la loro distanza dello specchio d'acqua in questione. L'approssimazione della distanza tra sito e cabina secondaria con la distanza tra sito e località più vicina è, infatti, una delle criticità descritte in questo lavoro, dovuta alla sensibilità di questo tipo di informazione.

Un ulteriore sviluppo possibile di questa analisi riguarda il calcolo del punteggio complessivo assegnato agli specchi d'acqua selezionati: esso, infatti, è stato calcolato come la media pesata dei singoli punteggi e i pesi sono stati assegnati considerando l'importanza relativa dei fattori predisponenti. Un'idea interessante sarebbe calibrare tali pesi sulla base di fattori aziendali che contribuiscono a rendere un lago più o meno idoneo. Per farlo si potrebbe intervistare chi produce e progetta tali impianti per comprendere quali siano le caratteristiche per loro più importanti. In questo modo, inoltre, si potrebbero generare degli esempi fittizi di specchio d'acqua con un determinato punteggio, sulla base dei quali classificare quelli esistenti, tramite il Machine Learning. Degli esempi fittizi sono necessari poiché in Italia ci sono al momento pochissimi impianti

fotovoltaici flottanti a cui fare riferimento; visto che i siti in cui è possibile realizzarli, però, sono presenti, magari, un giorno, ce ne saranno molti di più.

# Bibliografia/Sitografia

Alok Sahu, Neha Yadav, K. Sudhakar, Floating photovoltaic power plant: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 66, 2016, Pages 815-824, ISSN 1364-0321. Tratto il 19 luglio 2024, 16:07 da https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051.

ARERA. Testo integrato delle connessioni attive-TICA aggiornato. (16 marzo 2017). Tratto il 29 ottobre 2024, 12:32 da https://www.arera.it/fileadmin/allegati/docs/08/099-08argallnew.pdf.

Arnold, W., Giuliani, M. & Castelletti, A. Floating photovoltaics may reduce the risk of hydro-dominated energy development in Africa. Nat Energy 9, 602–611 (2024). Tratto il 29 luglio 2024, 16:28 da https://doi.org/10.1038/s41560-024-01510-0.

Awan, A. A. What is Bagging in Machine Learning? A Guide With Examples. (20 novembre 2023). Tratto il 10 novembre 2024, 13:46 da https://www.datacamp.com/tutorial/what-bagging-in-machine-learning-a-guide-with-examples.

Basile, G. L'ambiente in Costituzione: modificati gli articoli 9 e 41. Ecco le novità. (10 febbraio 2022). Tratto il 4 settembre 2022, 17:52 da https://edizioni.simone.it/2022/02/10/ambiente-costituzione-modifica/.

BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica. (12 gennaio 2023). Tipi di pannelli fotovoltaici: quali sono le differenze? Tratto il 5 agosto 2024, 17:51 da https://biblus.acca.it/tipi-di-pannelli-fotovoltaici-quali-sono-le-differenze/.

BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica. Effetto fotovoltaico: cos'è e come funziona. (11 gennaio 2023). Tratto il 5 agosto 2024, 17:46 da https://biblus.acca.it/effetto-fotovoltaico-cose-e-come-funziona/.

BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica. Rendimento dei pannelli fotovoltaici: i fattori da valutare. (6 dicembre 2022). Tratto il 5 agosto 2024, 18:56 da https://biblus.acca.it/rendimento-dei-pannelli-fotovoltaici-i-fattori-da-valutare/.

BibLus-net – ACCA software, Redazione tecnica. Vincolo paesaggistico: cos'è e come gestirlo. (18 settembre 2023). Tratto il 10 settembresto 2024, 13:12 da https://biblus.acca.it/vincolo-paesaggistico-cose-e-come-gestirlo/.

Bonini, M. Impianti solari fotovoltaici. Tratto il 3 ottobre 2024, 16:16 da http://massimombonini.studiombm.it/pdf%20Energie%20alternative/Fotovoltaico.pdf.

Buratin, E. Cos'è l'effetto fotoelettrico? Definizione e applicazioni. (19 luglio 2023). Tratto il 16 luglio 2024, 19:35 da https://www.geopop.it/cose-leffetto-fotoelettrico-definizione-e-applicazioni/.

Capital PV. Connessione fotovoltaica: guida alle cabine BT, MT e AT. (29 febbraio 2024). Tratto il 24 ottobre 2024, 16:42 da https://www.affittoterreno.solar/post/connessione-impianti-fotovoltaici-cabine-elettriche.

Centro Interregionale. Strati Informativi Prioritari di interesse nazionale DBPrior10k. (Ottobre 2007). Tratto il 4 ottobre 2024, 20:38 da Documento_DBPrior.pdf.

Chawla, N. V., Bowyer, K. W., Hall, L. O., & Kegelmeyer, W. P. (2002). SMOTE: synthetic minority over-sampling technique. *Journal of artificial intelligence research*, *16*, 321-357. Tratto il 9 novembre 2024, 20:10 da https://www.jair.org/index.php/jair/article/view/10302.

Choi, Y., Lee, N., & Kim, K. (2013). Empirical Research on the efficiency of Floating PV systems compared with Overland PV Systems. Tratto il 29 ottobre 2024, 12:10

da https://www.semanticscholar.org/paper/Empirical-Research-on-the-efficiency-of-Floating-PV-Choi-Lee/a38910b49973d099603974c24cd55f43a8b0f64c.

Ciriaco, R. Quanti sono gli impianti fotovoltaici in Italia? (7 marzo 2024). Tratto il 5 agosto, 16:16 da https://insideevs.it/news/711533/impianti-fotovoltaici-energia-solare-italia/.

Città metropolitana di Milano. Lago di Basiglio. Tratto il 7 novembre 2024, 12:50 da https://opencms10.cittametropolitana.mi.it/parco_agricolo_sud_milano/natura/aree_naturalistiche/lago_di_basiglio.html.

Ciucci, M. (29 febbraio 2024). Energie rinnovabili. Note tematiche sull'Unione Europea. Tratto il 29 luglio 2024, 18:41 da https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/70/energie-rinnovabili.

Costituzione della Repubblica italiana. Tratto il 4 settembre 2024, 18:02 da https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:costituzione.

Crisci, M. Il difficile rapporto tra energie rinnovabili e paesaggio. Verso una nuova concezione della pianificazione ambientale. Quotidiano Legale, 2023, 73. Tratto il 4 settembre 2024, 17:49 da https://www.quotidianolegale.it/wp-content/uploads/2023/06/Fascicolo-2023_1.-QL-Quotidiano-Legale-I.pdf#page=74.

De Rooij, D. Floating solar (PV) Systems: why they are taking off. (5 agosto 2015). Tratto il 6 agosto 2024, 12:45 da https://sinovoltaics.com/technology/floating-solar-pv-systems-why-they-are-taking-off/.

Del Bianco, S. Migliori mercati fotovoltaici nel mondo, l'Italia entra in top ten. (18 giugno 2023). Tratto il 18 luglio 2024, 12:05 da https://www.rinnovabili.it/energia/fotovoltaico/migliori-mercati-fotovoltaici-nel-mondo-italia-top-ten/.

Dipartimento della Protezione Civile. Rischio grandi dighe. Tratto il 21 ottobre 2024, 16:29 da https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/pagina-base/rischio-grandi-dighe/.

Dolci, E. Laghi "freatici" della pianura bergamasca. (Settembre 2017). Tratto il 7 novembre 2024, 12:49 da https://www.nuovademi.com/wp-content/uploads/2017/09/laghi-freatici.pdf.

EdilTecnico, Redazione Tecnica. Come calcolare l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico. (16 marzo 2023). Tratto il 29 ottobre 2024, 10:56 da https://ediltecnico.it/come-calcolare-energia-prodotta-da-un-impianto-fotovoltaico/.

El Naqa, I., Murphy, M.J. (2015). What Is Machine Learning? In: El Naqa, I., Li, R., Murphy, M. (eds) Machine Learning in Radiation Oncology. Springer, Cham. Tratto l'8 novembre 2024, 11:13 da https://doi.org/10.1007/978-3-319-18305-3_1.

Elisa Papadis, George Tsatsaronis, Challenges in the decarbonization of the energy sector, Energy, Volume 205, 2020, 118025, ISSN 0360-5442. Tratto il 21 agosto 2024, 17:28 da https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118025.

EMBER, Global Electricity Review 2022. (2022). Tratto il 31 luglio 2024, 20:07 da file:///C:/Users/39342/Downloads/Report-GER22.pdf.

ENEA. Tabelle della radiazione solare. Tratto il 21 ottobre 2024, 19:53 da http://www.solaritaly.enea.it/TabelleRad/TabelleRadIt.php.

Enel Green Power S.p.A. – Communications. Come si costruisce e come funziona un campo fotovoltaico. Tratto il 24 ottobre 2024, 11:51 da https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica/fonti-rinnovabili.

Enel Green Power S.p.A. – Communications. Le rinnovabili per la transizione energetica. Tratto il 29 luglio 2024, 18:20 da https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica/fonti-rinnovabili.

Enel Italia S.p.a. Cos'è il PUN e a cosa serve. Tratto l'11 novembre 2024, 12:18 da https://www.enel.it/it/supporto/faq/cos-e-il-pun.

Enel X S.r.l. Cos'è lo scambio sul posto? Tratto il 24 ottobre 2024, 16:45 da https://www.enelx.com/it/it/faq/cos-e-lo-scambio-sul-posto.

Energia & Mercato, Redazione. Impatto ambientale del fotovoltaico galleggiante: i primi dati dall'Olanda. (19 maggio 2021). Tratto il 6 agosto 2024, 12:59 da https://www.energiamercato.it/notizie/mercato/impatto-ambientale-fotovoltaico-galleggiante.

ESG360. Un 2023 da record per le rinnovabili a livello globale. (21 gennaio 2024). Tratto il 29 luglio 2024, 19:30 da https://www.esg360.it/energy-transformation/un-2023-da-record-per-le-rinnovabili-a-livello-globale/.

Essak, L.; Ghosh, A. Floating Photovoltaics: A Review. Clean Technol. 2022, 4, 752-769. Tratto il 19 luglio 2024, 17:56 da https://doi.org/10.3390/cleantechnol4030046.

Ferrari, F. Il fotovoltaico architettonicamente integrato. (28 aprile 2015). Tratto il 5 agosto 2024, 20:00 da https://energmagazine.it/201504282779/focus/il-fotovoltaico-architettonicamente-integrato/.

Fiorenzo F, Mancino G, Borghetti M, Ferrara A (2008). Metodi per l'interpolazione delle precipitazioni e delle temperature mensili della Basilicata. Forest@ 5: 337-350. - doi: 10.3832/efor0550-0050337. Tratto il 21 ottobre 2024, 20:24 da https://foresta.sisef.org/contents/?id=efor0550-0050337&lang=it.

Francese, D. Solare Fotovoltaico (11 settembre 2012). Tratto il 17 luglio 2024, 21:04 da https://www.teknoring.com/wikitecnica/tecnologia/solare-fotovoltaico/.

Giles Exley, Alona Armstrong, Trevor Page, Ian D. Jones, Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification,

Solar Energy, Volume 219, 2021, Pages 24-33, ISSN 0038-092X. Tratto il 6 agosto 2024, 13:34 da https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076.

GME. Relazione annuale 2023. Tratto l'11 novembre 2024, 12:59 da https://storico.mercatoelettrico.org/It/MenuBiblioteca/documenti/GME_RelazioneAnnualeWeb_2023.pdf.

GMG Studio Tecnico. Vincolo paesaggistico: quali opere sono permesse? (30 settembre 2023). Tratto il 10 settembre 2024, 13.29 da https://www.gmgstudiotecnico.com/2023/09/30/vincolo-paesaggistico-opere-permesse/.

GSE. Rapporto statistico. Solare fotovoltaico. (Giugno 2019). Tratto il 29 ottobre 2024, 11:07 da https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Solare%20Fotovoltaico%20-%20Rapporto%20Statistico%202018.pdf.

Hopson, C. Floating solar going global with 10 GW more by 2025: Fitch. (15 ottobre 2020). Tratto il 6 agosto 2024, 11: 33 da https://www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-global-with-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336.

INTESA/WG 01 – DBP10k Gruppo di lavoro sulle specifiche per i Data Base Topografici. DBPrior10k Data Base degli strati di riferimento prioritari essenziali alla scala 1:10.000 Specifiche Tecniche. (11 aprile 2002). Tratto il 19 ottobre 2024, 17:30 da 1N1005v1.0.doc.

Istat. Descrizione dei dati geografici e delle variabili censuarie per sezione di censimento. Anni 1991, 2001, 2021. (5 maggio 2015). Tratto il 6 novembre 2024, 18:43 da https://www.istat.it/it/files/2013/11/2015.04.28-Descrizione-dati-Pubblicazione.pdf.

Istat. Superficie Territoriale e urbanizzazione. (1 settembre 2014). Tratto il 18 ottobre 2024, 20:22 da https://www.istat.it/non-categorizzato/principali-dimensioni-geostatistiche-e-grado-di-urbanizzazione-del-paese/.

Javid Mohtasham, Review Article-Renewable Energies, Energy Procedia, Volume 74, 2015, Pages 1289-1297. Tratto il 29 luglio 2024, 17:01 da https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.774.

Johan Rockström et al., A roadmap for rapid decarbonization. Science 355, 1269-1271(2017). Tratto il 21 agosto 2024, 18:32 da https://www.science.org/doi/10.1126/science.aah3443.

Jorio, L. Solare sull'acqua, una prima mondiale sulle Alpi svizzere. (26 ottobre 2020). Tratto il 6 agosto, 13:09 da https://www.swissinfo.ch/ita/economia/fotovoltaico-solare-galleggiante-alpi-lago-svizzera/46055628.

Karmendra Kumar Agrawal, Shibani Khanra Jha, Ravi Kant Mittal, Sanjay Vashishtha, Assessment of floating solar PV (FSPV) potential and water conservation: Case study on Rajghat Dam in Uttar Pradesh, India, Energy for Sustainable Development, Volume 66, 2022, Pages 287-295, ISSN 0973-0826, https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.12.007. Tratto il 6 agosto 2024, 12:35 da https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082621001514.

Legge quadro sulle aree protette. Tratto il 9 settembre 2024, 12:30 da https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:legge:1991-12-06;394.

Maglia, S. La disciplina delle aree protette. Tratto il 9 settembre, 2024, 21:24 da https://www.tuttoambiente.it/commenti-premium/la-disciplina-delle-aree-protette/.

Mahesh, Batta. (2019). Machine Learning Algorithms -A Review. International Journal of Science and Research (IJSR). 9. 10.21275/ART20203995. Tratto l'8 novembre 2024, 11.16 da https://www.researchgate.net/publication/344717762_Machine_Learning_Algorithms_-A_Review.

Margarita Mediavilla, Carlos de Castro, Iñigo Capellán, Luis Javier Miguel, Iñaki Arto, Fernando Frechoso. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. Energy Policy, Volume 52, 2013, Pages 297-311, ISSN 0301-4215. Tratto il 29 luglio 2024, 16:33 da https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.033.

Martín, J. R. BayWa r.e. adds to European floating solar momentum with double project completion. (27 ottobre 2019). Tratto il 6 agosto 2024, 11:30 da https://web.archive.org/web/20191111154854/https://www.pv-tech.org/news/baywa-r.e.-adds-to-european-floating-solar-momentum-with-dual-finish.

Masci, F. Cos'è l'effetto fotovoltaico e come funziona? (13 dicembre 2023). Tratto il 16 luglio 2024, 20:10 da https://luce-gas.it/guida/ri nnovabili/effetto-fotovoltaico

MathWorks. Classification Learner. Tratto il 9 novembre 2024, 13:11 da https://it.mathworks.com/help/stats/classificationlearner-app.html.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Aree naturali protette. (Ultimo aggiornamento 19 maggio 2022). Tratto il 9 settembre 2024, 21:23 da https://www.mase.gov.it/pagina/aree-naturali-protette.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Classificazione delle aree naturali protette. (Ultimo aggiornamento 22 luglio 2013). Tratto il 9 settembre 2024, 12:45 da https://www.mase.gov.it/pagina/classificazione-delle-aree-naturali-protette.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Energia e Clima 2030. (Ultimo aggiornamento 9 luglio 2024). Tratto il 25 ottobre 2024, 15:01 da https://www.mase.gov.it/energia/energia-e-clima-2030.

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica. Rete Natura 2000. (Ultimo aggiornamento 22 dicembre 2023). Tratto il 9 settembre 2024, https://www.mase.gov.it/pagina/rete-natura-2000.

Muhammad Tawalbeh, Amani Al-Othman, Feras Kafiah, Emad Abdelsalam, Fares Almomani, Malek Alkasrawi, Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook, Science of The Total Environment, Volume 759, 2021, 143528, ISSN 0048-9697. Tratto il 5 agosto 2024, 20:00 da https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528.

Munari, L. Rendimento di un impinato fotovoltaico: da cosa dipende e come incrementarlo. (7 aprile 2023). Tratto il 5 agosto 2024, 18:45 da https://www.ingenioweb.it/articoli/rendimento-di-un-impianto-fotovoltaico-da-cosa-dipende-e-come-incrementarlo/.

Nicora, R. Il rendimento e il dimensionamento dei pannelli fotovoltaici. (18 ottobre 2024). Tratto il 29 ottobre 2024, 12:12 da https://www.otovo.it/blog/rendimento-dimensionamento-pannelli-fotovoltaici/.

Parisa Ranjbaran, Hossein Yousefi, G.B. Gharehpetian, Fatemeh Razi Astaraei, A review on floating photovoltaic (FPV) power generation units, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 110, 2019, Pages 332-347. Tratto il 29 luglio 2024, 16:22 da https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.015.

Parlamento Europeo. (8 dicembre 2023). L'UE e l'accordo di Parigi: verso la neutralità climatica. Tratto il 21 agosto 2024, 18:18 da https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20191115STO66603/l-ue-e-l-accordo-di-parigi-verso-la-neutralita-climatica.

Prince, M.B. Semiconductor Photovoltaic Effect and Devices. In: Lovv, W., Schieber, M. Applied Solid State Physics. Springer, Boston, MA. (1970). Tratto il 5 agosto 2024, 17:30 da https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1854-5_9.

Rahma Muthia, Anastasia Segari Putri Pramudya, Mochamad Rafly Maulana, Widodo Wahyu Purwanto, Techno–economic analysis of green hydrogen production by a floating solar photovoltaic system for industrial decarbonization, Clean Energy, Volume 8, Issue 4, August 2024, Pages 1–14. Tratto il 16 settembre 2024, 19:33 da https://doi.org/10.1093/ce/zkae032.

RSE. AEOLIAN. Tratto il 22 ottobre 2024, 14:40 da https://atlanteeolico.rse-web.it/html/download_terria_griglia-EN.html.

S. Shiva Kumar, Hankwon Lim, An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production, Energy Reports, Volume 8, 2022, Pages 13793-13813, ISSN 2352-4847. Tratto il 16 settembre 2024, 19:34 da https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.127.

Sánchez Molina, P. Il governo spagnolo regolamenta l'installazione del fotovoltaico galleggiante nei bacini idrici pubblici. (11 luglio 2024). Tratto il 29 ottobre 2024, 18:44 da https://www.pv-magazine.it/2024/07/11/il-governo-spagnolo-regolamenta-linstallazione-del-fotovoltaico-galleggiante-nei-bacini-idrici-pubblici/.

Saur News Bureau. Here i show you can calculate the annual solar energy output of a photovoltaic system. (25 marzo 2016). Tratto il 29 ottobre 2024, 11:24 da https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/here-is-how-you-can-calculate-the-annual-solar-energy-output-of-a-photovoltaic-system.

Sayed, E.T.; Olabi, A.G.; Alami, A.H.; Radwan, A.; Mdallal, A.; Rezk, A.; Abdelkareem, M.A. Renewable Energy and Energy Storage Systems. Energies 2023, 16, 1415. Tratto il 29 luglio 2024, 16:32 da https://doi.org/10.3390/en16031415.

Shiva Gorjian, H. Sharon, Hossein Ebadi, Karunesh Kant, Fausto Bontempo Scavo, Giuseppe Marco Tina, Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems,

Journal of Cleaner Production, Volume 278, 2021, 124285, ISSN 0959-6526. Tratto il 21 agosto 2024, 16:21 da https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124285.

Sigeim Energia srl. Benefici ambientali. Tratto l'11 novembre 2024, 14:03 da https://www.sigeim.it/i_vantaggi_ambientali.html.

Sonnen Italia, Content Team. Crescita del fotovoltaico 2023: il boom è reale. (Ottobre 2023). Tratto il 5 agosto 2024, 19:32 da https://sonnen.it/crescita-del-fotovoltaico-2023-il-boom-e-reale/.

Sorrentino, M. Fotovoltaico galleggiante: cos'è, come funziona e quando conviene. (8 maggio 2023). Tratto il 5 agosto 2024, 20:13 da https://www.fotovoltaicoin.it/fotovoltaico-galleggiante/.

Sperati S, Alessandrini S, D'Amico F, et al. A new Wind Atlas to support the expansion of the Italian wind power fleet. *Wind Energy*. 2024; 27(3): 298-316. doi:10.1002/we.2890. Tratto il 7 novembre 2024, 17:35 da https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.2890.

Terna S.p.A. Terna: nel 2023 consumi elettrici pari a 306.1 TWh. (22 gennaio 2024). Tratto l'11 novembre 2024, 13:10 da https://www.terna.it/it/media/comunicati-stampa/dettaglio/consumi-elettrici-2023.

Trapani, K.; Redón-Santafé, M. (2015). A review of floating photovoltaic installations: 2007 2013. Progress in Photovoltaics. 23(4):524-532. doi:10.1002/pip.2466. Tratto il 6 agosto 2024, 11:53 da https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/80704/FLOAT_REVIEW.pdf;jsessionid=EA313844B601A8E9BA25A852D1C44798?sequence=2.

UNEP-WCMC and IUCN, Protected Planet; The World Database on Protected Areas (WDPA)/The World Database on Other Effective Area-based Conservation Measures (WD-OECM)/The Global Database on Protected Areas Management

Effectiveness (GD-PAME)], October/2024, Cambridge, UK: UNEP-WCMC and IUCN. Tratto il 9 ottobre 2024, 20:07 da www.protectedplanet.net.

Wallace, A. et al. The photovoltaic effect. (19 giugno 1942). Tratto il 5 agosto 2024, 17:20 da https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/cr60098a004.

Woolway, R.I., Zhao, G., Rocha, S.M.G. et al. Decarbonization potential of floating solar photovoltaics on lakes worldwide. Nat Water 2, 566–576 (2024). Tratto il 19 agosto 2024, 19:30 da https://doi.org/10.1038/s44221-024-00251-4.

WWF. Aree protette. Tratto il 9 settembre 2024, 21:35 da https://www.wwf.it/dove-interveniamo/il-nostro-lavoro-in-italia/aree-protette/.

# Indice delle figure

Figura 0.1: Produzione elettrica da fonti rinnovabili nel mondo. ..... 2

Figura 1.1: Rappresentazione grafica effetto fotovoltaico. ..... 9

Figura 1.2: Componenti impianto fotovoltaico. ..... 11

Figura 1.3: Produzione di elettricità da energia solare nel mondo nel 2023. ..... 12

Figura 1.4: Componenti impianto fotovoltaico flottante. ..... 14

Figura 1.5: Centrale idroelettrica con FPV. ..... 17

Figura 3.1: Specchi d'acqua (DBPrior10k). ..... 35

Figura 3.2: Specchi d'acqua ottenuti dall'integrazione del DBPrior10k con il DBTR Emilia-Romagna. ..... 37

Figura 3.3: Distribuzione di frequenza della superficie degli specchi d'acqua (DBPrior10k-DBTR E.-R.). ..... 38

Figura 3.4: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua (DBPrior10k-DBTR E.-R.). ..... 39

Figura 4.1: Pianura (ISPRA). ..... 44

Figura 4.2: Carta geologica (MASE), tratti autostradali (DBPrior10k), fiumi principali e secondari (MASE). ..... 46

Figura 4.3: Generazione dei dati sintetici. ..... 49

Figura 4.4: Matrice di confusione. ..... 51

Figura 4.5: ROC curve. ..... 52

Figura 4.6: Laghi di cava. ..... 54

Figura 5.1: Aree protette in Italia (WDPA). ..... 57

Figura 5.2: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua vincolati (WDPA)..... 58

Figura 5.3: Specchi d'acqua non vincolati. ..... 59

Figura 5.4: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di specchi d'acqua non vincolati (WDPA)..... 60

Figura 5.5: Distribuzione di frequenza della natura degli specchi d'acqua non vincolati (WDPA)..... 60

Figura 5.6: Suddivisione degli specchi d'acqua nelle sette categorie in termini di numero. ..... 61

Figura 5.7: Suddivisione degli specchi d'acqua nelle sette categorie in termini di superficie..... 63

Figura 5.8: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di bacini artificiali non vincolati. ..... 64

Figura 5.9: Grandi dighe..... 66

Figura 5.10: Selezione delle grandi dighe. ..... 67

Figura 5.11: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di "specchi d'acqua-grandi dighe"..... 68

Figura 5.12: Suddivisione degli "specchi d'acqua-grandi dighe" nelle sette categorie in termini di numero. ..... 69

Figura 5.13: Suddivisione degli "specchi d'acqua-grandi dighe" nelle sette categorie in termini di superficie. ..... 69

Figura 5.14: Distribuzione di frequenza della superficie e cumulata del numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" con uso prevalente idroelettrico. ..... 71

Figura 5.15: Mappa DNI. ..... 74

Figura 5.16: Mappa Diff. ..... 75

Figura 5.17: Mappa GHI. ..... 76

Figura 5.18: Località italiane di tipo 1, 2 e 3 (Istat). ..... 82

Figura 5.19: Tratti di strada (DBPrior10k) ..... 84

Figura 5.20: Esempio di selezione di tratto autostradale interno al buffer. ..... 85

Figura 6.1: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione DNI. ..... 89

Figura 6.2: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione GHI. ..... 90

Figura 6.3: Numero di specchi d'acqua e superficie per intervalli di radiazione Diff. 90

Figura 6.4: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione DNI. ..... 91

Figura 6.5: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione GHI. ..... 91

Figura 6.6: Numero di "specchi d'acqua-grandi dighe" e superficie per intervalli di radiazione Diff. ..... 92

Figura 6.7: Esempio mappa punteggio complessivo. ..... 98

Figura 6.8: Distribuzione dello score degli specchi d'acqua nei tre scenari. ..... 100

Figura 6.9: Distribuzione dello score degli "specchi d'acqua-grandi dighe" nei tre scenari. ..... 100

# Indice delle tabelle

Tabella 3.1: Origine del dato. ..... 31

Tabella 3.2: Tipo di intersezione stradale. ..... 32

Tabella 3.3: Tipo di tratto stradale. ..... 32

Tabella 3.4: Natura dello specchio d'acqua. ..... 33

Tabella 3.5: Tabella di conversione categorie DBPrior10k e DBTR Emilia-Romagna. 36

Tabella 4.1: Punteggi distanza dal tratto autostradale/fiume principale o secondario più vicino. ..... 47

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva del numero di specchi d'acqua nelle sette categorie. 62

Tabella 5.2: Suddivisione specchi d'acqua non vincolati e loro superficie nelle sette categorie. ..... 63

Tabella 5.3: Suddivisione "specchi d'acqua-grandi dighe" e loro superficie nelle sette categorie. ..... 70

Tabella 5.4: Scenari considerati per il calcolo di *E*. ..... 80

Tabella 6.1: Punteggi utilizzo prevalente. ..... 88

Tabella 6.2: Punteggi radiazione solare. ..... 93

Tabella 6.3: Punteggi vento. ..... 94

Tabella 6.4: Punteggi distanza dalle cabine elettriche. ..... 95

Tabella 6.5: Punteggi accessibilità del sito. ..... 96

Tabella 6.6: Numero specchi d'acqua per punteggio. ..... 96

Tabella 6.7: Numero "specchi d'acqua-grandi dighe" per punteggio. ..... 96

Tabella 6.8: Numero specchi d'acqua per ogni punteggio complessivo. ..... 99

Tabella 6.9: Numero “specchi d'acqua-grandi dighe” per ogni punteggio complessivo. ..... 99

Tabella 7.1: Valori utili specchi d'acqua con superficie maggiore di 1 ha..... 102

Tabella 7.2: Valori utili “specchi d'acqua-grandi dighe” con superficie maggiore di 1 ha..... 103

Tabella 7.3: Risparmio di $CO_2$. ..... 104

Tabella 7.4: Numero specchi con potenziali impianti superiori a 3 ha e superficie complessiva per ogni Regione. ..... 105

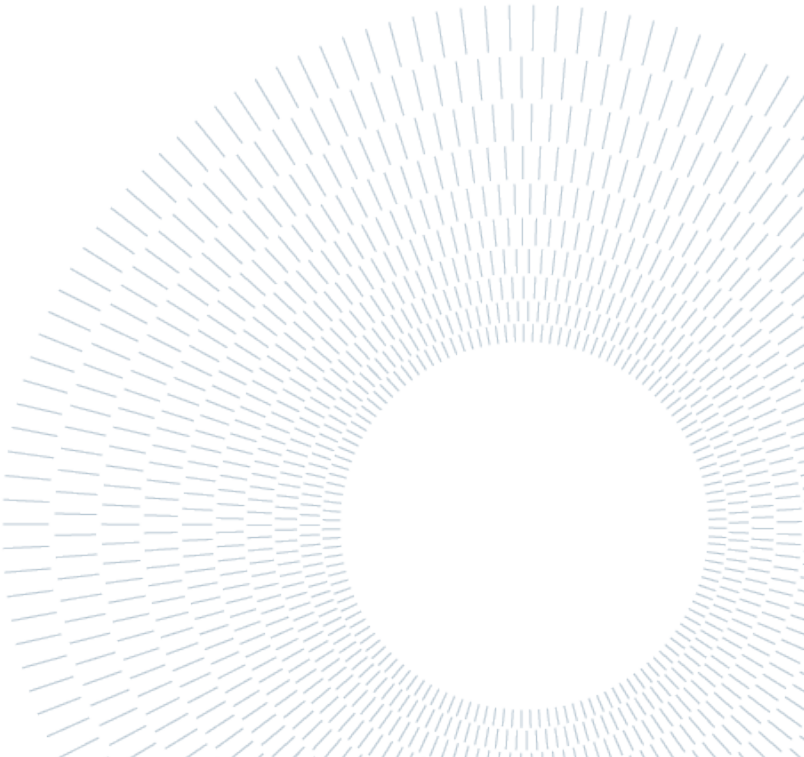



Tabella 7.5: Numero “specchi d’acqua-grandi dighe” con potenziali impianti superiori a 3 ha e superficie complessiva per ogni Regione. ..... 105