

Simone Cerroni
Lorenzo Venzi

*Dipartimento di Ecologia e Sviluppo
Economico Sostenibile, Università
degli Studi della Tuscia,
scerroni@unitus.it
lvenzi@unitus.it*

*Parole chiave: parco eolico, impatto
visivo, valutazione economica di sito*
*Key words: wind farm, visual impact,
economic evaluation of sites*

Confronto tra diverse localizzazioni di un impianto eolico contemperando produttività ed impatto visivo*

This paper proposes a series of variations in designing the location of a wind farm on Monti della Tolfa. These project solutions aim at mitigating the visual impact caused by the wind aerogenerators. Besides the usual location of the wind aerogenerators on the skyline, these alternatives within the project design relate to the placement of wind turbines in the middle and at the bottom of the hillside. Other possible mitigation forms relate to the dimensions and the colour of the wind towers. This study proposes both a non-monetary and monetary analysis of the visual impact related to each project proposal. The final aim of the paper is to analyze economic and financial costs-benefits for each alternative to find out the economic optimal solution.

L'orientamento verso le fonti di energia rinnovabili è stato promosso, durante il Consiglio europeo del 8-9 marzo 2007. In questa circostanza, sono stati rivisti gli obiettivi riguardanti la riduzione di emissione di gas serra prestabiliti dal Protocollo di Kyoto. A seguito del suddetto Consiglio europeo è stato deciso che i paesi sviluppati dovrebbero cercare di raggiungere il cosiddetto obiettivo del 20%-20%-20% entro il 2020. Esso consiste: in una riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra dell'ordine del 20%; in un aumento del 20% della quota di energia prodotta da fonti rinnovabili ed un incremento del risparmio energetico del 20%.

Tra le energie derivanti da tali risorse, l'energia eolica risulta essere una di quelle potenzialmente più sfruttate in ambito nazionale ed europeo.

Oltre ad essere promossa a livello normativo, la produzione di energia elettrica attraverso un parco eolico risulta essere un'ottima soluzione in quanto comporta numerosi benefici di carattere socio-economico. Innanzitutto, viene incentivata la produzione autonoma di energia, con un derivante decremento delle importazioni di fonti primarie dall'estero e con una conseguente riduzione della dipendenza energetica da altri paesi. Nel contempo, sarebbe riscontrabile una diversificazione delle fonti energetiche sfruttate, con una riduzione della vulnerabilità del sistema

* Il lavoro è stato svolto in collaborazione dagli autori. In particolare i paragrafi 1 e 5 sono stati redatti da entrambi gli autori, mentre il resto del lavoro è opera di S. Cerroni. Si ringraziano i due anonimi *referee* per i preziosi commenti.

energetico nazionale. Ancora, lo sviluppo dell'eolico nel nostro paese rappresenta una ricca fonte di sviluppo per le regioni più svantaggiate del Mezzogiorno, in cui il potenziale eolico risulta particolarmente rilevante, come sottolineato in uno speciale documento sull'energia eolica pubblicato nei Quaderni di Sviluppo Lazio del 2004 (<<http://www.sviluppo.lazio.it/>>).

A livello locale, altri tipi di benefici consistono nei servizi derivanti dall'affitto e dalla percentuale sulla produzione, dovuta all'amministrazione comunale dalla Società che realizza l'impianto. Il settore eolico potrebbe potenzialmente apportare vantaggi anche dal punto di vista occupazionale. Alcune delle opere connesse all'installazione di un parco eolico (apertura di cantieri per la realizzazione di opere accessorie, per esempio la rete viaria) potrebbero generare la creazione di nuovi posti di lavoro. La costruzione di un parco eolico potrebbe essere associata ad un rilancio del territorio, grazie alla valorizzazione del patrimonio esistente, tramite la istituzione di percorsi storico-naturalistici, integrati con percorsi di interesse tecnologico, e grazie alla nascita di un indotto secondario, dovuto alla presenza di visitatori.

L'installazione di una *wind farm* provoca anche esternalità negative, tra cui: le interferenze sulle telecomunicazioni, la creazione di campi elettrici e magnetici e l'impatto acustico generato dagli aerogeneratori. Questi aspetti non sono considerati di prioritaria importanza, in quanto gli svantaggi, che producono, sono praticamente irrilevanti. Inoltre, la costruzione di un parco eolico provoca esternalità negative su alcune componenti della matrice ambientale. Gli impatti provocati sull'atmosfera, sulla situazione pedologica, geologica e geomorfologica, sull'idrologia, sulla vegetazione e sulla fauna (esclusa l'avifauna) della zona occupata dal parco eolico, risultano essere molto modesti. Tali interferenze negative sono poco significative, sia in fase di costruzione, che in fase di esercizio, come riportato dall'opuscolo ENEA n. 19 del 2003 (<<http://www.enea.it/>>).

Gli impatti principali riguardano l'avifauna ed il paesaggio. Per quanto riguarda l'avifauna è possibile effettuare una distinzione tra impatto indiretto e diretto. Il primo consiste nella presenza antropica e nel rumore prodotto durante le attività di cantiere, nonché nella scomparsa di habitat, molto spesso, strettamente correlata alla perdita di copertura vegetale. L'impatto diretto consiste nell'alterazione del campo sonoro, dovuta al ronzio generato dal movimento delle pale, dalla perturbazione del campo aerodinamico e dalla morte degli uccelli per collisione con le turbine (Barra, Piazzì e Arena 2000).

Il problema più grande connesso all'installazione delle *wind farm* risulta essere l'impatto visivo, che gli aerogeneratori generano sulla qualità del paesaggio dell'area in cui tali strutture vengono progettate. Per impatto visivo si intende l'insieme degli effetti sulla qualità della visuale, che una qualsiasi struttura provoca nell'ambiente in cui viene inserita. Quando l'intrusione determina un deterioramento della qualità visiva del paesaggio allora si parla di danno visivo (Gisotti, Fabbri e Quoiani 1998).

Il presente contributo si pone come principale finalità quella di verificare diverse ipotesi di posizionamento alternativo di un parco eolico, che possano risultare meno impattanti dal punto di vista visuale. Esso non presenta l'obiettivo di pervenire ad un giudizio finale compiuto di convenienza, ma sviluppa semplice-

mente una serie di considerazioni tutte da verificare ulteriormente in merito allo scarto di produttività provocato da un diverso posizionamento del parco eolico, a fronte di un diverso impatto visivo. Il presente lavoro propone una serie di varianti all'ipotesi progettuale di base proposta da una società operante nel campo eolico, circa l'installazione di un parco eolico, nella zona dei Monti della Tolfa, in provincia di Roma. Le soluzioni progettuali alternative sono finalizzate, quindi, alla mitigazione dell'impatto visivo dell'impianto eolico. Oltre alla usuale localizzazione degli aerogeneratori sulla cima della dorsale oggetto di studio (Monte Quarticciolo-Maggiorana), le alternative di progetto prevedono l'installazione delle turbine eoliche a mezzacosta ed alla base dei due versanti principali della suddetta dorsale. Inoltre, vengono prese in considerazione anche forme di mitigazione inerenti le dimensioni ed il colore delle torri eoliche.

Gli obiettivi di questo lavoro risultano essere molteplici e sono:

- effettuare, per ciascuna proposta alternativa, un'analisi sulla produttività media annua, in termini di GWh, sviluppata dagli aerogeneratori, e l'impatto visivo sul paesaggio causato dagli stessi;
- creare un modello in grado di evidenziare le variazioni della produttività e dell'impatto visivo del parco eolico preso in esame, al variare della localizzazione di quest'ultimo, a diverse quote lungo i due versanti della dorsale;
- individuare ipotesi progettuali ottimali, che garantiscano una riduzione dell'impatto visivo sul paesaggio causato dall'installazione delle turbine eoliche, senza incidere in maniera rilevante sulla quantità di energia elettrica prodotta dalle suddette strutture;
- effettuare per le ipotesi progettuali che prevedono l'installazione delle turbine eoliche sul crinale, a mezzacosta ed alla base del versante, un'analisi preliminare Costi-Benefici connessi al posizionamento degli aerogeneratori. Tale studio permetterebbe di effettuare le scelte progettuali che tengano in considerazione la sostenibilità economica dell'impianto.

1. Il sito oggetto di studio e le varie ipotesi progettuali

Il presente contributo prende in considerazione come area oggetto di studio la dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana (Fig. 1). La dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana presenta l'asse principale che si snoda in maniera decrescente verso il mare in direzione nord est – sud ovest. I due versanti principali oggetto di studio guardano: uno alla strada provinciale SP3a Tolfa-Civitavecchia (nord-ovest) e l'altro verso il comune di Santa Marinella (sud-est). Dal punto di vista topografico la dorsale presenta una quota massima di 422 m s.l.m., in prossimità del Monte Quarticciolo, ed una quota minima di circa 200 m s.l.m., nei pressi della Maggiorana. Il dislivello assume grandezze intorno ai 225 m.

L'ipotesi progettuale effettuata dalla società proponente l'impianto prevede l'installazione di sei aerogeneratori di potenza 2 MW sul crinale della dorsale. La struttura eolica completa raggiunge un'altezza complessiva di 112 m. L'aerogeneratore entra in funzione nel momento in cui la velocità del vento, misurata all'al-

Figura 1. Localizzazione geografica dell'area interessata dal progetto, scala 1:25000.



tezza dell'hub (mozzo ad asse della navicella), è superiore o uguale ai 3 m/s, e si blocca quando questa supera i 21 m/s.

Le soluzioni progettuali ipotizzate possono dividersi in tre categorie:

- il parco eolico risulta costituito da aerogeneratori di altezza pari a 112 m di colorazione bianca, posizionati rispettivamente sul crinale, a mezzacosta ed alla base del versante;
- la wind farm appare composta da aerogeneratori con altezza di 72 m e colorazione bianca, posizionati rispettivamente sul crinale, a mezzacosta ed alla base del versante;
- l'impianto eolico è localizzato alla base del versante e risulta formato da aerogeneratori di altezza pari a 112 m e di colore verde.

Le diverse ipotesi progettuali prese in considerazione sono brevemente descritte in Tab. 1 ed in Fig. 2.

2. Valutazione non monetaria della produttività e della qualità del paesaggio per ciascuna ipotesi progettuale

2.1 Il calcolo dell'energia prodotta dal parco eolico per ogni ipotesi progettuale

L'energia eolica viene sfruttata per la produzione di energia elettrica mediante i parchi eolici. Questi ultimi risultano essere delle vere e proprie centrali, che immettono l'energia prodotta in rete. Essi sono impianti composti da un certo nume-

Tabella 1. Descrizione delle varie ipotesi progettuali.

Ipotesi	Quota m s.l.m.	Versante	Altezza m	Colore turbina
I	324	Crinale	112	Bianco
II _o	244	Nord-Ovest	112	Bianco
II _e	244	Sud-Est	112	Bianco
III _o	204	Nord-Ovest	112	Bianco
III _e	204	Sud-Est	112	Bianco
IV	324	Crinale	72	Bianco
V _o	270	Nord-Ovest	72	Bianco
V _e	270	Sud-Est	72	Bianco
VI _o	244	Nord-Ovest	72	Bianco
VI _e	244	Sud-Est	72	Bianco
VII _o	204	Nord-Ovest	112	Verde
VII _e	204	Sud-Est	112	Verde

Figura 2. Schema della localizzazione degli aerogeneratori per le ipotesi progettuali I, II_o e III_o.

ro di aerogeneratori, situati in una zona aperta e ventilata, che producono energia per tutto l'anno (Bellecci, Casella e Federico 2004).

L'energia utile prodotta da una turbina eolica dipende dal sito nel quale è installata, al variare della densità dell'aria (e quindi attraverso la pressione e la temperatura ambiente) e al variare della distribuzione di velocità del vento. Inoltre, l'energia prodotta cambia in relazione alla macchina utilizzata, alle sue dimensioni, al suo coefficiente di potenza (che varia con la velocità del vento) ed alla sua disponibilità (<http://dimeca.unica.it/~cocco/Eolico_parte1.pdf>).

Si introduce il concetto di disponibilità della macchina, in quanto l'aerogeneratore non lavora ininterrottamente, ma opera solo in determinate condizioni di velocità del vento, poiché presenta una velocità di innesco ed una di arresto (Bellecci, Casella e Federico 2004).

L'energia, in kWh, prodotta da una wind farm risulta definita dalla seguente relazione (<http://www.energia-eolica.it>):

$$E = \sum_{x=1}^N (P_x * \Delta T_x) \quad (1)$$

Dove:

E è l'energia in kWh prodotta dalla *wind farm*;

P è la potenza in kW dell'aerogeneratore per ogni livello di velocità del vento x (Irecon);

ΔT è l'intervallo di tempo in cui è presente ogni livello di velocità del vento x;

N è la numerosità dei livelli di velocità del vento presenti nel sito.

Ai fini del calcolo della produttività di un impianto eolico risulta necessario, quindi, essere in possesso dei seguenti dati:

- le velocità del vento presenti nel sito in esame;
- la durata, in ore, delle diverse velocità del vento riscontrate;
- la curva di potenza dell'aerogeneratore, per effettuare la stima della potenza, in funzione delle velocità del vento presenti.

Riguardo lo studio delle velocità del vento presenti, per ciascuna delle quote progettuali previste, sarebbero stati necessari i rilievi anemometrici effettuati dalla società proponente. Purtroppo, tali dati non sono stati resi disponibili dalla società, in quanto il progetto del parco eolico risulta essere ancora in fase di approvazione.

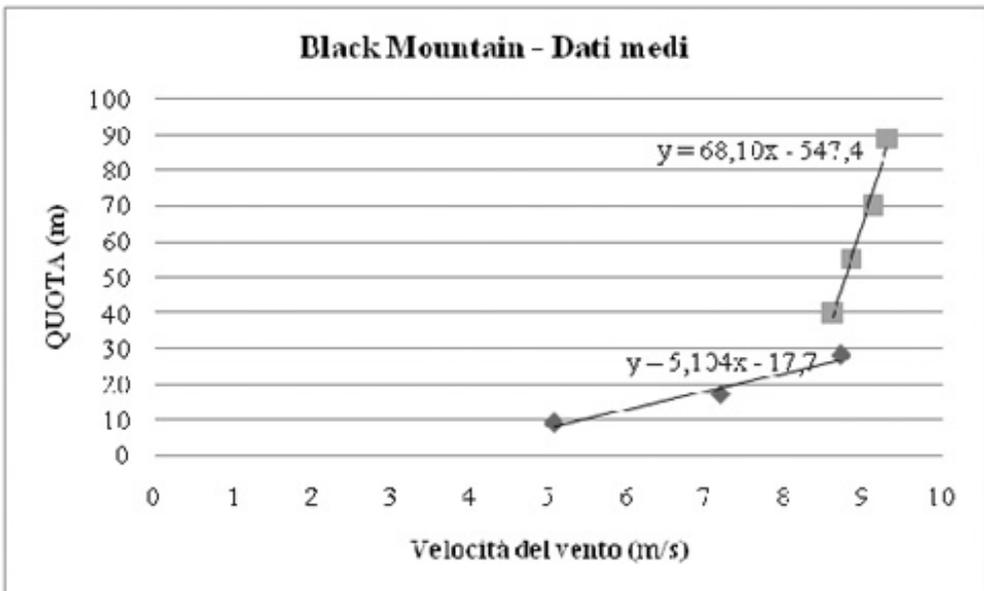
Gli unici dati anemometrici a nostra disposizione risultano essere quelli relativi alla velocità media all'altezza di 10 m s.l.m., rilevata presso la Stazione di Civitavecchia, appartenente alla Rete Mareografica Nazionale. Per questa ragione, pur essendo consapevoli che i venti dei quadranti settentrionali risultano prevalenti per durata ed intensità, nel presente lavoro vengono esclusivamente considerati i venti spiranti dai quadranti meridionali. La velocità del vento in prossimità della costa laziale in questa zona risulta essere di 2,72 m/s. Purtroppo questa tipologia di dati non risulta essere sufficiente allo studio della velocità del vento a diverse altitudini lungo il versante della nostra dorsale. Per questa ragione si è fatto ricorso all'utilizzo di metadati, provenienti da un caso di studio orograficamente molto simile al nostro, quello del rilievo Black Mountain, nei pressi della città di Canberra (Australia). I dati rilevati nel caso di studio australiano sono utili a titolo esclusivamente esemplificativo in quanto mostrano le variazioni della velocità medio-massima del vento al variare della quota di misurazione, in prossimità di un anemometro posto sulla cima dell'asperità.

Pur consapevoli della perplessità che tale accostamento può provocare nelle menti dei lettori, con questo riferimento non si vuole certamente assimilare i venti della costa laziale con quelli di Canberra, ma si è solamente preso in considerazione il *range* di cambiamento della velocità del vento a diverse quote di altitudine di un versante paragonabile per caratteristiche fisiche al nostro. Da ciò si è derivata un'equazione relativa alla variabilità della velocità del vento lungo un versante. Questo tipo di informazione a nostro modesto parere è unicamente servita a creare un modello di variazione del suddetto parametro senza escludere la possibilità di ulteriori perfezionamenti qualora studi analoghi fossero in futuro disponibili.

Il rilievo preso in considerazione si trova a circa 200 m dalla città di Canberra, 280 km a sud-ovest di Sydney e 650 km a nord-est di Melbourne. Come la dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana, essa si trova in prossimità del mare, a circa 100 km dalla costa orientale dall'Australia. L'asperità presenta una quota di 811 m s.l.m., e perciò risulta essere abbastanza alta rispetto al crinale presente sui Monti della Tolfa. Nonostante ciò, Black Mountain appare un buon caso oggetto di studio, in quanto le misure del vento sono state effettuate in direzione 290° magnetici. In questa direzione non vi sono particolari asperità, che ostacolano il percorso del vento e la base topografica di fondo risulta essere un pianoro, che si erge ad una quota di 610 m s.l.m. (Bradley, 1980). Detto ciò, il dislivello può essere considerato di circa 200 m, proprio come nel caso della dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana. Il versante sottoposto a questo flusso d'aria risulta essere coperto, nei pressi della vetta, da una vegetazione composta da eucalipti di altezze di circa 10 m, mentre procedendo verso il basso la densità e le dimensioni delle vegetazione diminuiscono progressivamente, fino a dare spazio alla presenza di centri abitati suburbani. Secondo Bradley la rugosità può essere considerata $z_0 = 1$. Anche questo valore risulta essere pari a quello riscontrato sui Monti della Tolfa.

A partire dai dati presi in considerazione, il profilo del vento sulla cresta del rilievo risulta essere rappresentato, in maniera quasi perfetta, da due spezzate, poiché la velocità cresce molto lentamente nei primi 30 m, per poi assumere una crescita rapidissima oltre tale valore. Nei primi trenta metri la retta, che esprime il profilo del vento, è rappresentata dall'equazione $y = 5,104x - 17,7$ (Fig. 3). Oltre i trenta metri la retta che rappresenta il profilo del vento possiede un'equazione $y = 68,10x - 547,4$ (Fig. 3).

Figura 3. Profilo del vento massimo in prossimità della cima di Black Mountain.



A partire dalle equazioni delle spezzate mostrate in Figura 3, che rappresentano il profilo del vento massimo sulla cima del rilievo australiano, il presente studio propone di individuare le velocità del vento massime, a diverse quote, lungo i due versanti principali della dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana. Pur consapevoli della lontananza dalla realtà della seguente affermazione, ipotizziamo che entrambi i versanti abbiano le stesse caratteristiche ai fini della nostra simulazione. Da ciò deriva che le velocità del vento, ad una determinata quota, saranno equivalenti su entrambi i pendii. Tale assunzione viene presa in considerazione unicamente per la creazione di un modello in grado di spiegare la variazione delle velocità del vento lungo entrambi i versanti della dorsale. Considerando l'utilizzo di un numero esiguo di dati, per di più associati ad un contesto simile al nostro, ma comunque differente, appare opportuno precisare come i risultati raggiunti risultino abbastanza approssimativi.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati di durata delle varie velocità del vento, il presente elaborato si avvale della curva di ventosità sperimentale dell'intera costa laziale, elaborata dalla IRECon Italia s.r.l. La curva di ventosità è una elaborazione grafica che mette in relazione la velocità del vento in m/s con la durata annua cumulata della velocità del vento, espressa in termini di percentuale. Da questo valore risulta semplice calcolare la durata annua in ore (h), ossia il numero di ore in cui un determinato valore di velocità è riscontrabile nel sito oggetto di studio durante tutto il corso dell'anno.

L'ultimo tassello mancante per il calcolo della produttività di un impianto eolico risulta essere la potenza in kW, che un aerogeneratore è in grado di produrre. Tale relazione tra velocità e potenza risulta desumibile dalla curva di potenza della macchina. Questa curva descrive appunto come variano i valori della potenza erogata (kW) al variare dei valori della velocità (m/s).

Per quanto concerne i valori della produttività associata a ciascuna ipotesi progettuale, secondo i risultati del lavoro sintetizzati in Tab. 2, è emerso che la produttività dell'impianto eolico decresce al decrescere della quota di installazione delle turbine. L'assenza in Tab. 2 delle ipotesi progettuali V_o e V_e è giustificata dal fatto che tali soluzioni progettuali perdono di interesse nel corso dell'indagine e per tale ragione, da qui in avanti, non saranno più prese in considerazione.

Inoltre, risulta molto interessante sottolineare, però, come tale decremento sia effettivamente di modeste dimensioni.

2.2 La qualità del paesaggio associata a ciascuna ipotesi progettuale

La valutazione della qualità del paesaggio, per ciascuna delle proposte progettuali presentate, è avvenuta per mezzo di una stima non monetaria di carattere soggettivista.

Un campione (certamente non basato su presupposti statistico-metodologici) della popolazione, potenzialmente soggetta all'impatto visivo generato dalla *wind farm*, è stato sottoposto ad un questionario. Tale campione, composto da appena 60 soggetti, è stato scelto in maniera casuale, tra i residenti nei Comuni di Allumiere,

Tabella 2. Produttività della singola turbina ($h = 112$ m) e dell'intero parco eolico per le diverse ipotesi progettuali.

Ipotesi progettuale	Quota installazione aerogeneratori (m s.l.m.)	Produttività singola turbina (GWh)	Produttività impianto (GWh)	Produttività impianto (%)
I	324	3,971	23,824	100
II _o - II _e	244	3,796	22,773	95,6
III _o - III _e	204	3,621	21,725	91,2
VI _o - VI _e	270	3,621	21,725	91,2
VII _o - VII _e	204	3,621	21,725	91,2

Civitavecchia, Santa Marinella e Tolfa e, comunque, esposti alla visuale della *wind farm*. Una parte di questi soggetti intervistati (8 individui) possedevano altre residenze e si trovavano a Santa Marinella per motivi turistici.

Tale campione è stato sottoposto ad un questionario composto da tre parti.

Nella sezione A, sono raccolte tutte le informazioni socio-economiche dell'intervistato, quali: sesso, età, comune di residenza, titolo di studio e occupazione.

Nella sezione B, l'intervistato viene sottoposto ad una serie di domande per verificare l'effettiva conoscenza degli argomenti oggetto di indagine. Tale parte del questionario risulta necessaria al fine di testare la veridicità dei risultati, a seconda del grado di preparazione dimostrato dagli interlocutori.

Nella sezione C, l'intervistato è sottoposto a sei domande, in ciascuna delle quali viene invitato a classificare in ordine di preferenza, dal paesaggio più bello al paesaggio meno bello, una serie di 3 immagini, che gli vengono fatte visionare. Le immagini sottoposte al giudizio degli osservatori sono dei fotoinserimenti, ossia delle simulazioni della percezione visiva, così come presumibilmente si presenterà a costruzione dell'opera finita. Questi fotomontaggi sono creati, mediante appositi programmi, a partire da fotografie, opportunamente scattate dai punti di vista principali della zona oggetto di studio.

La scelta dei punti di visuale principali è stata effettuata mediante l'analisi dell'area di impatto visivo e attraverso lo studio della Carta dell'intervisibilità. Dall'analisi di questi documenti, sono stati scelti due *viewpoints* principali, in cui l'impatto risulta considerevole. Il primo guarda il versante nord-ovest della dorsale Monte Quarticciolo-Maggiorana. Il secondo guarda verso il versante sud-est della suddetta dorsale.

La ripresa fotografica è stata realizzata in modo da rispecchiare fedelmente la realtà presa in esame.

I fotoinserimenti sono stati creati a partire dalle fotografie realizzate dai punti di visuale individuati, mediante l'ausilio di due software particolari: Panorama Maker 4.0 e Adobe Photoshop 7.0. Le turbine eoliche sono state opportunamente dimensionate al fine di proporre fotoinserimenti più reali possibili. Le immagini elaborate risultano essere, in questa maniera, una riproduzione della realtà che

dovrebbe essere. Il dimensionamento delle pale eoliche avviene per ognuna delle differenti ipotesi progettuali, in quanto, in ciascuna di esse, le strutture sono posizionate a quote e distanze diverse rispetto all'ipotetico osservatore posizionato nei due viewpoints principali. L'altezza degli aerogeneratori viene ricavata a partire dagli studi del Dipartimento di Ingegneria Meccanica dell'Università degli Studi di Cagliari, circa l'andamento della sensibilità visiva in funzione della distanza.

Le preferenze degli intervistati, acquisite mediante la somministrazione del questionario, sono state elaborate mediante procedimenti statistici, al fine di ottenere un valore medio paesaggistico, per ciascuna panoramica presente nell'intervista, ovvero un parametro oggettivo, che rappresenti la qualità del paesaggio.

Tale parametro viene dedotto, partendo dal numero delle preferenze espresse dai soggetti intervistati, in ognuna delle domande presenti nel questionario. Per ciascun quesito viene chiesto al campione prescelto di ordinare gerarchicamente le diverse panoramiche presenti, secondo valori decrescenti di gradimento estetico, ossia dal paesaggio più bello al paesaggio meno bello. In seguito, ad ognuna di queste immagini sono stati assegnati dei valori, variabili da 0 a 2, progressivamente decrescenti, attribuendo il valore 0 alla tipologia meno gradita ed il valore 2 alla tipologia più gradita. Alla prima preferenza è stato assegnato il valore 2, alla seconda il valore 1 ed alla terza il valore 0.

Per ciascuna panoramica presente nelle domande della Sezione C, viene calcolato il valore medio paesaggistico. Tale parametro è dedotto dalla media dei valori assegnati alle preferenze espresse dalla totalità degli intervistati, riguardo ad una determinata immagine (Fagarazzi, Fratini e Riccioli 2007):

$$X_j = (\sum_{j=1}^N X_j) / N \quad (2)$$

Dove:

X_j risulta essere il valore attribuito a ciascuna preferenza espressa dall' j -esimo soggetto intervistato;

N è il numero di soggetti che costituiscono il campione.

Ognuna delle ipotesi progettuali elaborate risulta creare due paesaggi principali: uno visibile dal viewpoint A e l'altro visibile dal viewpoint B. Per cui il valore medio della qualità del paesaggio per ciascuna soluzione progettuale è dato dalla media dei valori di tale parametro calcolati per ognuno dei due punti di visuale principali:

$$X_p = (X_j \text{ viewpoint A} + X_j \text{ viewpoint B}) / 2 \quad (3)$$

I risultati derivanti dall'indagine effettuata permettono di confermare (pur nella limitatezza della base dati) che il valore medio paesaggistico aumenta all'abbassarsi della quota, alla quale sono localizzate le diverse ipotesi progettuali, lungo entrambi i versanti oggetto di studio (Tab. 3).

Inoltre, risulta evidente che l'apporto di forme di mitigazione riguardo all'altezza ed al colore degli aerogeneratori riduce il deterioramento della qualità del

Tabella 3. Valori medi paesaggistici calcolati per ogni ipotesi progettuale proposta.

Ipotesi progettuale	Valore medio paesaggistico			
	Viewpoint A	Viewpoint B	Media	Valore %
I – 324 m s.l.m.	0,408	0,220	0,314	15,7
II _o – 244 m s.l.m.	1,3	1,225	1,262	63,1
II _e – 244 m s.l.m.	1,2	1,227	1,213	60,6
III _o - 204 m s.l.m.	0,95	1,675	1,312	65,6
III _e – 204 m s.l.m.	1,74	1,432	1,586	79,3
VI _o – 270 m s.l.m.	0,934	1,675	1,304	65,2
VI _e - 270 m s.l.m.	1,74	1,017	1,378	68,9
VII _o - 204 m s.l.m.	1,8	1,675	1,737	86,8
VII _e - 204 m s.l.m.	1,74	1,717	1,728	86,4

paesaggio causata dall'installazione di tali strutture. Appare indiscutibile che una netta riduzione dell'impatto visivo, generato dall'impianto eolico, è collegata all'installazione di strutture con tonalità verde. Tale artificio cromatico rende gli aerogeneratori molto meno visibili nel caso in cui essi siano installati alla base del versante, ossia nel caso in cui per tutto lo sviluppo della loro altezza posseggano come sfondo il rilievo in esame (Tab. 3).

2.3 Considerazioni

Per quanto concerne l'analisi della produttività e del valore della qualità del paesaggio in relazione alla quota di installazione degli aerogeneratori, appare opportuno sottolineare il comportamento che i primi due parametri presentano in funzione del secondo. La produzione media annua di energia elettrica garantita dall'impianto eolico aumenta al crescere della quota, in entrambi i versanti oggetto di studio. L'installazione degli aerogeneratori alla base dei versanti in esame (ipotesi III_o e III_e) garantisce valori di efficienza di poco inferiori (91,2%) rispetto alla localizzazione delle strutture eoliche sulla cima della dorsale cui si attribuisce un valore massimo (100%) di produttività media annua. L'installazione delle turbine a mezzacosta dei versanti (II_o e II_e) garantisce valori intermedi di produttività (95,2%).

A differenza della produttività, il valore medio paesaggistico decresce all'aumentare della quota, alla quale vengono localizzate le diverse soluzioni progettuali lungo un versante. Tale comportamento risulta evidente, sia nel versante nord-ovest, che in quello sud-est della dorsale. Le ipotesi progettuali, che prevedono l'installazione degli aerogeneratori ai piedi del versante, sono risultate quelle preferite dal punto di vista estetico. Questo atteggiamento risulta attribuibile a due

motivazioni di fondo. Per prima cosa, in tali soluzioni, le turbine eoliche vengono schermate dalla situazione topografica e perciò sono visibili, completamente, solo da uno dei due viewpoints considerati. Inoltre, questo atteggiamento risulta confermato, anche nel caso, in cui vengono presi in considerazione i valori medi paesaggistici, scaturiti dalle preferenze espresse dagli ipotetici osservatori, che si trovano nel punto visuale dal quale sono visibili per intero le strutture eoliche installate, a diverse quote, lungo un versante. Infatti, anche in questo caso, le alternative progettuali più gradite sono quelle, che prevedono l'installazione delle turbine a mezzacosta ed alla base dei versanti. Tali preferenze risultano comprensibili grazie all'effetto di mitigazione della visibilità degli aerogeneratori, provocato dalla presenza della vegetazione e dall'ambiente circostante.

Un giusto compromesso tra produttività e salvaguardia della qualità del paesaggio risulta garantito dalle ipotesi progettuali, che prevedono la localizzazione degli aerogeneratori a mezzacosta dei versanti oggetto di studio. Infatti, tale soluzione implica una perdita di produzione di energia elettrica limitata (4,4%) rispetto all'ipotesi di partenza. Viceversa, risulta evidente un netto miglioramento della qualità del paesaggio, quantificabile in un valore di circa il 46%, in confronto all'ipotesi progettuale I.

A questo punto, risulta possibile individuare nell'ipotesi progettuale II₀ la soluzione più soddisfacente ai fini del presente lavoro. Essa prevede l'installazione delle turbine eoliche a mezzacosta del versante nord-ovest della dorsale Monte Quaticciolo-Maggiorana, ovvero quella che guarda verso la strada provinciale SP3a Tolfa-Civitavecchia. Questa alternativa progettuale risulta la migliore, dal punto di vista estetico, in relazione al valore medio paesaggistico riscontrato. Inoltre bisogna considerare che tale parametro è stato rilevato sulla base di un questionario, che sottoponeva gli intervistati a fotografie, che focalizzavano l'attenzione di essi unicamente sulla dorsale oggetto di studio. Tale tecnica risulta essere quella necessaria in analisi di questo genere. A tal proposito, risulta opportuno osservare che, dal punto visuale A, guardando verso nord è visibile la cava di calcare di Sassicari, che sorge sul Monte Ferrara proprio a fianco della strada provinciale SP3a, e che, osservando verso ovest, risultano visibili le centrali termoelettriche Torrevaldaliga Nord e Sud di Civitavecchia, non certo un paesaggio gradevole nel suo complesso. Queste considerazioni assumono un ruolo importante nella scelta progettuale, in quanto, seguendo una logica di pianificazione territoriale, sembrerebbe conveniente continuare a insistere su una zona ormai devastata dal punto di vista paesaggistico, piuttosto che intervenire su una porzione di territorio, come quella rappresentata dal versante sud-est della dorsale Monte Quaticciolo-Maggiorana, che si affaccia su una nota località turistica, come Santa Marinella.

Per quanto riguarda gli studi effettuati circa le forme di mitigazione dell'impatto visivo derivante dall'installazione di turbine eoliche di altezza ridotta o di colorazione verde, il presente lavoro si è soffermato principalmente sull'aspetto inerente alla qualità del paesaggio. In tal senso sono state elaborate ipotesi progettuali che prevedono l'installazione di aerogeneratori con altezza di 72 m (ipotesi VI₀ e VI₁) e di torri eoliche verdi (VII₀ e VII₁), alla base di entrambi i versanti presi in considerazione.

Le alternative progettuali, che ipotizzano la presenza di tali forme di mitigazione, risultano essere preferite dalla popolazione, in quanto presentano valori medi paesaggistici maggiori rispetto alle ipotesi progettuali, che prevedono, invece, la presenza delle classiche strutture alte 112 m, sempre posizionate alla base di entrambi i versanti.

L'ipotesi che prevede l'installazione di strutture eoliche alte 112 m e di colorazione verde è risultata quella preferita dal campione intervistato. Queste strutture possono essere impiegate come forma di mitigazione, unicamente alla base del versante, dove tale soluzione cromatica mimetizza gli aerogeneratori con il resto dell'ambiente e soprattutto con la vegetazione. Tale assunzione risulta confermata dal fatto che il valore medio paesaggistico più elevato si riscontra sul versante nord-ovest della dorsale, dove la presenza della vegetazione appare più marcata e continua, rispetto al versante sud-est.

L'utilizzo di questa soluzione cromatica garantisce sicuramente dei vantaggi enormi dal punto di vista estetico (un aumento del 71% del valore medio paesaggistico rispetto all'ipotesi I). L'installazione, tuttavia, delle torri eoliche alla base del versante comporta una riduzione della produttività abbastanza sensibile (8%), rispetto all'ipotesi progettuale che prevede gli aerogeneratori sulla cresta della dorsale.

Una soluzione alternativa potrebbe essere quella di installare le turbine a mezzacosta e di adottare la soluzione cromatica verde solamente per la parte della struttura che possiede come sfondo il rilievo. La porzione sommitale continuerebbe ad essere bianca su uno sfondo cielo. A tal proposito, ulteriori studi futuri potrebbero evidenziare interessanti sviluppi.

3. Analisi monetaria della produttività e dell'impatto visivo per alcune ipotesi progettuali

Alla luce delle considerazioni scaturite dall'analisi non monetaria delle diverse ipotesi progettuali è sembrato interessante svilupparne l'analisi, al fine di verificare la sostenibilità economica di scelte progettuali considerate vincenti per ora dal punto di vista non monetario.

Innanzitutto, si è cercato di verificare la sostenibilità economica di alcune delle ipotesi elaborate e di individuare la soluzione progettuale ottimale dal punto di vista finanziario. Lo strumento utilizzato per raggiungere i suddetti obiettivi è stato l'analisi Costi-Benefici.

Il discorso inerente l'analisi Costi-Benefici è circoscritto solo alle ipotesi progettuali che prevedono la localizzazione delle torri eoliche sulla cima, a mezzacosta ed alla base del versante nord-ovest. Tale scelta è stata effettuata in quanto, in conclusione dell'analisi non monetaria delle diverse ipotesi progettuali, questo versante risulta quello migliore per l'installazione di un parco eolico, poiché il proprio contesto paesaggistico risulta essere già compromesso dalla presenza di una centrale termoelettrica e di una cava.

Il beneficio, derivante dall'impianto eolico, risulta essere la produzione di energia elettrica, che viene generata per tutto l'orizzonte temporale di attività del parco, valutata in termini monetari.

Nel caso in esame, le uscite prese in considerazione sono rappresentate dai costi delle turbine eoliche, da quelli di esercizio e manutenzione del parco eolico, dai costi di allacciamento alla rete elettrica, dalla perdita in termini economici di qualità del paesaggio e dai costi di costruzione e manutenzione della rete stradale necessaria per l'impianto delle turbine eoliche.

3.1 Analisi dei benefici associati a diverse ipotesi progettuali

Il beneficio derivante dall'installazione del parco eolico è rappresentato in ciascuna ipotesi progettuale dall'energia elettrica prodotta dal parco eolico. Al fine di quantizzare in termini economici i valori di energia elettrica prodotta relativi alle diverse ipotesi progettuali, è stato assunto, come esclusivo beneficio, il totale dell'energia elettrica prodotta dall'impianto eolico, calcolata secondo la procedura descritta al paragrafo 2.1.

L'energia elettrica acquistata dalla rete distributrice è ceduta attualmente al prezzo medio di circa 0,07475 € / kWh (<<http://mercatoelettrico.org/>>). Oltre a questa fonte di guadagno, appare necessario prendere in considerazione il pagamento dei cosiddetti Certificati Verdi, il cui prezzo di mercato è oggi circa 0,117 € / kWh (<http://www.certificativerdi.it>). Il valore dell'energia, prodotta mediamente in un anno, per ognuna delle diverse soluzioni progettuali è riportato in Tab. 4.

Tabella 4. Valore economico in € dell'energia elettrica media annua prodotta per ciascuna ipotesi progettuale.

Ipotesi progettuale	Valore economico (€)	Valore in %
I	4.568.292	100
II _o	4.366.643	95,6
III _o	4.165.819	91,2

3.2 Analisi dei costi associati alle diverse ipotesi progettuali

I costi associati alla perdita di qualità del paesaggio sono stati elaborati a partire dall'analisi economica del suo decremento a seconda dell'installazione degli aerogeneratori come previsto dalle tre diverse soluzioni progettuali. Considerando che l'area presa in esame possiede una superficie di 54 ha e che il valore di mercato del bosco, o pascolo cespugliato, risulta pari a circa 7.000 €/ha (<http://www.inea.it>), il valore economico dell'intera area considerata risulta essere all'incirca 378.000 €.

Si parte dal presupposto che il paesaggio allo stato naturale assuma il massimo punteggio di valore medio paesaggistico, pari a 2 (in una scala da 0 a 2). I valori economico-estetici relativi a ciascuna proposta progettuale sono ricavati dal valore medio paesaggistico associato ad ognuna delle suddette soluzioni (Tab. 5).

Il valore in termini monetari della perdita di qualità del paesaggio, associata a ciascuna ipotesi progettuale, deriva dalla differenza tra il valore economico del paesaggio naturale (panorama senza la presenza dell'opera: ipotesi 0) e quello dei paesaggi relativi alle suddette soluzioni di progetto (Tab. 5), secondo la formula:

$$V_{pp} = V_m - (V_m * X_j) = V_m * (1 - X_j) \quad (4)$$

Dove:

V_{pp} è il valore di perdita del paesaggio;

V_m è il valore di mercato della porzione di versante oggetto di studio;

X_j è il valore medio paesaggistico.

I coefficienti utilizzati per la determinazione della rilevanza economico-estetica dei diversi paesaggi associati alle varie ipotesi progettuali vengono elaborati a partire dal valore medio paesaggistico associato a ciascuna soluzione progettuale e, quindi, a partire dalle preferenze espresse dalla popolazione. Ciò significa moltiplicare il valore base di mercato del terreno allo stato naturale per un coefficiente associato al paesaggio, derivante dalle preferenze espresse nei confronti delle diverse ipotesi progettuali prese in considerazione.

È pur vero che così operando si genera una connessione spuria tra il valore di mercato della terra (bene privato) e il valore del paesaggio (bene pubblico), ma per questa via si potrebbe anche pensare ad un tentativo di acquisire indicazioni sulle modificazioni di valore (mercantile) cui il bene andrebbe incontro nelle varie ipotesi a causa delle intersezioni, ostruzioni, strutture estranee al bosco, e non strettamente in relazione al valore intrinseco del paesaggio.

Dal punto di vista metodologico, l'utilizzo di un coefficiente legato a preferenze estetiche, che consenta di pervenire ad una valutazione economica del bene in esame a partire da un valore di base reale, risulta analogo al procedimento utilizzato nelle stime multi-parametriche per il valore delle piante ornamentali, ben noto ai cultori di Estimo (Polelli 1997).

Per tali piante, infatti, il valore di base risulta essere il prezzo della pianta al vivaio. In seguito questo valore viene modificato in termini incrementali con coefficienti che si riferiscono all'aspetto, al portamento, al suo posizionamento nel

Tabella 5. Valore economico-estetico del paesaggio e del danno economico-estetico associato a ciascuna ipotesi progettuale in euro.

Ipotesi Progettuale	Valore Medio Paesaggistico (%)	Valore economico-estetico (€)	Danno economico-estetico (€)
0	100	378.000	0
I	15,7	59.346	318.654
II _o	63,1	238.518	139.482
III _o	65,6	247.968	130.032

contesto, allo stato di salute e ad altri parametri che possono incidere sulla qualità estetica dell'albero.

La valutazione del paesaggio conseguita in tal modo non è determinante di per sè, ma acquista rilevanza in termini soprattutto relativi al momento di confronti in situazioni analoghe, in quanto il riferimento e l'adozione di una metodologia standard esplicita consentono appunto di pervenire a graduatorie di merito in termini quantitativi.

Si è ben consapevoli dell'esistenza di altre metodologie in grado di valutare il valore del paesaggio (valore edonico, valutazione contingente, ecc.), ma questi approcci saranno oggetto di ulteriori approfondimenti su questo filone di ricerca da parte nostra.

Per completare il quadro, sotto il profilo dei costi, la costruzione di un parco eolico prevede, inoltre, una serie di spese. A ciascuna delle ipotesi progettuali prese in considerazione sono associati diversi costi di installazione del parco eolico. Infatti, localizzando l'impianto eolico alla base o a mezzacosta dei versanti, risulterebbe evidente una riduzione di tali costi per quanto riguarda: il trasporto dei materiali; l'apertura di nuove piste o l'adeguamento della viabilità già esistente; la costruzione delle piazzole necessarie nella fase di assemblaggio degli aerogeneratori; la realizzazione della trincea per il cavidotto della rete di media tensione; la creazione delle fondazioni degli aerogeneratori; la costruzione dell'edificio di controllo, dove viene monitorata la trasformazione della tensione della corrente e la realizzazione della sottostazione di trasformazione, dove avviene la suddetta modificazione.

L'aspetto sul quale viene ora focalizzata l'attenzione è principalmente l'apertura delle piste per il raggiungimento del sito in cui verranno installate le turbine eoliche in quanto la installazione delle medesime è fattore comune nelle diverse ipotesi di localizzazione.

Si prende, ora, in considerazione il caso del versante nord-ovest della dorsale Monte Quarticcio-Maggiorana, ossia quello che guarda verso la SP3a Civitavecchia-Tolfa.

Il dislivello fra il punto più elevato del suddetto rilievo e la base dello stesso risulta essere di circa 225 m. La distanza topografica fra la vetta e la base del versante è di circa 950 m. A partire da questi dati, la pendenza del versante in esame risulta essere di circa il 23,68%.

Ipotizzando la completa assenza su tale versante di vie di comunicazione per l'accesso al sito, risulta necessaria l'apertura di piste, che consentano il trasporto del materiale, l'installazione degli aerogeneratori e i successivi lavori di manutenzione. Tali strade avranno caratteristiche, percorsi e lunghezze differenti a seconda dell'ipotesi progettuale a cui si riferiscono (Fig. 4).

In ognuna delle proposte analizzate è prevista l'installazione di sei aerogeneratori, posti ad una distanza l'uno dall'altro di circa 400 m. L'area occupata dalle macchine possiede quindi una lunghezza di circa 2.400 m, considerando che ai lati degli aerogeneratori più esterni risulta opportuno lasciare una distanza di sicurezza di circa 200 m.

Nel caso della soluzione progettuale localizzata alla base del versante (III_o), la nuova rete di comunicazione appare rappresentata unicamente dalla pista, che

collega i punti in cui dovranno essere installate le macchine. Tale strada risulta caratterizzata da una lunghezza di 2.400 m e da una larghezza di 3 m. La superficie occupata dalla pista si aggira intorno ai 7.200 m².

Per ciò che concerne l'ipotesi progettuale, che prevede l'installazione delle turbine a mezzacosta del pendio (II_o), le vie necessarie a collegare la base del versante alla quota di installazione delle turbine risultano essere due. La prima è la stessa descritta nel caso precedente, posizionata, però ora, parallelamente a mezzacosta, anziché ai piedi della dorsale. La seconda permette ai mezzi di trasporto di raggiungere la prima a partire dalla base del rilievo. Essa sale in modo da tagliare in maniera obliqua il versante, con un'angolazione di 6°-7° rispetto alla linea orizzontale della base del versante. La sua lunghezza è di circa 2.402,6 m e la sua larghezza è di 3 m. La pista acclive occupa una superficie di circa 7.207,8 m². Nel complesso la via di comunicazione associata a tale soluzione prevede di occupare circa 14.407,8 m² di superficie.

La proposta progettuale I, infine, localizzata sul crinale della dorsale, prevede la costruzione della pista di accesso su due tratte acclivi dalla base del versante, una lunga 4.804 m e larga 3 m. nel primo tratto, analoga a quella descritta nel caso precedente e nel secondo tratto, pur mantenendo le stesse caratteristiche di lunghezza, larghezza e angolazione, cambia la direzione di ascesa in seguito al raccordo con una curva posizionata a mezzacosta del versante. In questo caso la superficie occupata dalla rete viaria risulta essere di 21.615,6 m².

I costi associati a ciascuna delle reti viarie inerenti ogni ipotesi progettuale sono costituiti da: abbattimento di alberi, sbancamento e riporti di terra, copertura della pista con opportuno materiale e indennizzo da pagare al fondo servente, in base alla costituzione di servitù di passaggio.

Il valore di mercato delle singole piante abbattute, appartenenti tutte al genere Quercus, risulta aggirarsi intorno ai 5 € cadauna (<<http://www.regione.lazio.it/>>). Nel nostro caso è riscontrabile un sesto di impianto di 3 x 3, ciò implica la presenza di circa 1.100 piante ad ettaro, quindi, di circa 0,11 piante a m². Nell'ipotesi III_o, vengono abbattute 792 piante, nella II_o circa 1.585 piante e nella I 2.378 piante.

Lo sbancamento e i riporti di terra presentano rispettivamente costi intorno a 3,87 e 1,55 €/m³ di terra (<<http://www.regione.lazio.it/>>). Per quanto riguarda l'ipotesi III_o, i volumi di terra sbancati si aggirano intorno ai 2.560 m³. Il volume associato alla soluzione II_o è di circa 6.560 m³. Infine, il volume di terra sbancato, per ciò che concerne l'ipotesi progettuale I, si aggira intorno ai 10.560 m³.

La formazione del rilevato avviene mediante l'utilizzo di materiale ghiaioso, proveniente sia dalle cave di prestito, che dagli impianti di riciclaggio. In questa fase è compresa la compattazione a strati fino a raggiungere il 95% della prova AASHO; l'eventuale areazione o inumidimento, la profilatura dei cigli, delle banchine e delle scarpate e ogni lavorazione ed onere per dare il rilevato compiuto a perfetta regola d'arte (<<http://www.regione.lazio.it/>>).

Tutti i dati inerenti ai prezzi presi in considerazione derivano dalla consultazione della "Tariffa dei prezzi 2007" elaborata dal Ministero delle Infrastrutture.

Per quanto riguarda l'indennizzo dovuto ai proprietari dei fondi serventi, esso viene determinato in dottrina estimativa mediante la seguente relazione:

$$I = V_m + Tr/r + D \quad (5)$$

Dove:

I è l'aumentare dell'indennizzo da pagare per la servitù;

V_m è il valore di mercato del terreno asservito;

Tr è il relativo tributo annuo;

r è il tasso di capitalizzazione (2%);

D è il danno arrecato al suolo e soprassuolo asservito.

Il relativo tributo annuo è desumibile dalla:

$$Tr = (R_D + R_A) * A_f \quad (6)$$

Dove:

R_D è il reddito dominicale;

R_A è il reddito agrario;

A_f è l'aliquota fiscale calcolata al 30%.

L'imponibile catastale assume un valore di circa 45,742 €/ha.

Il valore di mercato del bosco o pascolo cespugliato è di circa 7000 €/ha (<<http://inea.it/>>). Questo valore non risulta essere teoricamente corretto, poiché dal punto di vista estimativo si dovrebbe calcolare il valore dell'area anche nello stadio specifico di crescita del soprassuolo. Tale valore viene, quindi, utilizzato solo approssimativamente e come valore medio.

Nel caso delle ipotesi progettuali III_o, II_o ed I, i costi sono riportati in Tab. 6.

I costi di manutenzione della nuova pista si attestano intorno ai 2,783 €/al metro lineare di lunghezza della strada (<<http://www.rete.toscana.it/>>). Nell'ipotesi I tale lunghezza risulta essere pari a 7.204 m ed il costo di ogni singola manutenzione si attesta intorno ai 20.048 €. Nella soluzione II_o la lunghezza lineare della rete viaria si aggira intorno ai 4.802 m ed il relativo costo di manutenzione intorno ai 13.363 €. Nell'ipotesi III_o la strada risulta possedere una lunghezza lineare di circa 2.400 m, per cui il costo di manutenzione è pari a 6.679 €. All'interno del ciclo produttivo devono essere effettuati interventi di manutenzione ogni 3 anni. Gli interventi comprendono il livellamento del piano viario, il ricarica localizzato con inerti, la ripulitura e risagomatura delle fossette laterali, il ripristino degli sciacqui trasversali, il ripristino di tombini e di attraversamenti esistenti, la rimozione del materiale franato dalle scarpate e la risagomatura delle stesse, il rinsaldamento delle scarpate con graticciate e viminate, il taglio della vegetazione arbustiva e decespugliamento.

Nella stima dei costi associati all'installazione della wind farm, oltre ai costi relativi alla costruzione della rete stradale, sono stati presi in considerazione anche le uscite associate all'acquisto delle turbine eoliche. Il costo di una singola turbina eolica installata, compreso di acquisto, trasporto, montaggio ed avviamento risulta essere pari a 1.000 €/kW di potenza posseduta (<http://www.comunedirialto.it/fattibilita_rialto.pdf>).

Poiché, in ciascuna delle ipotesi progettuali elaborate, il numero degli aerogeneratori risulta essere costante e pari a sei, i costi relativi all'acquisizione degli ae-

rogeneratori sono i medesimi in ognuna soluzione di progetto e risultano essere di circa 12.000.000 €.

Un'altra voce di spesa inerente l'installazione di un parco eolico appare costituita dai costi fissi di accessibilità e collegamento alla rete. Tali costi cambiano al variare della complessità del sito. Esistono alcuni valori di riferimento molto utili per un prima ed approssimativa determinazione dei costi relativi alle ipotesi progettuali presentate. Per un sito di bassa complessità i costi si aggirano intorno ai 175.000 € (2 km di piste + 3 km linea aerea di MT). Le spese associate ad un sito di media complessità sono 350.000 € (4 km di piste + 6 km di linea aerea di MT). Un sito a complessità alta presenta costi di 1.050.000 € (6 km di piste + 10 km di linea MT interrata) (<http://www.comunedirialto.it/fattibilita_rialto.pdf>).

Nel caso delle ipotesi progettuali presentate, tali costi si attestano intorno ai 190.000 € per la III_o, ai 380.000 € per la II_o e ai 400.000 € per la I.

L'ultima voce di costo da prendere in esame durante la progettazione di una wind farm è quella inerente l'esercizio e la manutenzione degli aerogeneratori. Tali spese possono essere rilevate in base ai kWh prodotti dall'impianto eolico. Per i primi 5 anni i costi annui sono rappresentati da 0,007 € / kWh, per i successivi 5 anni da 0,009 € / kWh ed, infine, per gli ultimi 10 anni da 0,014 € / kWh (<http://www.comunedirialto.it/fattibilita_rialto.pdf>). I costi di esercizio e manutenzione annui associati alle ipotesi progettuali qui presentate sono riportati in Tab. 6.

Tabella 6. Analisi dei costi (al netto dei costi di trasporto del materiale) associati a ciascuna ipotesi progettuale.

Voci di spesa	Unitari	Costi (€)		
		I	IIo	IIIo
Abbattimento piante	5 €/cadauna	11.890	7.925	3.960
Sbancamenti di terra	3,87 €/m ³	40.867	25.387	9.907
Reinterri	1,55 €/m ³	16.368	10.168	3.968
Formazione di rilevato	3,82 €/m ²	82.742	55.146	27.561
Indennizzo servitù di passaggio	/	28.206	18.800	9.935
Manutenzione rete viaria (3 interventi)	2,783 €/m	60.144	40.089	20.037
Installazione aerogeneratori	1.000 €/kW	12.000.000	12.000.000	12.000.000
Allacciamento alla rete	/	400.000	380.000	190.000
Esercizio e manutenzione degli aerogeneratori	0,011 €/kWh	5.241.280	5.010.000	4.779.500
Totale	/	17.881.497	17.547.515	17.044.868

3.3 Analisi costi-benefici

Per verificare la sostenibilità e fattibilità di ciascuna ipotesi progettuale ed individuare la soluzione ottimale risulta necessario effettuare una valutazione eco-

nomica-finanziaria dei progetti. Nel caso esaminato, ci troviamo di fronte ad un investimento semplice di tipologia PICO (point input, continuous output). Tale investimento prevede un esborso puntuale, cioè concentrato inizialmente, cui segue una serie di flussi netti positivi.

A partire dai valori calcolati nei precedenti paragrafi, risulta possibile effettuare una valutazione degli investimenti, per ciascuna ipotesi progettuale, secondo i ben noti criteri di giudizio, quali: valore attuale netto (VAN), saggio di rendimento interno (SRI) e tempo di ritorno del capitale (TRC). È sembrato inoltre opportuno prendere in considerazione un ulteriore parametro: Rapporto Entrate/Uscite (REU). (Gallerani, Zanni e Viaggi 2004). Per esplorare le caratteristiche dell'investimento ed evitare una scelta soggettiva in materia di saggio di sconto si sono eseguiti i calcoli impiegandone quattro: 1,5%, 2%, 3% e 5%. La scelta di tali valori riguarda unicamente come obiettivo quello di parametrizzare questo importante elemento nella valutazione dell'investimento al fine di osservarne il "comportamento" sotto il profilo finanziario. Appare evidente che, nel caso in cui fosse effettivamente necessaria una verifica della convenienza, o meno, dell'investimento, si dovrebbe impiegare il saggio di sconto più opportuno.

L'orizzonte temporale, preso in considerazione, risulta essere di 20 anni.

La Tab. 7 mostra il cash flow netto tra i benefici ed i costi associati alla soluzione progettuale I. Le Tab. 8 e 9 evidenziano i quattro criteri sopra indicati e utilizzati per la valutazione del progetto nelle sue ipotesi alternative. Da queste tabelle risulta che il VAN è sempre positivo e che l'alternativa progettuale I presenta sempre valori superiori alle altre due. Tali valori si riducono fortemente, fino a dimezzarsi, al crescere del saggio di sconto. Lo stesso comportamento appare evidente anche per gli altri criteri. Appare interessante sottolineare come il REU non vari di molto tra le condizioni migliori (Ipotesi I) e quelle peggiori (Ipotesi III₀), occupando una forbice che va dall'1,777 massimo all'1,347 minimo. Anche il TRC scarta di appena 3 anni dalla situazione ottimale (Ipotesi I – Tasso di sconto 1,5%) a quella peggiore (Ipotesi III₀ – Tasso di sconto 5%).

3.4 Considerazioni sui risultati

L'analisi Costi-Benefici è stata effettuata unicamente per le soluzioni progettuali che ipotizzavano la localizzazione degli aerogeneratori sul crinale, a mezzacosta ed alla base del versante nord-ovest della dorsale in esame. Analizzando i risultati ottenuti dall'analisi del valore attuale netto associato a ciascuna soluzione progettuale, risulta evidente che, il decremento di produzione di energia dovuto all'installazione delle turbine eoliche a mezzacosta o alla base dei versanti, risulti solamente in parte, bilanciato da un abbattimento dei costi di installazione degli aerogeneratori e di creazione della rete viaria (necessaria alla creazione ed alla manutenzione del parco eolico) e da un decremento dell'impatto visivo causato dalle suddette strutture.

A partire dallo studio dell'analisi del VAN si evince che, per saggi di sconto pari a 1,5%, 2%, 3% e 5% la soluzione ottimale, dal punto di vista economico, sia quella

Tabella 7. Cash flow dei costi e dei benefici per l'ipotesi progettuale I.

Anno	Uscite (€)				Benefici (€)
	Costruzione e manutenzione rete viaria	Acquisto - manutenzione aerogeneratori	Allaccio alla rete	Perdita di qualità del paesaggio	Energia elettrica prodotta
0	185.073	12.000.000	400.000	318.654	0
1	0	166.768	0	0	4.568.292
2	0	166.768	0	0	4.568.292
3	0	166.768	0	0	4.568.292
4	0	166.768	0	0	4.568.292
5	20.048	166.768	0	0	4.568.292
6	0	214.416	0	0	4.568.292
7	0	214.416	0	0	4.568.292
8	0	214.416	0	0	4.568.292
9	0	214.416	0	0	4.568.292
10	20.048	214.416	0	0	4.568.292
11	0	333.534	0	0	4.568.292
12	0	333.534	0	0	4.568.292
13	0	333.534	0	0	4.568.292
14	0	333.534	0	0	4.568.292
15	20.048	333.534	0	0	4.568.292
16	0	333.534	0	0	4.568.292
17	0	333.534	0	0	4.568.292
18	0	333.534	0	0	4.568.292
19	0	333.534	0	0	4.568.292
20	0	333.534	0	0	4.568.292
Parziale	245.217	17.241.280	400.000	318.654	91.365.840
Totale		18.205.151			91.365.940

che prevede l'installazione degli aerogeneratori sulla cima della dorsale esaminata. Nonostante ciò, risulta interessante sottolineare che la differenza del valore attuale netto tra la suddetta soluzione e quella che prevede la localizzazione delle turbine a mezzacosta del versante appare estremamente limitata. Essa assume valori leggermente crescenti dal 4,91% al 5,15% per saggi di sconto sempre più elevati.

A questo punto, è evidente che l'analisi costi-benefici effettuata giustifica, solo in parte, la considerazione secondo cui l'abbattimento dei costi dovuti all'installazione di turbine eoliche a quote più basse rispetto alla cima del crinale riesca a

Tabella 8. Valori del VAN associati a ciascuna ipotesi progettuale.

Ipot. Prog.	VAN (€)			
	Tasso di sconto (%)			
	1,5	2	3	5
I	61.232.665	57.742.582	51.444.887	41.116.024
II _o	58.231.458	54.894.736	48.873.760	38.998.695
III _o	55.246.538	52.062.534	46.317.115	36.893.943

Tabella 9. Valori del REU, TRC e SRI associati alle diverse ipotesi progettuali.

Ipot. Prog.	REU				TRC (anni)				SRI %
	Tasso di sconto %								
	1,5	2	3	5	1,5	2	3	5	
I	4,560	4,405	4,114	3,599	4	5	5	5	34
II _o	4,479	4,325	4,037	3,529	5	5	5	5	33
III _o	4,394	4,242	3,957	3,456	5	5	5	5	33

giustificare dal punto di vista economico una certa perdita di produttività del parco eolico.

Tale risultato è condizionato dal fatto che nell'elaborazione dell'indagine economica non sono stati presi in considerazione alcuni inputs strettamente connessi alla creazione di un impianto eolico. Tali inputs sono: i costi associati al trasporto di materiale (tecnologico o meno) su terreno disagiata (pista forestale), all'organizzazione del cantiere, alla creazione di opere accessorie. Questi costi risulterebbero sicuramente minori in un parco eolico localizzato a quote meno elevate rispetto ad uno situato sul crinale di un qualsiasi rilievo montuoso.

Inoltre, l'analisi costi-benefici mette in risalto come la perdita di qualità del paesaggio (con la metodologia qui adottata) relativamente ad una *wind farm*, incida in maniera molto modesta sul bilancio economico effettuato per la stessa. Il danno monetario associato all'impatto visivo generato dalla centrale eolica è stato qui stimato con un procedimento ancora tutto da approfondire, che prende spunto dalla metodologia di stima delle piante ornamentali con metodi multi-parametrici (Minelli, Pirazzoli e Regazzoni 2005). La valutazione economica del danno visivo potrebbe alternativemente essere realizzata, come si è già detto, mediante l'ausilio di metodologie forse più appropriate come la valutazione contingente, o il valore edonico.

Il rapporto entrate uscite (REU), per qualsiasi saggio parametrizzato di sconto preso in considerazione, assume valori più elevati per l'ipotesi progettuale che prevede la localizzazione delle turbine sul crinale della dorsale, rispetto a quelli riscontrati nelle soluzioni, che ipotizzano la presenza degli aerogeneratori a mezza-

costa ed alla base del versante. Anche in questo caso le differenze di valori inerenti tale parametro appaiono effettivamente molto modeste e ampiamente giustificate dalle considerazioni elaborate precedentemente.

Il tempo di ritorno del capitale (TRC), ovvero il periodo necessario affinché le entrate attualizzate superino le uscite attualizzate, resta nella maggior parte dei casi esaminati quasi costante, per ciascun tasso di sconto utilizzato.

I diversi valori del saggio di rendimento interno (SRI) sottolineano come l'investimento più redditizio sia quello associato all'ipotesi progettuale I (cima della dorsale) (34%), mentre le soluzioni progettuali II₀ e III₀ presentano SRI pari al 33%. La modesta differenza presente nei valori riscontrati per tale parametro nelle differenti ipotesi progettuali mette in luce il fatto che, nonostante la soluzione ottimale risulti quella che prevede l'installazione delle turbine sul crinale del rilievo, le proposte che ipotizzano la localizzazione delle turbine eoliche a mezzacosta ed alla base del versante sono degne di seria considerazione in quanto non eccessivamente difforni.

Alla luce dell'analisi economico-finanziaria eseguita e di tutte le considerazioni precedentemente elaborate, appare evidente come la soluzione progettuale, che ipotizza l'installazione degli aerogeneratori a mezzacosta del versante, sia tutt'altro che una proposta economicamente trascurabile. La sostenibilità economica della suddetta ipotesi dovrebbe essere ancora meglio approfondita prendendo in considerazione tutti gli altri fattori rilevanti per l'analisi Costi-Benefici che per brevità sono stati necessariamente omessi per sviluppare sostanzialmente una idea progettuale e trovarne alcune preliminari verifiche.

4. Conclusioni

In conclusione, i risultati ottenuti aprono una discussione da sviluppare ancora opportunamente e tale da consentire la formulazione di ipotesi più specifiche da sottoporre a vaglio di congruità. Un abbassamento ragionevole della quota di installazione degli aerogeneratori causa necessariamente una perdita di energia elettrica che, però, appare modesta in confronto alle usuali soluzioni progettuali con le torri eoliche sui crinali dei versanti. Nel contempo, posizionamenti diversi da quest'ultimi garantirebbero una riduzione dei costi associati all'installazione di un parco eolico abbastanza rilevanti ed in grado di bilanciare la perdita di efficienza ancora tutta da verificare, seppure ragionevolmente qui ipotizzabile. Queste considerazioni possono risultare validi punti di partenza, per approfondimenti inerenti alla pianificazione ottimale del territorio nel campo eolico.

In conclusione, l'analisi effettuata per la dorsale Monte Quarticcio-Maggiorana, costituisce un caso di studio, che si spera possa contribuire a generare nuovi approcci operativi al fine di perfezionare le procedure di installazione di un parco eolico.

Le soluzioni, che ipotizzano l'installazione di turbine eoliche a mezzacosta ed alla base dei versanti, potrebbero diventare alternative veramente applicabili in situazioni particolari, in cui, grazie a determinate conformazioni topografiche e di ventosità, i flussi d'aria si incanalassero nelle vallate. In tali condizioni queste ipo-

tesi progettuali risulterebbero sicuramente vincenti, sia per quanto riguarda la produttività, che l'impatto visivo associati ai parchi eolici.

5. Bibliografia

- Barra L., Pirazzi L. & Arena A. 2000. *Energia eolica. Aspetti tecnici, ambientali e socio-economici*. Roma, Unità Comunicazione e Informazione, Servizio Edizioni e Documentazione dell'ENEA.
- Bellecci C., Casella L. & Federico S. 2004. *Energia eolica. Metodologia per la stima dell'energia prodotta da una fattoria del vento*. Roma, Aracne.
- Bradley E.F. 1980. An experimental study of the profiles of wind speed, sharing stress and turbulence at the crest of a large hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 106: 101-123.
- Fagarazzi C., Fratini R. & Riccioli F. 2007. Stima della funzione paesaggistica delle fustaie transitorie di cerro: il caso delle Colline Metallifere. In: *Biodiversità e tipicità. Paradigmi economici e strategie competitive* (Atti del XLII Convegno di Studi, Pisa, 22-24 settembre 2005). Milano, Franco Angeli.
- Gallerani V, Zanni G. & Viaggi D. 2004. *Manuale di Estimo*. Milano, McGraw-Hill.
- Minelli A., Pirazzoli C. & Regazzoni A. 2007. *La valutazione dei giardini storici* (Atti del XLII Convegno di Studi, Pisa, 22-24 settembre 2005), Milano, Franco Angeli.
- Gisotti G., Fabbri M. & Quoiani M. 1998. Valutare un'alterazione paesaggistica: applicazione di un metodo, *Genio rurale* 9: 17-29.
- Jackson P.S. & Hunt J.C.R. 1975. Turbulent win flow over a low hill. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 101: 929-955.
- Polelli M. 1997, *Trattato di estimo*. Rimini, Maggioli Editore.
- <<http://www.certificativerdi.it/>>
- <http://www.comunedirialto.it/fattibilita_rialto.pdf>
- <http://dimeca.unica.it/~cocco/Eolico_parte1.pdf>
- <<http://www.energia-eolica.it/>>
- <<http://www.inea.it/>>
- <<http://www.mercatoelettrico.org/It/MenuBiblioteca/documenti/20070614RelazioneAnnuale2006.pdf>>
- <<http://www.regione.lazio.it/web2/contents/infrastrutture/argomento.php?vms=1>>
- <<http://www.rete.toscana.it/sett/agric/foreste/doc-per-enti/prezzario.pdf>>
- <<http://www.sviluppo.lazio.it/>>