

1. MAPPE DELLA PRODUCIBILITÀ IDROELETTRICA A SCALA DI BACINO

3.1 Dati ed elaborazioni di base

L'attività ha riguardato la messa a punto e l'applicazione di una metodologia per la redazione di mappe della producibilità idroelettrica massima e residua. L'intento è quello di fornire ai diversi Soggetti ed Enti interessati all'idroelettrico, ed in particolare al mini-idroelettrico, uno strumento in grado di inquadrare in maniera rapida e sintetica le aree geografiche dove è maggiormente sviluppabile tale tipo di produzione.

Di seguito si presentano le basi teoriche della metodologia utilizzata per definire, innanzitutto, una mappa della disponibilità idrica e, successivamente per determinare il potenziale di produzione idroelettrica. Va evidenziato che l'unità fisiografica di analisi utilizzata è il bacino idrografico, in quanto il più rappresentativo della situazione idrologica. I risultati sono stati poi raggruppati a livello regionale e nazionale.

I dati di precipitazione utilizzati provengono dal database fornito dall'ex-Servizio Idrografico e dall'APAT.

3.1.1 Descrizione della metodologia utilizzata

Per stimare l'energia idroelettrica potenzialmente producibile in un bacino idrografico sono necessari due tipi di informazione: una stima della disponibilità della risorsa idrica, basata su dati storici di precipitazione, e la conformazione geo-morfologica del bacino. Ciò consente di ottenere, da una parte, una mappa della disponibilità idrica, con conseguenti informazioni di portata dei corsi d'acqua, dall'altra i salti geodetici, in modo da poter calcolare la producibilità massima.

Il passo successivo è quello di valutare l'effetto della "antropizzazione" sulla potenzialità teorica così calcolata. L'impatto dell'uomo sulla risorsa idrica si esplica infatti in utilizzazioni idriche di vario tipo, le quali sottraggono risorsa teoricamente utilizzabile per la produzione elettrica; si pensi ad esempio ai prelievi d'acqua per scopo potabile, industriale, irriguo oppure agli stessi prelievi di impianti idroelettrici esistenti: questi utilizzano volumi idrici prelevandoli direttamente dall'alveo del corso d'acqua, costituendo così delle limitazioni nell'ottica di sfruttamenti futuri.

Altro vincolo da tenere in considerazione è rappresentato dal Deflusso Minimo Vitale, la cui osservanza vieta uno sfruttamento "troppo spinto" del deflusso idrico naturale, imponendo ad ogni opera di captazione il rilascio di una portata naturalistica da garantire in ogni periodo dell'anno.

Da queste considerazioni emerge l'utilità di una metodologia appositamente sviluppata (ed implementata in modo sperimentale nella regione Basilicata), che consenta di valutare l'effetto di tali vincoli (prelievi e Deflusso Minimo Vitale) e di calcolare la potenzialità idroelettrica rispettosa degli stessi, indicata con il nome di "producibilità residua".

A questo scopo, l'area geografica dello studio è stata suddivisa in sottobacini (o bacini elementari), determinati in funzione della gerarchia dei corsi d'acqua e perimetrati sulla base di informazioni altimetriche ottenute da un Modello Digitale del Terreno (DEM). Il modello scelto per il presente lavoro è quello scaricabile liberamente dal sito <http://srtm.csi.cgiar.org/> e che è stato calcolato sulla base di dati elaborati dalla NASA. Esso presenta un passo orizzontale di 90 m (griglia quadrata) ed una risoluzione verticale dell'ordine del metro, che sono stati ritenuti sufficienti per il tipo di applicazione in oggetto.

La Figura 1 è una immagine a scala nazionale del DEM utilizzato come informazione di base per le elaborazioni delle caratteristiche territoriali della zona di studio. Si tenga presente che per tutte le elaborazioni è stato utilizzato un sistema di riferimento in coordinate UTM, fuso 32, proiezione WGS-84.

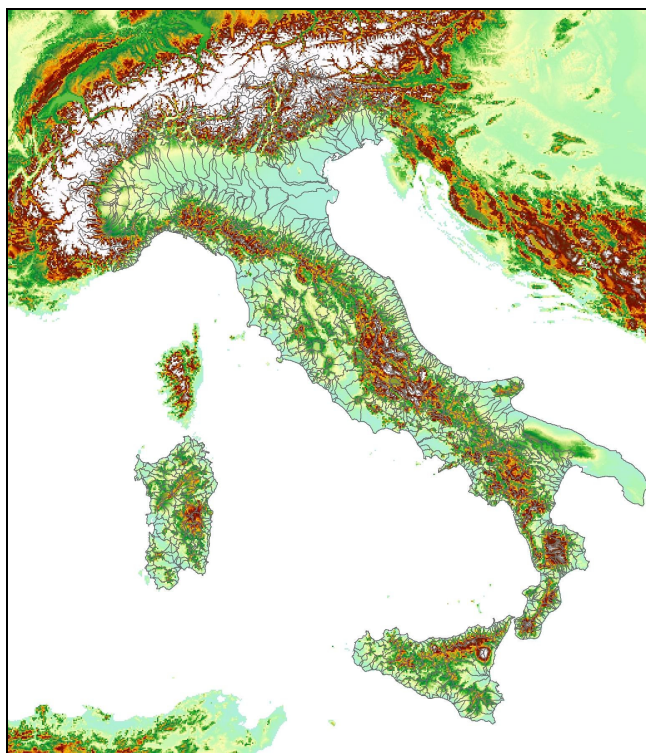


Figura 1 – Rappresentazione a scala nazionale del DEM utilizzato per le elaborazioni delle caratteristiche territoriali

Successivamente, per ogni bacino elementare sono state effettuate elaborazioni sui dati storici di pioggia (vedi paragrafo 3.1.2.2), allo scopo di definire una mappa delle precipitazioni, e sui dati territoriali, al fine di definire i salti geodetici.

A questo punto le informazioni sono state integrate ed elaborate, in modo da definire una mappa della producibilità idroelettrica massima e residua a livello di bacino elementare. Va evidenziato che tale calcolo tiene conto delle interazioni esistenti tra i vari bacini elementari che fanno riferimento allo stesso bacino idrografico.

Le diverse mappe dello studio sono state generate utilizzando un *tool* appositamente progettato e realizzato in un ambiente GIS (Sistema Informativo territoriale). Tale tool consente l'esecuzione automatica di elaborazioni alfanumeriche e grafiche, in modo da ottenere mappe tematiche rappresentanti i dati di interesse.

3.1.2 Elaborazione dei dati di base territoriali ed idrologici

3.1.2.1 Delimitazione dei bacini idrologici elementari

I macro-bacini e i bacini elementari sono stati delimitati a partire dal DEM, definendone i contorni in funzione delle pendenze del terreno, avvalendosi di specifiche funzioni del tool “*Hydrology Modeling*” della libreria di ArcGIS. Ciascun macro-bacino è stato suddiviso in ulteriori bacini elementari in funzione sia dell'ordine del corso d'acqua di riferimento che di tutta un'altra serie di parametri, tra cui la sua dimensione, la presenza di affluenti di una certa importanza o afferenti a un bacino di cospicue dimensioni.

Questa fase dell'attività è stata svolta manualmente tramite un processo di digitalizzazione, in modo da garantire un grado di dettaglio e precisione nella suddivisione in bacini elementari sempre adeguato. In definitiva, la perimetrazione di tutti i bacini imbriferi italiani è stata condotta sino al 3° ordine gerarchico per quanto concerne il reticolo idrografico, benché in alcuni casi si sia reso necessario considerare anche bacini elementari di ordine superiore.

Nella Figura 2 si riporta un esempio di suddivisione in bacini elementari, per la regione della Basilicata utilizzata quale caso applicativo pilota per la realizzazione della mappa di producibilità residua; oltre alla perimetrazione dei bacini, sono stati rappresentati anche il modello digitale del terreno e il reticolo idrografico al secondo ordine.

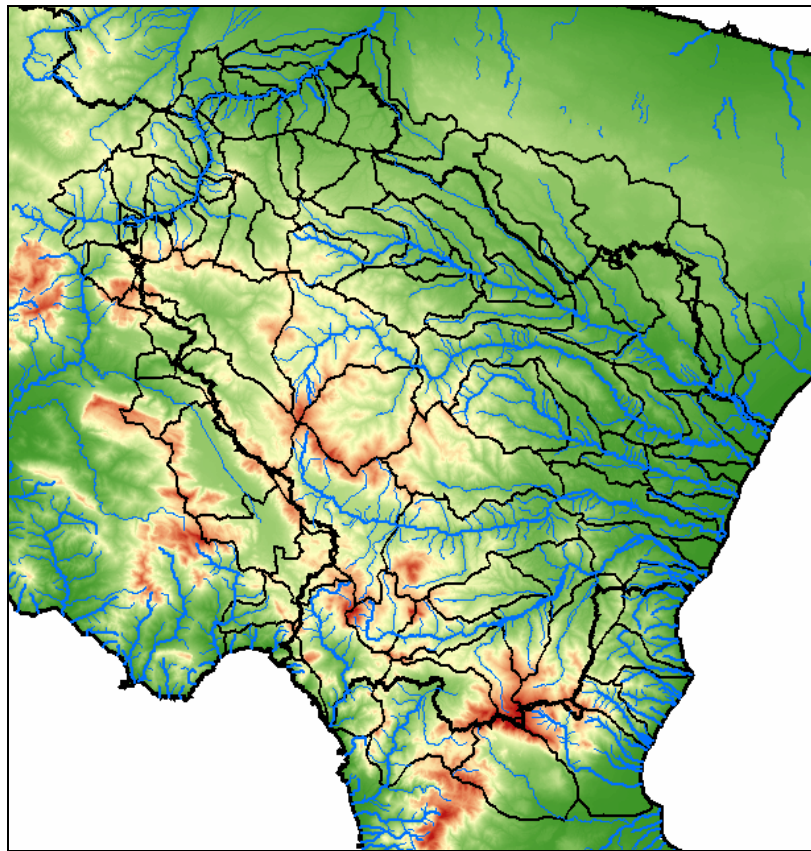


Figura 2 – Dettaglio della suddivisione in bacini elementari per la Basilicata

3.1.2.2 Metodologia per la stima della precipitazione media annua

Per la stima della producibilità potenziale il dato basilare, oltre alle proprietà morfologiche dei bacini imbriferi, è la distribuzione di precipitazione su ciascun bacino elementare.

La necessità di stimare per ciascun bacino idrografico il valore di precipitazione media annua, ed il reperimento di soli dati di pioggia discreti, hanno reso indispensabile la realizzazione di una carta delle precipitazioni in formato *raster*, in modo da poter disporre di un'informazione continua su tutto il territorio nazionale.

È stata quindi effettuata una spazializzazione di tipo orizzontale utilizzando come dato di input la carta delle isoiete medie annue e come metodo di interpolazione quello dello "*spline*". Tale metodo è basato su una funzione matematica che minimizza la curvatura dell'intera superficie ideale che passa esattamente per i diversi punti di osservazione (come se un foglio deformabile passasse attraverso tutti i punti di osservazione, con una minimizzazione della curvatura della stessa superficie).

Tale metodo deterministico, molto diverso concettualmente dai metodi geostatistici, quale ad esempio il "*Kriging*", fornisce dei buoni risultati in termini di rappresentazione delle superfici interpolate, paragonabili o addirittura sovrapponibili a quelle ottenute con lo stesso *Kriging*. È da osservare che quest'ultimo metodo fornisce delle informazioni aggiuntive, potenzialmente interessanti, circa le mappe di distribuzione degli errori e della deviazione standard delle variabili interpolate. Tuttavia, soprattutto per l'interpolazione spaziale di variabili per le quali si dispone di una serie di punti di osservazione

caratterizzata da una densità territoriale molto bassa, come nel caso di uno studio a scala nazionale, tali vantaggi vengono sostanzialmente meno, al punto da ottenere uguali risultati finali, ricorrendo ad interpolatori più semplici, quale è appunto lo *spline*.

L'ambiente software scelto per le elaborazioni è ArcGIS 9.0 di ESRI e il formato adottato per la carta delle precipitazioni è il formato GRID di ESRI. Il GRID è una matrice di celle ognuna delle quali rappresenta un'area e può contenere un valore descrittivo di una proprietà o caratteristica, come illustrato nella Figura 3. Nel nostro caso ogni cella del GRID contiene il valore di pioggia e tale valore è uniforme su tutta la cella.

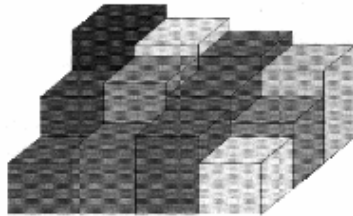


Figura 3 – Rappresentazione di un GRID

L'estensione "*Spatial Analyst*" di ArcGIS fornisce una serie di strumenti per l'analisi, la modellizzazione e l'interpolazione di dati spaziali, tra cui il metodo *spline* di ArcGIS.

I parametri da impostare sono i seguenti:

- Spline type: tipo di regolarizzazione, ovvero di controllo della curvatura
 - a) Regularized: controllo delle derivate terze
 - b) Tension: controllo delle derivate seconde;
- Weight: peso delle pseudo-equazioni di vincolo per la regolarizzazione. Pesì maggiori portano a superfici più rigide, ovvero simili a piani;
- Number of points: numero di campioni più vicini usati per calcolare i coefficienti delle spline. Più è alto il numero di punti e più la superficie interpolata è regolare;
- Output cell size: dimensione delle celle risultanti. La risoluzione deve essere congruente con i dati e con il fenomeno.

Come dati di input sono stati considerati i vertici (in formato shapefile) delle isoiete medie annue delle precipitazioni nel periodo 1950-1993 (1950-2004 per Sicilia e Sardegna), vale a dire i punti utilizzati per la digitalizzazione delle stesse. A ciascun punto è stato quindi assegnato il valore di precipitazione della relativa isoietta, come illustrato nella Figura 4.

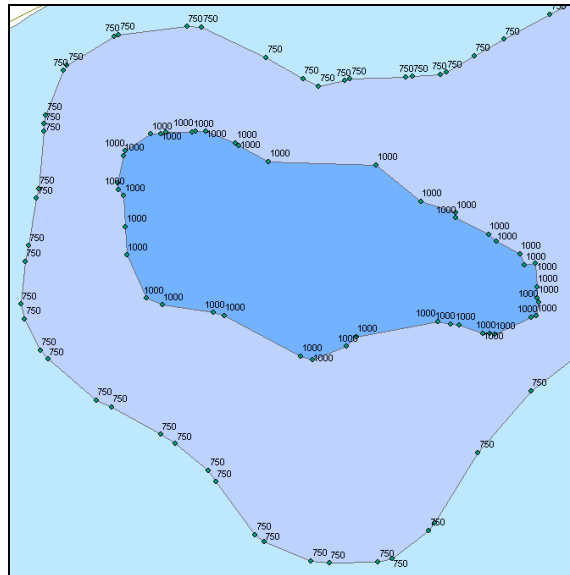


Figura 4 – Esempio di vertici delle isoiete utilizzati come dati di input del metodo *spline*

In particolare, per poter arrivare ad una stima degli afflussi medi annui reali è stato necessario descrivere in modo statisticamente accettabile le precipitazioni anche nelle aree extraregionali. Quali valori dei parametri delle *spline* sopra indicate sono stati assunti i seguenti:

- Spline type: regularized
- Weight: 0,5
- Number of points: 25
- Output cell size: 90 m

Una volta determinati i GRID della precipitazione come output delle *spline*, il valore di precipitazione media annua per ciascun bacino è stato ricavato utilizzando la funzione “*Zonal Statistics di Spatial Analyst*” di ArcGIS.

La funzione “*Zonal Statistics*” calcola infatti le statistiche (minimo, massimo, valore medio, deviazione standard, escursione e somma) dei valori di precipitazione media annua relativi alle celle che sono comprese all’interno di ogni singolo bacino idrografico. Ne deriva che la precipitazione media annua di ciascun bacino corrisponde alla statistica “*valore medio*” restituita dallo *Zonal Statistics* e tale valore è stato quindi riportato nel campo “*Pioggia_mm*” degli *shapefile* descrittivi i vari bacini idrografici.

3.1.2.3 Valutazione del coefficiente di deflusso superficiale

Come illustrato nel paragrafo precedente, è stato assegnato a ciascun bacino un dato significativo di precipitazione media annuale, determinato su una popolazione statisticamente significativa e tenendo conto, non solo dei dati rilevati dalle stazioni pluviometriche all’interno del bacino stesso, ma anche di quelli rilevati in bacini limitrofi. Dal valore di precipitazione media annuale è stato quindi possibile calcolare il dato di afflusso meteorico alla chiusura di ciascun bacino.

Tale coefficiente dipende ovviamente dalle caratteristiche geo-pedologiche del bacino e può variare, anche in modo notevole, da un bacino all’altro. In generale bacini di pianura a ridotta pendenza e con terreni prevalentemente permeabili presentano coefficienti di deflusso ridotti, mentre aree, ad esempio, montane, caratterizzate da forti pendenze e da terreni rocciosi ed impermeabili, mostrano coefficienti di deflusso elevati. Il valore massimo che può assumere il coefficiente di deflusso è 1 nei casi in cui tutta l’acqua precipitata defluisce alla chiusura di valle, mentre il valore minimo è 0 nel caso in cui tutta l’acqua di precipitazione viene assorbita dal terreno (terreni fortemente permeabili) o ristagna su di esso (pendenze ridotte).

Per quanto riguarda il coefficiente di deflusso medio di ciascun bacino elementare, ovvero il dato che rappresenta rispetto al valore di precipitazione media annuale la frazione che risulta ruscellata alla chiusura, si è fatto riferimento principalmente ai dati contenuti nei fascicoli del *Comitè de l'Energie Electrique Dèlègation Italienne, 1956* (. In alcuni casi il coefficiente di deflusso così definito è stato corretto, sulla base di indicazioni idrologiche e territoriali specifiche per ciascun bacino. È quindi possibile determinare il reale volume d'acqua defluito attraverso una data sezione di chiusura del bacino semplicemente moltiplicando l'afflusso meteorico per il coefficiente di deflusso.

3.1.2.4 Gerarchizzazione dei bacini imbriferi elementari

L'ultima informazione che completa il data-set necessario alla determinazione della producibilità idroelettrica potenziale, è costituito dalla *gerarchizzazione* dei bacini elementari. Con ciò si intende la necessità di individuare i bacini che si posizionano a monte di un altro bacino.

La producibilità idroelettrica dipende sia dal volume di precipitazione che cade all'interno del singolo bacino e che effettivamente scorre fino alla chiusura a valle dello stesso, sia dalla portata liquida proveniente da monte e quindi derivante dalla precipitazione sui bacini a monte di quello in esame.

Si è in questo caso ipotizzato che al più possano essere individuati tre bacini ricadenti immediatamente a monte del bacino in esame, in quanto si è assunto un numero massimo di confluenze pari a tre lungo i corsi d'acqua presi in considerazione (Figura 5); per individuarli nella banca dati territoriale sono stati inseriti appositi campi con degli identificativi univoci (ID_BACINO).

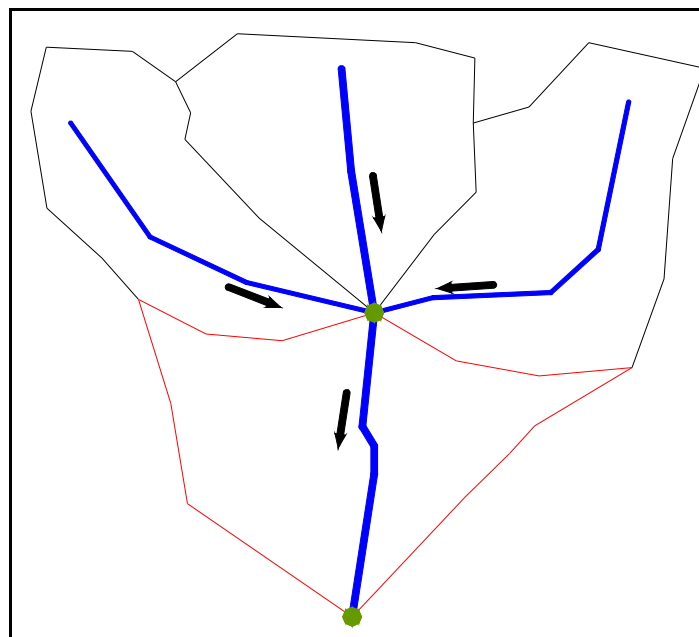


Figura 5 – Massimo numero di confluenze: il bacino di riferimento (rosso) presenta tre bacini immediatamente a monte.

Si sottolinea tuttavia che nel calcolo della producibilità energetica non sono stati considerati solamente i bacini immediatamente a monte, ma bensì tutti quei bacini che da monte convogliano acqua in cascata verso il bacino in esame.

Tutti i dati reperiti e calcolati sono disponibili in shapefiles di ArcGIS e vanno a comporre una sorta di database cartografico.

3.2 Calcolo della producibilità idroelettrica massima

Il compito dell'idroelettrico minore è essenzialmente quello di riuscire a sfruttare appieno il potenziale della risorsa idrica riuscendo ad inserirsi, qualora vi siano i presupposti tecnici ed economici, in particolari contesti ambientali.

Tuttavia per avere una stima del potenziale contributo energetico delle risorse idroelettriche disponibili è necessario un accurato studio d'indagine che tenga conto delle utilizzazioni d'acqua di vario tipo (potabile, industriale, energetico, irriguo, ecc) esistenti o impegnate per future concessioni.

A valle delle stime quantitative sono inoltre da tenere in conto, gli eventuali vincoli ecologici o ambientali che potrebbero limitare ulteriormente l'eventuale utilizzo della risorsa idrica.

Da queste considerazioni è possibile richiamare le due seguenti definizioni. Mentre la "producibilità idroelettrica massima" esprime la potenzialità di un bacino analizzandone la naturale disponibilità di acqua e la sua conformazione altimetrica; la "producibilità idroelettrica residua" esprime invece la potenzialità effettivamente sfruttabile, al netto dei prelievi esistenti e dei vincoli naturalistici.

Nei paragrafi che seguono verrà descritta la metodologia messa a punto per la stima della producibilità idroelettrica, sia massima che residua, previa una valutazione dei parametri di calcolo.

3.2.1 Parametri caratteristici dei bacini elementari

Una volta reso disponibile, in un unico shapefile, i dati di perimetrazione dei singoli bacini elementari, di precipitazione media annua al loro interno, del relativo coefficiente di deflusso e dell'indicazione dei bacini a monte, è stato possibile passare alla fase operativa vera e propria di determinazione della producibilità idroelettrica.

Attraverso una procedura algoritmica appositamente sviluppata in ambiente ArcGIS 9 si sono ottenute, per ciascuno dei bacini imbriferi elementari, le seguenti principali proprietà geomorfologiche:

- modello di elevazione del terreno (DEM);
- superficie;
- perimetro;
- altezza della sezione di chiusura;
- curva ipsografica (che descrive l'andamento della superficie del bacino alle varie quote in cui è stato suddiviso);
- altezza media (mediante un algoritmo di determinazione della media pesata della curva ipsografica);
- posizione geografica del punto di chiusura;
- distanza tra i punti di chiusura dei bacini ed i punti di immissione del corso d'acqua a monte.

3.2.2 Elaborazione dei dati di base per il calcolo della producibilità idroelettrica residua

Come definito sopra, per il calcolo della producibilità idroelettrica massima vengono utilizzati due tipi di informazione: la disponibilità idrica (deflusso) e la conformazione altimetrica del bacino.

La stima del potenziale residuo risulta più complessa. Innanzitutto richiede uno studio sul territorio ad una scala di maggior dettaglio, in modo da poter correttamente valutare, oltre agli aspetti energetici, tanto la "sostenibilità ambientale" dell'utilizzo della risorsa idrica quanto le utilizzazioni locali. A tale scopo è stata sviluppata una metodologia sulla base della portata liquida effettivamente utilizzabile, calcolata come l'intero deflusso sul bacino al netto di due termini:

- la portata che, a scopo naturalistico, deve essere garantita in alveo e che quindi non si può utilizzare (Deflusso Minimo Vitale, abbreviando DMV);
- gli utilizzi idrici esistenti, sotto forma di portate medie annue prelevate o restituite nei vari punti dei bacini analizzati.

La producibilità residua può dunque essere definita come la producibilità potenziale massima depurata della mancata producibilità dovuta al DMV e della producibilità della risorsa già utilizzata.

La Figura 6 rappresenta l'interfaccia utente utilizzata per la determinazione dei parametri geomorfologici e della producibilità idroelettrica. L'attivazione del tasto "Attivazione procedura di calcolo" in basso avvia la sequenza di calcoli prevista, rendendo possibile il controllo in tempo reale dello stato di avanzamento con l'ausilio del riquadro "Avanzamento procedura".

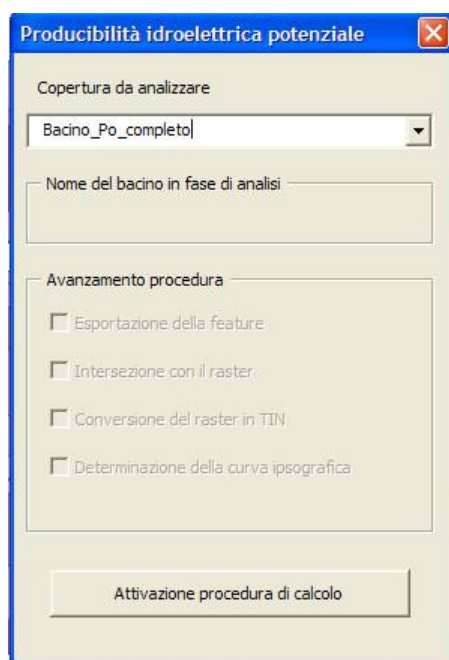


Figura 6 – Interfaccia utente della procedura automatizzata sviluppata in ambiente ArcGis per la determinazione della producibilità idroelettrica

La procedura sviluppata, una volta messi a disposizione i dati geomorfologici e pluviometrici di interesse, memorizzati in uno *shapefile* di ArcGIS adeguatamente strutturato, permette di determinare la producibilità massima e residua per ciascun bacino elementare, secondo le formulazioni descritte nei paragrafi seguenti.

3.2.2.1 Calcolo semplificato per la valutazione del DMV

Qualora a valle degli sbarramenti che vengono costruiti per poter derivare o invasare acqua, si determinassero condizioni di eccessiva scarsità idrica e/o asciutta per lunghi periodi di tempo e per lunghi tratti, si determinerebbero delle condizioni in contrasto con il mantenimento della vita acquatica. Si rende pertanto necessario arrivare ad una gestione delle risorse idriche che renda compatibili i diversi usi con la salvaguardia degli ecosistemi acquatici.

Per tale motivo è stato introdotto il concetto di Deflusso Minimo Vitale (DMV), definito come la quantità minima di acqua che deve essere assicurata per la sopravvivenza delle biocenosi acquatiche, e la salvaguardia del corpo idrico.

Appare dunque evidente come questo parametro possa influenzare la producibilità idroelettrica massima, in quanto rappresenta un vincolo (a volte particolarmente limitante) per ogni derivazione idrica.

Allo stato attuale, il quadro normativo di riferimento (spesso specifico del singolo bacino poiché amministrato dalle Autorità di Bacino locali) e/o il grande numero di variabili che determinano il DMV hanno reso impossibile l'applicazione di un metodo generalizzato di calcolo per tutto il territorio italiano. Tuttavia, la necessità di una formulazione che possa indistintamente essere adottata per ogni bacino in esame conduce all'assunzione di un'ipotesi semplificativa: nel presente studio si assume che il **DMV sia pari al 10% della portata idrologica media annua**.

Si definiscono i seguenti parametri:

$DMV = 0,1 \cdot Q_{idro}$ DMV del bacino di riferimento, calcolato sulla base della portata idrologica media annua Q_{idro} ;

$DMV_{monte} = \sum_i DMV_m^i$ DMV complessivo dei bacini che confluiscono da monte; la sommatoria \sum_i va eseguita su tutti i bacini a monte di quello in esame ($i = 0, \dots, n$);

ed inoltre, pur senza un significato pratico, ma necessario per le formulazioni che seguiranno, viene definita:

$DMV_{aff} = 0,1 \cdot Q_{aff}$ DMV ipotetico che avrebbero le portate medie annue afferenti ad un determinato bacino in esame (Q_{aff}).

3.2.2.2 Valutazione degli utilizzi d'acqua

La legge italiana sancisce che l'acqua è un bene pubblico e deve essere governato ed utilizzato secondo i principi della solidarietà e del risparmio idrico, garantendo prioritariamente l'uso umano, quindi quello agricolo e poi quello industriale. Recenti indagini mostrano che circa la metà delle risorse oggi disponibili è destinata a colmare il fabbisogno dell'agricoltura, il 20% soddisfa gli usi civili, il 20% è impiegato nell'industria, mentre il rimanente 10% nelle centrali termoelettriche (Protezione Civile Nazionale, 2003).

Al fine di poter calcolare il potenziale residuo, per ogni bacino elementare occorre conoscere gli utilizzi d'acqua, ossia le portate prelevate o restituite nelle diverse sezioni dei corsi idrici. Ad ogni prelievo d'acqua corrisponde infatti un "prelievo energetico", ossia una quantità di energia potenziale non sfruttabile, proporzionale al prodotto tra portata stessa e dislivello tra quota del prelievo e sezione di calcolo; analogamente, ad ogni restituzione corrisponde una quantità aggiuntiva di energia potenziale sfruttabile.

Per ogni punto di prelievo o restituzione occorre quindi conoscere sia il valore della portata media sia la quota sul livello del mare.

È importante distinguere fra l'acqua che è prelevata e l'acqua che è effettivamente consumata: una prima distinzione tra i prelievi d'acqua è appunto tra prelievi perdenti e prelievi non perdenti. Mentre i primi derivano una quantità d'acqua che viene totalmente consumata, al contrario i prelievi non perdenti prevedono la restituzione del volume prelevato, ovvero di una sua frazione. Ad esempio, l'irrigazione consuma la maggior parte dell'acqua prelevata (se non tutta), mentre le acque per uso civile ed industriale in media sono consumate solo, rispettivamente, per il 10% ed il 5% (la restante parte ritorna ai fiumi ed agli acquiferi in forma di refluo). Di particolare interesse i prelievi delle centrali idroelettriche: il 100% dell'acqua prelevata viene restituita più a valle attraverso le opere di scarico della centrale.

Gli utilizzi dell'acqua considerati sono:

- irriguo: spesso le opere destinate all'irrigazione sono considerate perdenti (si utilizza tutta l'acqua prelevata, non è quindi prevista una restituzione);
- potabile: in generale l'acqua destinata alle utenze prevede anche una restituzione, seppur quantitativamente inferiore;
- industriale: come per la potabile, anche le derivazioni industriali prevedono sia prelievo sia restituzione. Tuttavia la portata restituita può essere notevolmente inferiore a quella derivata, in base alla tipologia dell'industria ed all'utilizzo specifico della risorsa idrica (cicli di raffreddamento, acqua di controlavaggio, ecc.);
- idroelettrico: di norma è identificabile una o più sezioni di presa ed una di restituzione, e tutta la portata prelevata viene successivamente restituita in un punto a valle.

Per quanto concerne il posizionamento dei punti di prelievo/restituzione, i casi possibili sono i seguenti:

- portate prelevate dal bacino e restituite fuori dalla regione di studio;
- portate prelevate dal bacino che non tornano nel ciclo idrico puntuale;
- portate prelevate dal bacino e restituite nello stesso bacino ad altre quote;
- portate prelevate dal bacino e restituite in altro bacino alla stessa quota o a quote diverse;
- portate restituite nel bacino, provenienti da altre regioni;
- portate restituite nel bacino, provenienti da altri bacini.

La Tabella 1 mostra, a titolo di esempio, come nel presente studio vengono strutturati i dati riguardanti gli utilizzi dell'acqua.

(1) Nome concessione/utilizzo	(2) Bacino n.	(3) Punto di prelievo o restituzione	(4) Q media annua di prelievo o restituzione (m ³ /s)	(5) Quota sul livello del mare del punto di prelievo o restituzione (m slm)	(6) Nota
impianto idroelettrico ZZZ	18	p	2.4	1832	
impianto idroelettrico ZZZ	18	r	2.4	1740	
Impianto idroelettrico XXXX	21	p	1.2	2340	
Impianto idroelettrico XXXX	21	p	3	1340	
Impianto idroelettrico XXXX	21	p	1	2000	
Impianto idroelettrico XXXX	21	p	4	1800	
Impianto idroelettrico XXXX	21	r	9.2	1000	
Impianto idroelettrico YYYY	30	p	1.2	2000	
Impianto idroelettrico YYYY	22	p	4	2100	
Impianto idroelettrico YYYY	21	r	5.2	1800	
Consorzio Irriguo XXX	21	p	3	900	
Preso d'acqua perdente YYZZ	19	p	2.1	1230	
Preso d'acqua con restituzione ZZZZ	20	p	2.6	1200	
Preso d'acqua con restituzione ZZZZ	20	r	0.26	1200	
Uso industriale XX	20	p	1.2	1220	
Uso industriale XX	19	p	1	1230	
Uso industriale XX	19	r	0.8	1215	
Acquedotto e depurazione ZZZZ	31	p	2	600	
Acquedotto e depurazione ZZZZ	31	p	2	620	
Acquedotto e depurazione ZZZZ	31	r	1.8	580	
Acquedotto e depurazione ZZZZ	31	r	1.7	590	

Tabella 1 – Utilizzi dell’acqua: dati di interesse.

Nella colonna (1) è indicato il nome dell’utilizzo/derivazione/concessione. Ogni utilizzo potrebbe occupare più di una riga in funzione della quantità di prelievi/restituzione nella Regione.

Nella colonna (2) è indicato il bacino di appartenenza del punto della colonna (1), seguendo la numerazione dei bacini.

Nella colonna (3) è indicato se si tratta di un prelievo (estrazione di portata dal bacino) oppure una restituzione (immissione di portata nel bacino).

Nella colonna (4) è indicato il valore della portata media annua in m³/s, con segno positivo nel caso di prelievo, con segno negativo nel caso di restituzione. Tale valore è stato calcolato come il rapporto tra il volume annuo prelevato/restituito ed il numero di secondi compresi in un anno.

Nella colonna (5) è indicata la quota del livello medio idrico nella presa o la quota della restituzione, in m slm, arrotondata al decimo di m.

Indicando con “q” la singola portata prelevata (segno +) o restituita (segno -), e con il pedice "j" il generico punto della rete di drenaggio, attraverso la notazione Σq_j si indica la somma delle portate derivate e restituite di un determinato bacino (la sommatoria Σ_j va dunque eseguita su tutti i punti dove esiste una derivazione o restituzione di portata, all’interno del bacino in esame).

3.2.3 Schematizzazione del bacino: portate idrologiche e portate antropizzate

La Figura 7 mostra l’esempio tipico di un bacino di riferimento, compreso tra i punti A e B, con a monte tre distinti bacini idrografici considerati terminali (ossia senza apporti provenienti da monte). I corsi d’acqua di questi tre bacini confluiscono nel bacino di valle attraverso il punto A, detto *punto di chiusura di monte* (di quota H_{monte_chi}); analogamente il bacino di riferimento è delimitato inferiormente dal punto B, chiamato semplicemente *punto di chiusura* (di quota H_{chiusura}).

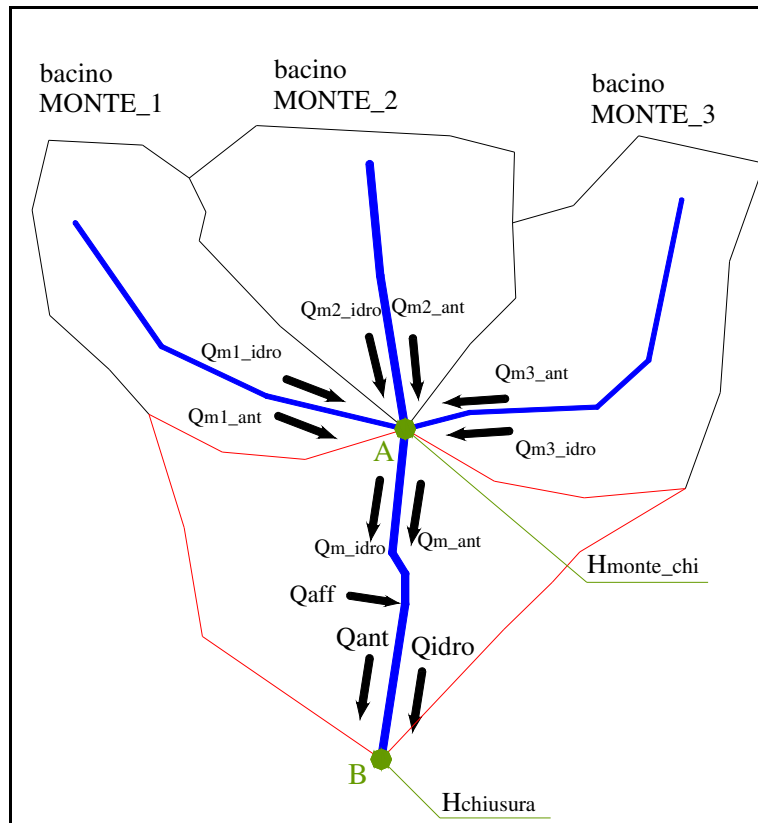


Figura 7 – Schematizzazione dei bacini per la valutazione del potenziale residuo.

Per il bacino di riferimento vengono distinti tre diverse tipologie di portata:

- Portata afferente: $Q_{aff} = A \cdot p \cdot cd$

pari alla portata afferente al bacino (deflusso), senza considerare gli eventuali utilizzi d'acqua. È data dal prodotto tra superficie del bacino (A), pioggia lorda annua (p) e coefficiente di deflusso (cd);

- Portata idrologica: $Q_{idro} = Q_{aff} + Q_{m_idro}$

pari alla portata idrologica in chiusura al bacino, senza considerare gli eventuali utilizzi d'acqua. La Q_{idro} è pari alla somma della portata afferente e della portata idrologica di monte;

- Portata antropizzata: $Q_{ant} = Q_{aff} + Q_{m_ant} - \sum_j q_j$

è il dato di portata che considera sia l'effetto dovuto all'utilizzo della risorsa idrica all'interno del bacino stesso (portate prelevate "+q" e restituite "-q") sia il contributo antropizzato di monte.

Si possono definire tre coppie di portate provenienti dai bacini immediatamente a monte:

- Q_{m1_idro} portata idrologica totale in chiusura del bacino MONTE_1 ,
- Q_{m1_ant} portata antropizzata totale in chiusura del bacino MONTE_1 ,
- Q_{m2_idro} portata idrologica totale in chiusura del bacino MONTE_2 ,
- Q_{m2_ant} portata antropizzata totale in chiusura del bacino MONTE_2 ,
- Q_{m3_idro} portata idrologica totale in chiusura del bacino MONTE_3 ,
- Q_{m3_ant} portata antropizzata totale in chiusura del bacino MONTE_3 ,

la cui somma fornisce le portate idrologiche ed antropizzate totali provenienti dai bacini di monte ed afferenti nel punto di chiusura A:

$$Q_{m_ant} = Q_{m1_ant} + Q_{m2_ant} + Q_{m3_ant} ,$$

$$Q_{m_idro} = Q_{m1_idro} + Q_{m2_idro} + Q_{m3_idro} .$$

Una procedura automatizzata, sviluppata sulla base della gerarchizzazione dei bacini, permette di calcolare le portate idrologiche ed antropizzate totali di ogni corso d'acqua, partendo dai bacini terminali di monte e proseguendo verso valle in cascata: infatti le portate Q_{idro} e Q_{ant} del bacino di riferimento diventeranno le portate di monte per un eventuale bacino a valle del punto di chiusura B.

3.2.4 Metodologia per il calcolo della producibilità massima e residua

3.2.4.1 Premesse metodologiche

Per il calcolo della producibilità idroelettrica si ipotizza che il volume d'acqua alla chiusura di valle di un determinato bacino che potrebbe essere sfruttato, derivi in parte dal deflusso del bacino (producibilità propria dovuta alla portata afferente al bacino corrente, detta Q_{aff}) ed in parte dall'apporto proveniente dai bacini di monte rispetto a quello in esame (producibilità di monte).

Dunque, la determinazione della producibilità idroelettrica totale è ottenuta dalla somma delle due componenti di producibilità:

- la producibilità propria di bacino;
- la producibilità derivante dalle portate dei bacini a monte.

Riassumendo, la producibilità è divisa in due contributi:

propria (pedice *pro*): considera la portata del solo bacino in esame;

di monte (pedice *m*): considera, per il bacino in esame, le portate provenienti dai bacini di monte;

che insieme danno origine alla producibilità:

totale (pedice *tot*): somma dei contributi proprio e di monte.

Ognuno di questi tre termini può essere a sua volta classificato come:

producibilità massima (pedice *max*), pari all'energia totale producibile senza considerare né DMV né prelievi;

producibilità "ecologica" (pedice *dmv*), ossia l'energia producibile tenendo conto del vincolo imposto dal DMV;

producibilità residua (pedice *res*), ossia l'energia producibile con la portata effettivamente prelevabile, considerando cioè sia il DMV sia i prelievi/restituzioni.

Vi è inoltre un ulteriore termine, ossia l'energia prelevata (pedice *prel*) relativa ad un determinato bacino, proporzionale alla sommatoria del prodotto tra il valore della portata di prelievo ed il salto esistente tra quota di prelievo e quota della sezione di chiusura del bacino. Questo parametro esprime, per il bacino in cui è calcolata, una misura della differenza tra la producibilità propria massima e quella propria residua, ed indica per definizione la producibilità idroelettrica corrispondente ai prelievi che interessano il bacino.

Si evidenzia che, nel caso di restituzioni di portata, la producibilità residua ottenibile viene incrementata: in tal caso l'energia propria residua può essere maggiore dell'energia propria massima.

Per rapportare l'energia producibile con le dimensioni del bacino in esame, o meglio del corso d'acqua principale che lo percorre, è infine definita la **producibilità specifica** (pedice *sp*). Nelle formule dell'energia specifica vengono separati i due differenti contributi di energia: quello proprio del bacino di riferimento e quello di monte. L'energia proveniente dalle portate di monte viene rapportata alla distanza L , corrispondente allo sviluppo strutturale di un ipotetico impianto che preleva acqua nel punto di immissione dei bacini che confluiscono a monte e la restituisce nella sezione di chiusura del bacino

corrente (ossia la distanza tra i punti A e B di Figura 7); l'energia propria è invece rapportata ad una distanza equivalente, definita come la radice quadrata della superficie del bacino.

3.2.4.2 Considerazioni sulla metodologia per il calcolo della producibilità idroelettrica

L'energia di monte viene calcolata attraverso le portate che arrivano da monte ed il salto che compiono all'interno del bacino in esame, dato dalla differenza tra la quota con cui entrano nel bacino corrente (H_{monte_chi}) e la quota di chiusura del bacino stesso ($H_{chiusura}$).

L'energia propria del bacino è stata invece calcolata attraverso delle ipotesi semplificative. Infatti la producibilità idroelettrica in un generico punto i all'interno del bacino, rispetto alla sezione di chiusura del bacino stesso, risulta pari a:

$$E_{pro_max_i} = Conv \cdot g \cdot \eta \cdot A_i \cdot p_i \cdot cd_i \cdot (H_i - H_{chiusura}) = Conv \cdot g \cdot \eta \cdot Q_{aff_i} \cdot (H_i - H_{chiusura})$$

dove Q_{aff_i} e H_i sono rispettivamente portata afferente (si ricorda che $Q_{aff_i} = A_i \cdot p_i \cdot cd_i$) e quota altimetrica calcolati nella generica area elementare i .

Si deduce che la potenzialità dell'intero bacino si ricava attraverso la sommatoria dei singoli contributi delle N aree elementari che compongono il bacino:

$$E_{pro_max} = Conv \cdot g \cdot \eta \cdot \sum_i [A_i \cdot p_i \cdot cd_i \cdot (H_i - H_{chiusura})]$$

dove i indica l'area elementare del bacino, e varia tra 1 ed N generico.

Tuttavia, considerando il bacino come entità fisica di base, si può ipotizzare che abbia un unico valore di precipitazione (p) e di coefficiente di deflusso (cd), uniformemente distribuiti tra le aree elementari al suo interno:

$$\begin{aligned} p_i &= p = \text{costante} \\ cd_i &= cd = \text{costante} \end{aligned}$$

Inoltre, attraverso una media pesata della curva ipsografica (che indica l'andamento della superficie del bacino in funzione della quota) è possibile individuare il valore di quota media nel bacino (H_{media}).

Si conclude dunque che:

$$E_{pro_max} = Conv \cdot g \cdot \eta \cdot p \cdot cd \cdot \sum_i A_i \cdot cd_i \cdot (H_i - H_{chiusura}) = Conv \cdot g \cdot \eta \cdot Q_{aff} \cdot (H_{media} - H_{chiusura})$$

Per quanto riguarda l'efficienza di conversione dell'energia potenziale in energia idroelettrica, ovvero l'efficienza dell'impianto di generazione η , è stato considerato un valore medio pari a 0.8.

Infine, per trasformare la potenza in energia (espressa in GWh/anno) è stato utilizzato un coefficiente di conversione $Conv$ pari a $24 \cdot 365 \cdot 10^{-6}$.

Preliminarmente ai cicli iterativi di calcolo della producibilità propria e di monte, la procedura provvede a determinare per ogni bacino elementare il DEM della porzione di territorio che ad esso compete e la sua curva ipsografica.

L'insieme dei dati geomorfologici e pluviometrici e il dato di massima producibilità annua da questi ricavata per ciascun bacino imbrifero elementare, è stato inserito nel database collegato ai tematismi che rappresentano i contorni dei bacini imbriferi, ed è dunque facilmente consultabile e rappresentabile attraverso un sistema GIS.

3.2.4.3 Formule per il calcolo della producibilità massima e residua

La procedura sviluppata, una volta messi a disposizione i dati di interesse, memorizzati in uno *shapefile* di ArcGIS adeguatamente strutturato, permette di determinare le varie producibilità sopradescritte, secondo le seguenti formulazioni:

$$\begin{aligned}Epro_max &= Conv \cdot g \cdot Qaff \cdot (Hmedia - Hchiusura) \\Epro_dmv &= Conv \cdot g \cdot (Qaff - DMVaff) \cdot (Hmedia - Hchiusura) \\Eprel &= Conv \cdot g \cdot \sum_j q_j \cdot (h_j - Hchiusura) \\Epro_res &= Epro_dmv - Eprel\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Em_max &= Conv \cdot g \cdot Qm_idro \cdot \Delta monte_chi - Hchiusura \\Em_dmv &= Conv \cdot g \cdot (Qm_idro - DMVmonte) \cdot \Delta monte_chi - Hchiusura \\Em_res &= Conv \cdot g \cdot (Qm_ant - DMVmonte) \cdot \Delta monte_chi - Hchiusura\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Etot_max &= Epro_max + Em_max \\Etot_dmv &= Epro_dmv + Em_dmv \\Etot_res &= Epro_res + Em_res\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Esp_max &= 10^3 \cdot Epro_max / Superficie^{0,5} + Em_max / L \\Esp_dmv &= 10^3 \cdot Epro_dmv / Superficie^{0,5} + Em_dmv / L \\Esp_res &= 10^3 \cdot Epro_res / Superficie^{0,5} + Em_res / L\end{aligned}$$

$$Per_tot = (Esp_max - Esp_res) / Esp_max$$

dove:

Epro_max	è il valore del massimo potenziale energetico proprio annuo (del solo bacino di riferimento, senza considerare i bacini di monte), calcolato con tutta la portata teoricamente disponibile, in GWh/anno;
Epro_dmv	è il valore del potenziale energetico proprio annuo (del solo bacino di riferimento, senza considerare i bacini di monte), calcolato tenendo conto del DMV, in GWh/anno;
Eprel	è il valore del potenziale energetico annuo corrispondente alle portate prelevate o restituite nel bacino corrente, in GWh/anno;
Epro_res	è il valore del potenziale energetico proprio annuo (del solo bacino di riferimento, senza considerare i bacini di monte), calcolato tenendo conto del DMV e dei prelievi di portata, in GWh/anno;
Em_max	è il valore del massimo potenziale energetico annuo derivato dalle portate provenienti dai bacini di monte, calcolato con tutta la portata teoricamente disponibile, in GWh/anno;
Em_dmv	è il valore del potenziale energetico annuo, derivato dalle portate provenienti dai bacini di monte, calcolato tenendo conto del DMV, in GWh/anno;
Em_res	è il valore del potenziale energetico annuo derivato dalle portate provenienti dai bacini di monte, calcolato tenendo conto del DMV e dei prelievi di portata, in GWh/anno;
Etot_max	è il valore del massimo potenziale energetico totale del bacino di riferimento, considerando anche l'energia associata alla portata dei bacini di monte, calcolato con tutta la portata teoricamente disponibile, in GWh/anno;

Etot_dmv	è il valore del potenziale energetico totale del bacino di riferimento, considerando anche l'energia associata alla portata dei bacini di monte, calcolato tenendo conto del DMV, in GWh/anno;
Etot_res	è il valore del potenziale energetico totale del bacino di riferimento, considerando anche l'energia associata alla portata dei bacini di monte, calcolato tenendo conto del DMV e dei prelievi di portata, in GWh/anno;
Esp_max	è il valore del massimo potenziale energetico annuo specifico per unità di lunghezza, calcolato con tutta la portata teoricamente disponibile, in GWh/anno/km;
Esp_dmv	è il valore del potenziale energetico annuo specifico per unità di lunghezza, calcolato tenendo conto del DMV, in GWh/anno/km;
Esp_res	è il valore del potenziale energetico annuo specifico per unità di lunghezza, calcolato tenendo conto del DMV e dei prelievi di portata, in GWh/anno/km;
Per_tot	indica la perdita di energia, ossia la frazione dell'energia massima teoricamente disponibile che non è sfruttabile a causa del DMV e dei prelievi di portata;
Conv	pari a $24 \cdot 365 \cdot 10^{-6}$ (=0.00876), è il coefficiente di conversione per ottenere la producibilità idroelettrica potenziale in termini di GWh/anno;
Hmedia	è l'altezza media del bacino corrente, determinata dalla media integrale dell'andamento della curva ipsografica;
Hchiusura	è l'altezza della chiusura del bacino di riferimento;
Hmonte_chi	è l'altezza di chiusura dei bacini di monte (rispetto al bacino corrente);
Superficie	è la superficie del bacino corrente, espressa in m ² ;
L	è la distanza tra la chiusura dei bacini di monte e la chiusura del bacino corrente, in km;
g	è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s ²);
η	è l'efficienza energetica del sistema di conversione idroelettrica, posta pari a 0.8;
q_j	sono le portate derivate dal bacino corrente (+) o restituite nel bacino corrente (-) nel punto j della rete di drenaggio;
h_j	sono le altezze sul livello del mare dei punti j della rete di drenaggio dove le portate vengono derivate o restituite.

Nel capitolo 3.3 si provvederà ad illustrare i risultati dell'attività ottenuti dall'applicazione della metodologia sopra descritta.

3.3 Risultati

Nei paragrafi successivi si riportano i risultati delle applicazioni delle metodologie precedentemente esposte per il calcolo del potenziale idroelettrico massimo e del potenziale residuo.

3.3.1 *Producibilità idroelettrica massima: mappe ed elaborati risultanti dallo studio*

I dati di producibilità massima, ottenuti applicando la procedura descritta nel §3.2.4, sono stati rappresentati considerando tutto il territorio nazionale.

I tematismi relativi alla producibilità idroelettrica annua, alla precipitazione media annua ed alla producibilità idroelettrica specifica per chilometro quadrato di superficie di bacino, sono stati sovrapposti ad alcuni altri tematismi cosiddetti di “*vestizione*” utili a individuare meglio le aree geografiche nazionali.

In particolare, i confini di Regione e di Provincia, i toponimi dei capoluoghi di Provincia e la rete idrografica nazionale (fiumi principali e laghi) si sono sovrapposti ai tematismi specifici dello studio.

Le Tavole 1, 2 e 3 in Allegato 1 alla presente relazione illustrano a scala nazionale rispettivamente:

- Precipitazione media annuale, in mm di pioggia;
- Producibilità idroelettrica massima annuale, espressa in GWh/anno;
- Producibilità idroelettrica massima annuale specifica per unità di superficie di bacino, espressa in GWh/anno/km.

Si può osservare che le zone di più elevato potenziale si localizzano lungo l'arco alpino ed in certi bacini appenninici, dove sono presenti elevati dislivelli geodetici e condizioni meteo-climatiche locali caratterizzate da precipitazioni consistenti.

Il valore complessivo della producibilità idroelettrica massima, ottenuto con la metodologia sopra menzionata, è di circa 190000 GWh/anno; si tenga presente che il dato considera un rendimento complessivo dell'impianto pari a 80%.

La sovrapposizione, alla mappa di producibilità idroelettrica potenziale massima annuale, di una mappa corrispondente alla produzione idroelettrica attuale, potrebbe consentire di formulare considerazioni preliminari e speditive sull'opportunità di localizzare nuovi impianti, in particolare mini-idroelettrici, sul territorio italiano.

In Allegato 2 sono illustrate le mappe regionali di producibilità idroelettrica massima.

Per quanto riguarda la mappa della producibilità idroelettrica massima annuale presentata nella tavola 2 in Allegato 1, essa costituisce un quadro di riferimento della potenzialità del territorio in termini di producibilità idroelettrica.

La tavola 3 dell'Allegato 1 rappresenta invece la producibilità idroelettrica massima specifica, ossia per unità di lunghezza, e costituisce quindi un dato che evidenzia la capacità produttiva.