

**PAESAGGIO ED ENERGIA EOLICA: UNA METODOLOGIA A DUE STADI PER LA VALUTAZIONE DELLE LOCALIZZAZIONI DEGLI IMPIANTI**

Massimiliano PETRI<sup>1</sup>, Monica ROSSI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Civile, via Diotisalvi 2, 56126 Pisa

<sup>2</sup> Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Energetica, via Diotisalvi 2, 56126 Pisa

**SOMMARIO**

Il presente lavoro sviluppa una metodologia per l'individuazione e la valutazione della localizzazione di impianti eolici. La ricerca prende in considerazione alcuni elementi di attenzione come la necessità di un crescente utilizzo di fonti energetiche di tipo rinnovabile, così come richiesto dalla Comunità Europea, ma anche la notevole sensibilità ambientale del paesaggio toscano e dei suoi fruitori.

Gli elementi di attenzione indicati sono dunque i caratteri del paesaggio definiti da un lato da fattori fisici, naturali e storici e, dall'altro, dalle percezioni e dagli obiettivi della popolazione. Su questa base, si è costruita una metodologia articolata in due parti e finalizzata alla classificazione del territorio analizzato in aree più o meno sensibili dal punto di vista paesaggistico sia in base alle relazioni fra i caratteri fisici, naturali e storici e visibilità degli impianti, sia delle percezioni individuali dei valori del paesaggio.

La metodologia è stata applicata alla valutazione di localizzazioni alternative di un impianto eolico nel comune di Santa Luce (Provincia di Pisa).

## 1 INTRODUZIONE

La metodologia per l'individuazione e la valutazione della localizzazione di impianti eolici nasce dalla necessità di un crescente utilizzo di fonti energetiche di tipo rinnovabile, così come richiesto dalla Comunità Europea, ma anche la notevole sensibilità ambientale del paesaggio toscano. La recente Convenzione Europea del Paesaggio, firmata a Firenze nel 2000 e ratificata dall'Italia il 9 gennaio 2006, riporta ai suoi due primi articoli che cosa si intende per paesaggio e quali obiettivi si deve porre una politica "paesaggistica". L'art.1 indica che il *"paesaggio designa una determinata parte del territorio, così come è percepita dalla popolazione, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni"*. La politica del paesaggio dovrà permettere l'adozione di *"misure specifiche finalizzate a salvaguardare, gestire e pianificare il paesaggio"* al fine di soddisfare le *"aspirazioni delle popolazioni per quanto riguarda le caratteristiche paesaggistiche del loro ambiente di vita"*, intendendo come popolazioni tutti i soggetti locali che sono portatori di interessi relativamente alla installazione degli impianti eolici.

Gli elementi di attenzione indicati sono dunque i caratteri del paesaggio definiti da un lato da fattori fisici, naturali e storici e, dall'altro, dalle percezioni e dagli obiettivi della popolazione.

## 2 OBIETTIVO

Come previsto dalle "Linee Guida per la valutazione dell'impatto ambientale degli impianti eolici" (Regione Toscana, 2004), lo scopo generale di uno studio di questo tipo consiste nella valutazione della sensibilità del territorio nei confronti del futuro impianto.

Obiettivo del presente studio è, partendo dalle indicazioni presenti nelle Linee Guida, la costruzione di una metodologia che introduca elementi di chiarezza e tecniche innovative per una corretta e trasparente costruzione di valutazioni e per un preciso supporto alle decisioni sulla quantificazione degli impatti, sulla migliore localizzazione dei singoli impianti e sulle eventuali tecniche di mitigazione.

In conclusione l'obiettivo è quello di creare una metodologia e quindi uno strumento

- di supporto alla decisione, permettendo la creazione di diversi scenari di impatto sulla base sia di analisi tecnicamente valide sia di preferenze individuali
- di incentivazione alla partecipazione della popolazione ai progetti pubblici, nella ricerca di possibili soluzioni condivise.

Su questa base, si è costruita una metodologia finalizzata alla classificazione del territorio analizzato in aree più o meno sensibili dal punto di vista paesaggistico sia in base alle

relazioni fra i caratteri fisici, naturali e storici e visibilità degli impianti, sia delle percezioni individuali dei valori del paesaggio.

### **3 METODOLOGIA**

#### *3.1 PREMESSA METODOLOGICA*

Analizzando in dettaglio quanto espresso dalle Linee Guida, si nota come la metodologia da esse proposta parta da una chiara e ben definita area di probabile localizzazione dell'impianto eolico, indicando solo la necessità di una "motivazione" di questa scelta. E' questa scelta una delle fasi principali nella progettazione di un impianto eolico e spesso risulta un passo che influisce notevolmente sull'impatto globale finale e nella fase successiva di localizzazione puntuale degli impianti.

Quindi anche questa prima parte procedurale necessita di una strutturazione metodologicamente dettagliata.

Inoltre le Linee Guida cercano di valutare la qualità paesaggistico-storica mediante una serie di indici:

- indici, derivanti dal campo dell'ecologia del paesaggio quali l'Indice di Shannon, di Hill oppure il Change Index di Sharpe, capaci di rappresentare le caratteristiche complessive del mosaico paesaggistico, della sua frammentazione e delle singole tessere che lo caratterizzano;
- l'indice storico, capace di stimare numericamente il valore di emergenza storica di un sistema di paesaggio;
- l'analisi di intervisibilità;
- l'analisi della frequentazione del paesaggio e della qualità e quantità dei flussi antropici.

Quello che risulta eccessivamente semplificato è il collegamento fra tutti gli indici/criteri suddetti come passo finale per la valutazione dell'impatto dell'impianto eolico sul paesaggio; viene proposta una semplice tecnica di sovrapposizione dei diversi criteri, mediante opportune pesature per tener in conto dell'importanza relativa dei criteri ma non viene analizzata la percezione individuale del territorio, fattore determinante nella definizione stessa di paesaggio.

### 3.2 LA METODOLOGIA GENERALE

La metodologia, applicata alla valutazione di localizzazioni alternative di un impianto eolico nel comune di Santa Luce (Provincia di Pisa), presenta una chiara distinzione fra la fase di individuazione delle aree di impianto basata sull'analisi di sensibilità alla localizzazione di probabili impianti e la successiva valutazione di impatto ambientale dell'impianto localizzato o delle alternative di localizzazione.

All'interno di entrambe le fasi si è cercato di prendere in considerazione sia il fattore oggettivo che quello soggettivo, al fine di avere una soluzione il più possibile partecipata e di non fare cercare il consenso dei soggetti portatori di interesse solo in una fase troppo avanzata, errore che spesso si è dimostrato vero ostacolo alla realizzazione dell'impianto.

Siamo comunque coscienti che il fattore soggettivo assume un peso rilevante soprattutto nella fase di scelta dell'area di impianto in quanto la partecipazione dei cittadini è un elemento essenziale per una dettagliata analisi di conoscenza dei luoghi, delle loro relazioni e della loro percezione sociale (intesa come comprensione dei significati culturali storici e recenti), analisi indispensabile proprio alla prima fase procedurale.

Relativamente all'indagine delle percezioni e preferenze individuali, la stessa Convenzione Europea del Paesaggio prevede la formazione di strumenti multidisciplinari nella consapevolezza che la tutela del paesaggio comporti la conservazione dell'identità di chi abita quel paesaggio (Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Dipartimento per i beni culturali e paesaggistici, Direzione per i beni architettonici e paesaggistici, 2006).

In conclusione l'analisi storico/culturale dei luoghi assume una rilevanza fondamentale e può aiutare a trasformare l'inevitabile problema dell'inserimento di un impianto eolico in un intervento che si integra con i caratteri del luogo, divenendone parte integrante e seguendone, per esempio, i tracciati principali, la morfologia, i rapporti dimensionali e altro.

Lo schema generale della metodologia adoperata è rappresentato in figura 1.

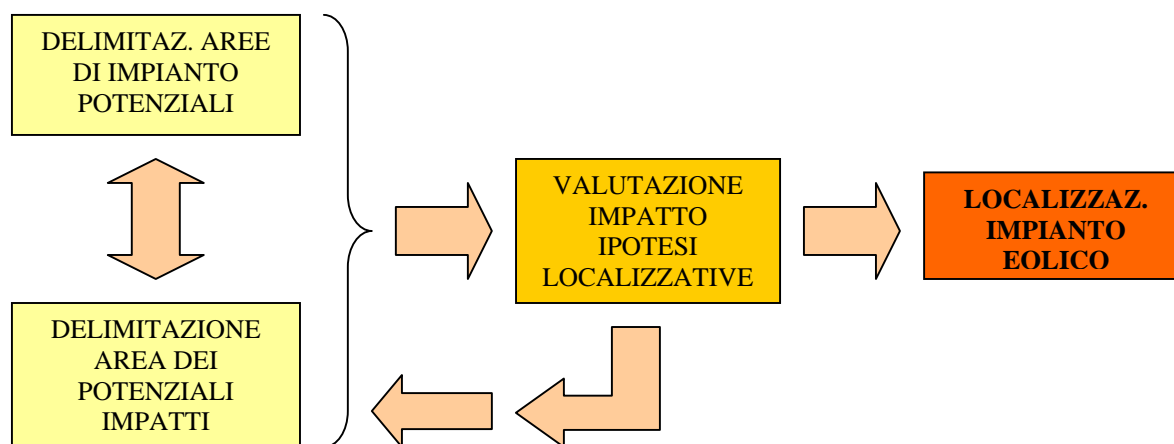


Figura 1 La metodologia di localizzazione

### 3.2.1 DELIMITAZIONE DELLE AREE DI IMPIANTO

Nella prima parte si è cercato di individuare una prima localizzazione dell' Area dei Siti di Impianto Potenziali (ASIP di primo livello), utilizzando l'analisi multicriteri e i seguenti criteri/attributi di scelta:

- mappe dei venti;
- vincoli legislativi nazionali, regionali e provinciali esistenti (per l'individuazione delle zone di escusione);
- sensibilità ambientale alla localizzazione delle varie parti dell'impianto (analizzando le singole componenti ambientali, la sensibilità ambientale deriva, come indicato nelle Linee Guida, dalla valutazione sia del valore intrinseco dell'oggetto impattato sia dalla vulnerabilità dello stesso alla localizzazione dell'impianto):

#### A) fauna

- presenza di rotte migratorie;
- presenza di specie svernanti di particolare valore e/o vulnerabilità (utilizzando il Repertorio Naturalistico della Toscana – Re.Na.To ed altre fonti quali la L.I.P.U., l'I.N.F.S.-Istituto Nazionale di Fauna Selvatica e altro).

#### B) flora

- presenza di specie di particolare valore e/o vulnerabilità (utilizzando il Repertorio Naturalistico della Toscana – Re.Na.To ed altre fonti).

#### C) aria

- inquinamento acustico (presenza di abitazioni o edifici)

#### D) suolo e sottosuolo

- pericolosità geomorfologia;
- pericolosità idraulica.

#### E) paesaggio e patrimonio storico/architettonico

- presenza di attrattori e/o detrattori paesaggistici;
- indice Storico;
- indice di Shannon (grado di frammentazione del mosaico paesaggistico);
- indice di Hill (dominanza di particolari usi del suolo);
- Change Index di Sharpe (dinamiche evolutive dell'uso del suolo);
- analisi di visibilità (analisi della “frequenza visiva”, del campo visivo, ecc..).

#### F) infrastrutture viarie

- distanza da strade;

- distanza da centrali elettriche.

In questa fase devono essere prese in considerazione, per la prima volta, le preferenze degli attori interessati al processo di localizzazione dell'impianto eolico (popolazione locale, imprenditori agricoli e turistici, amministrazione locale, ambientalisti, ecc.).

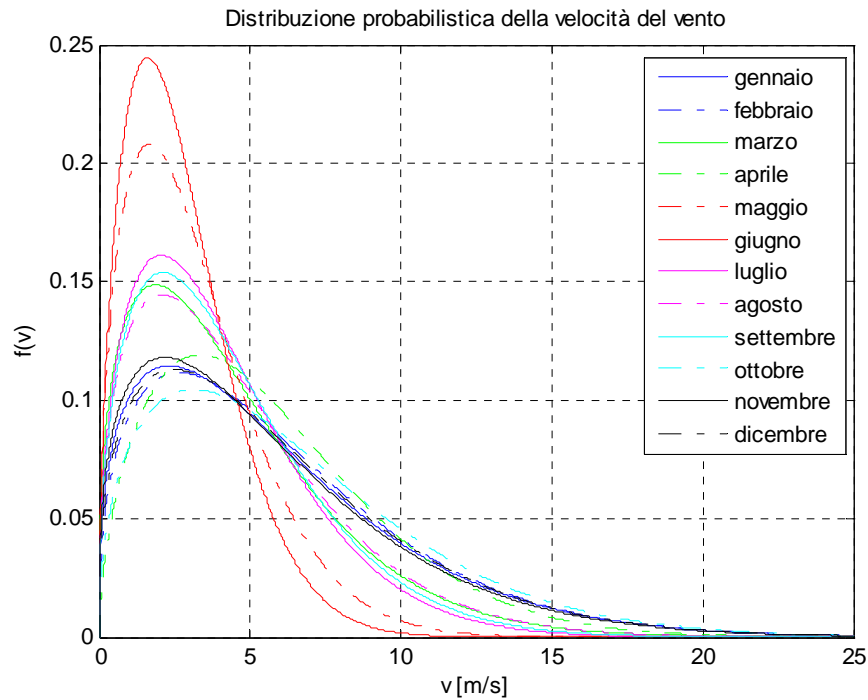
Avendo già effettuato le analisi di area vasta, è possibile presentare la situazione agli attori e, attraverso un processo partecipativo trasparente, arrivare alla localizzazione più condivisa tra i diversi portatori di interesse.

Vengono nei prossimi paragrafi descritte le fasi di analisi della sensibilità d'area vasta (parte prima della metodologia), limitandosi alla valutazione della produttività del territorio (attraverso le mappe di ventosità), all'analisi paesaggistica e infine alla fase di partecipazione in quanto sono le fasi della ricerca che hanno contribuito maggiormente a guidare la stesura metodologica.

### 3.2.1.1 *MAPPE DEI VENTI*

Oggigiorno la tecnologia rinnovabile più evoluta (non considerando l'idroelettrico) per la generazione di energia elettrica è quella eolica, mediante l'installazione di aerogeneratori.

A partire dai dati forniti da alcune centraline anemometriche della zona, è stata studiata la distribuzione delle correnti ventose nel corso dei mesi per l'anno 2003 (Rossi, 2007), per particolari punti del terreno, andando a determinare i due parametri caratteristici della distribuzione probabilistica della velocità del vento di Weibull  $k$  e  $c$  e, successivamente, sono stati elaborati i principali parametri (fattore di capacità  $C_F$ , fattore di disponibilità  $A_F$  e il rendimento della macchina  $\eta$ ) che permettono di stabilire la sfruttabilità del sito in esame accoppiando i dati di ventosità con quelli caratteristici della macchina. Alcune valutazioni eseguite sfruttando la formula di Jackson e Hunt per la valutazione dell'accelerazione che una corrente eolica può subire alla presenza di un rilievo semplice ed isolato, come una collina, hanno permesso di stimare l'accelerazione che una corrente eolica può presentare in presenza di una conformazione orografica più complessa come quella del caso in esame e capire il valore di tutti i parametri menzionati sopra per un punto distante da quello in cui è avvenuta la rilevazione.

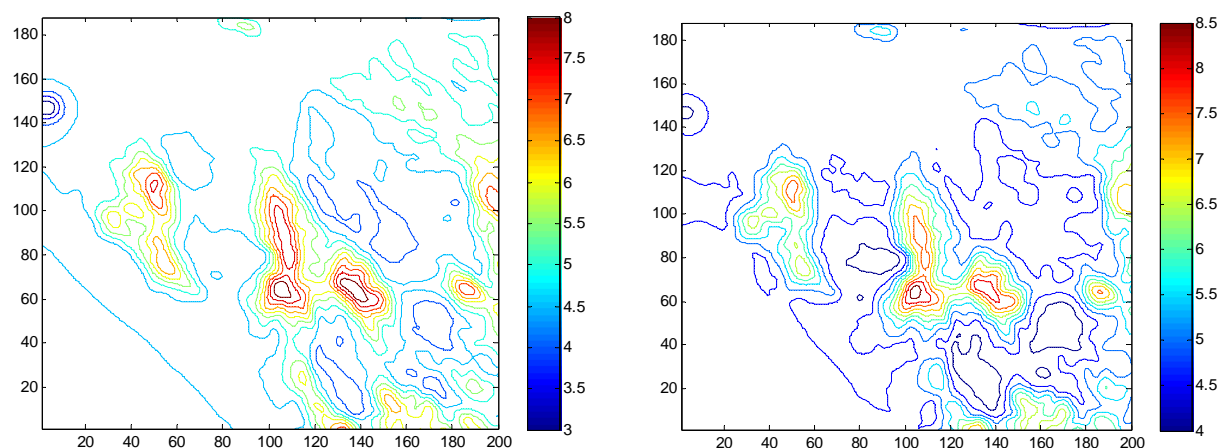


*Figura 2* Andamento delle curve di Weibull al variare dei mesi

Successivamente è stata elaborata l'analisi del vento su una porzione di territorio: è stata costruita una mappa del vento della zona in esame. Utilizzando, infatti, i dati delle centraline anemometriche, questi sono stati elaborati in modo tale da costruire dei file idonei ad essere utilizzati come file di input per il programma Calmet.

I file di uscita delle simulazioni mensili (i quali riportano i dati orari, per tutta la zona in esame del campo di vento, per diversi livelli di altezza sulla superficie del terreno) eseguite con Calmet sono state ulteriormente elaborate inserendole come input al software Matlab al fine di effettuare delle mappe riportanti le velocità medie mensili, sfruttando alcuni file Matlab appositamente creati.

Il risultato dell'analisi puntuale eseguito nella prima parte e quello derivante dall'analisi del vento per uno stesso punto della zona in esame, permettono di verificare la presenza di porzione di territorio con correnti eoliche abbastanza elevate, presentando un valor medio annuale della velocità superiore a 5.0 m/s.



*Figura 3* Curve di isovelocità a 75 m sul livello del terreno (mesi di gennaio e giugno)

Dalle mappe dei venti si delimitano delle prime potenziali aree di impianto e quindi si passa all'analisi delle varie componenti ambientali e dei vincoli in esse esistenti.

### 3.2.1.2 ANALISI STORICO-PAESAGGISTICA

L'analisi storico-paesaggistica è costituita dallo studio del contesto culturale, storico, dall'analisi della visibilità. Il problema maggiore è la quantificazione numerica soprattutto per i primi fattori. Per questo motivo abbiamo scelto di utilizzare i seguenti criteri, tutti facilmente misurabili:

- A) analisi di visibilità (analisi della “frequenza visiva”);
- B) presenza di attrattori e/o detrattori paesaggistici;
- C) indice Storico;
- D) indice di Shannon (grado di frammentazione del mosaico paesaggistico);
- E) indice di Hill (dominanza di particolari usi del suolo);
- F) Change Index di Sharpe (dinamiche evolutive dell'uso del suolo).

Per ciascun punto verrà calcolato un indice per ogni cella del territorio e quindi sarà possibile ricavare un indice globale moltiplicando, mediante la Map Algebra, i singoli indici.

Si deve premettere che un problema preliminare è quello dell'individuazione della distanza massima di visibilità, senza la quale non si riuscirebbe ad individuare le zone del territorio influenzate dalle torri eoliche all'interno delle quali fare le suddette analisi (Petri e Rossi, 2007).

### CALCOLO DELLA DISTANZA DI MINIMA VISIBILITA'

L'analisi della distanza di minima visibilità è stata fatta prendendo in considerazione:



1. Analisi della capacità percettiva dell'occhio umano;
2. Analisi della reale visibilità di impianti esistenti;
3. Analisi dell'influenza della curvatura terrestre;
4. Analisi dei dati di visibilità dell'aeroporto Galilei di Pisa (influenza dell'umidità relativa dell'aria)

1 Una prima indicazione è fornita dall'analisi delle Linee Guida del Ministero per i Beni e le Attività Culturali. In queste ultime si riporta: *“il potere risolutivo dell'occhio umano, pari ad un arco di 1 minuto (1/60 di grado), ad una distanza di 20 km è di circa 5,8 metri, il che significa che sono visibili oggetti delle dimensioni maggiori di 6 metri. Considerato che il diametro in corrispondenza della navicella generalmente non supera i 3 metri di diametro, si può ritenere che a 20 km l'aerogeneratore ha una scarsa visibilità ad occhio nudo e conseguentemente che l'impatto visivo è sensibilmente ridotto”*.

2 Inoltre, vista l'esistenza dell'impianto di Monte Vitalba (vedi figura 4) in cui sono localizzati aerogeneratori di dimensioni simili a quelli previsti per Poggio Ceraso, si è fatta una ricognizione in loco, per verificare l'effettiva visibilità degli aerogeneratori.

Nella figura seguente sono indicati i 3 punti, localizzati lungo la Strada Provinciale della Fila (n°64), dai quali si sono scattate le foto verso Monte Vitalba ricostruendo, mediante operazioni di zoom manuale, la scala di visualizzazione reale.

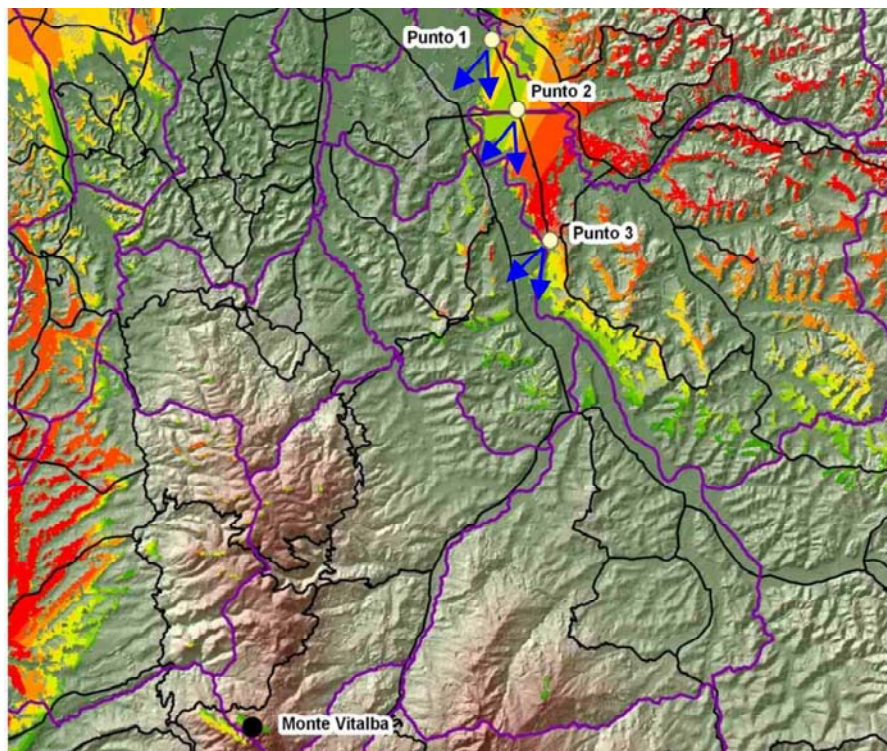


Figura 4 Mappa delle localizzazioni dei punti di ripresa fotografica

Dall'indagine fotografica (vedi figura 5) emerge come l'impianto, ad una distanza di 23 km sia scarsamente visibile, riuscendo ad individuarne, con molta attenzione, solamente le torri; ad una distanza di 20 km si cominciano a vedere anche le pale, di cui però si percepisce difficilmente il movimento, mentre ad una distanza di 17 km si arriva a percepire anche il movimento delle pale.

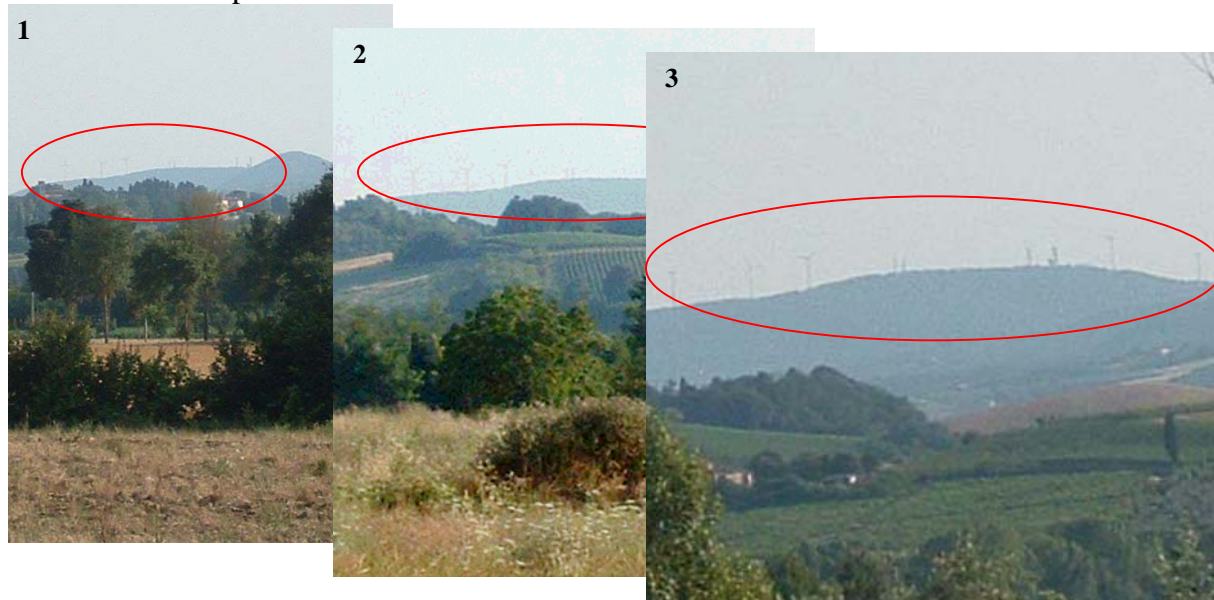


Figura 5 Riprese fotografiche rispettivamente da 23, 20 e 17.5 km

3 In modo analogo al metodo sfruttato dall'Istituto Idrografico della Marina Militare Italiana, si calcola innanzitutto la distanza di minima visibilità sfruttando il concetto di un punto che viene avvistato sulla linea dell'orizzonte (Rossi, 2007).

Nella Tavola 7 delle Tavole Nautiche si spiega come effettuare il calcolo in miglia marine per capire la distanza che intercorre tra un faro e una barca che si trova nel punto diametralmente opposto al faro, si trova cioè sulla linea dell'orizzonte.

La distanza che separa i due punti è detta  $D$  e nella formula fornita dalle Tavole Nautiche è espressa in miglia marine.  $E$  ed  $e$  sono invece le altezze, espresse in metri, del faro e del punto di osservazione della barca. Nel nostro caso avremo che  $E$  rappresenta l'altezza (fino alla sommità) della torre eolica.

La legge matematica che lega queste grandezze è la seguente:  $D = 2.04 \cdot (\sqrt{e} + \sqrt{E})$  [m] (1)

dove 2.04 rappresenta un coefficiente che tiene conto delle relazioni trigonometriche, dei fenomeni di rifrazione ottica atmosferica e della conversione da metri a miglia nautiche.

La distanza di minima visibilità  $d_{mv}$  rappresenta quindi la distanza massima esistente tra l'osservatore e l'osservato tale per cui un osservatore alto  $e$  metri da terra riesce a vedere, sulla linea dell'orizzonte, la punta di un oggetto alto  $E$  metri da terra, nel caso in cui tra i due punti non ci sia frapposto alcun ostacolo e le condizioni di visibilità siano buone.

Se per esempio ci mettiamo nel caso in cui la distanza di minima visibilità è pari a 100 km , ciò significa che un osservatore all'altezza di 1 m sul livello del mare non riesce vedere neppure la punta di un oggetto alto  $E_i$  da terra che si trova alla distanza di 100 km .

$$E_i = \left[ \left( \frac{d_i}{2.04 \cdot 1852} \right) - \sqrt{e_i} \right]^2 = \left[ \left( \frac{100000}{2.04 \cdot 1852} \right) - \sqrt{1} \right]^2 = 649.00 \text{ m}$$

Per una migliore comprensione della posizione spaziale dei due punti esaminati, si riporta una figura che mostra la posizione dei due punti sul livello del mare, la distanza di minima visibilità che li separa e l'effetto di sfericità posseduto dalla superficie terrestre che tende a nascondere oggetti troppo distanti dal punto di osservazione. In questo caso la sfericità della terra riesce a nascondere un albero alto 649 m sul livello del mare all'osservatore (figura 6).

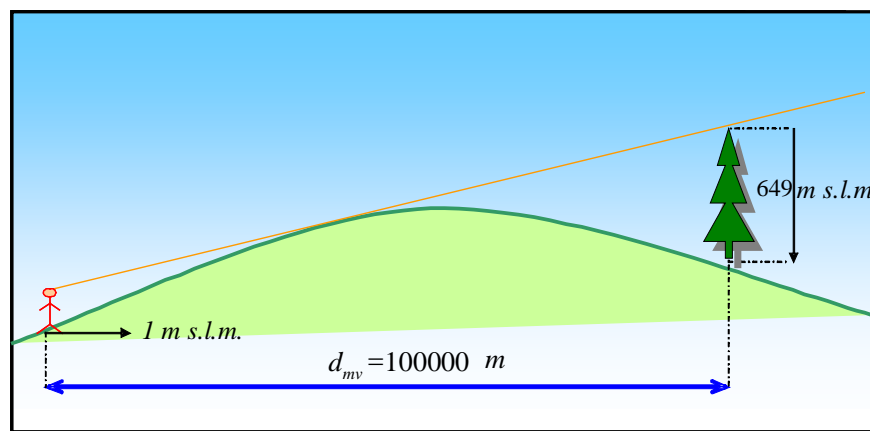


Figura 6 Esempificazione del calcolo della distanza di minima visibilità

Abbiamo integrato l'equazione (1) all'interno del GIS conoscendo l'altezza media s.l.m. delle torri eoliche da installare (sulla base dei risultati dell'analisi di produttività e supponendo un'altezza dal piede delle stesse di 80 metri) e ricavando, per ogni cella di 50 metri, in cui è stato diviso il territorio circostante, il valore di distanza minima di visibilità di un oggetto alto quanto le torri eoliche (vedi figura 7).

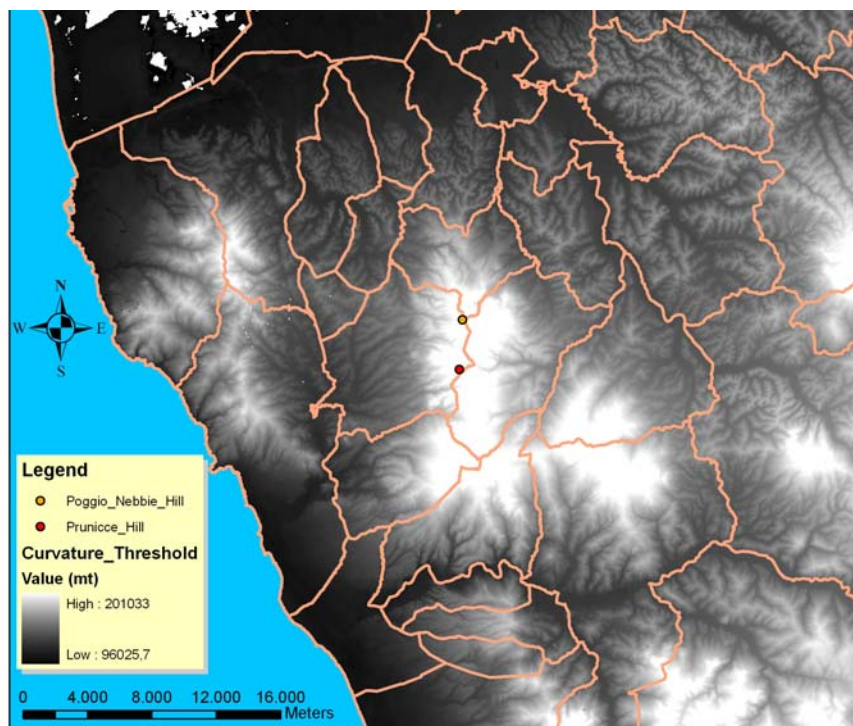


Figura 7 Valore della distanza di minima visibilità

Sottraendo, con operazioni di Map Algebra la distanza reale dall'impianto di ogni cella, si sono individuate le zone non visibili sulla base della semplice curvatura terrestre. Il risultato è che l'unica zona non visibile grazie alla sfericità della Terra è l'area di Orbetello.

4 Si è cercato adesso di capire che cosa influenzi la distanza minima di visibilità, elaborando un coefficiente moltiplicativo che diminuisce il valore teorico della stessa distanza. I valori di questo coefficiente sono stati determinati in base ai dati di massima visibilità forniti dall'aeroporto di Pisa.

Andando ad esaminare i dati forniti dall'aeroporto si nota che la visibilità varia a seconda dell'interazione di molti fattori quali la temperatura atmosferica, la pressione, la copertura nuvolosa, l'intensità del vento e l'umidità relativa. Mediante un'analisi di correlazione si è visto che il fattore che influenza di più la visibilità è l'umidità e quindi siamo andati a costruire un modello che lega direttamente la diminuzione della trasparenza atmosferica con l'aumento dell'umidità relativa presente nell'atmosfera stessa. Si sono calcolate delle curve ad isoumidità relativa che permettono di conoscere per ogni classe di umidità, la distanza massima a cui un elemento può essere visto al variare dell'umidità nell'aria (vedi figura 8).



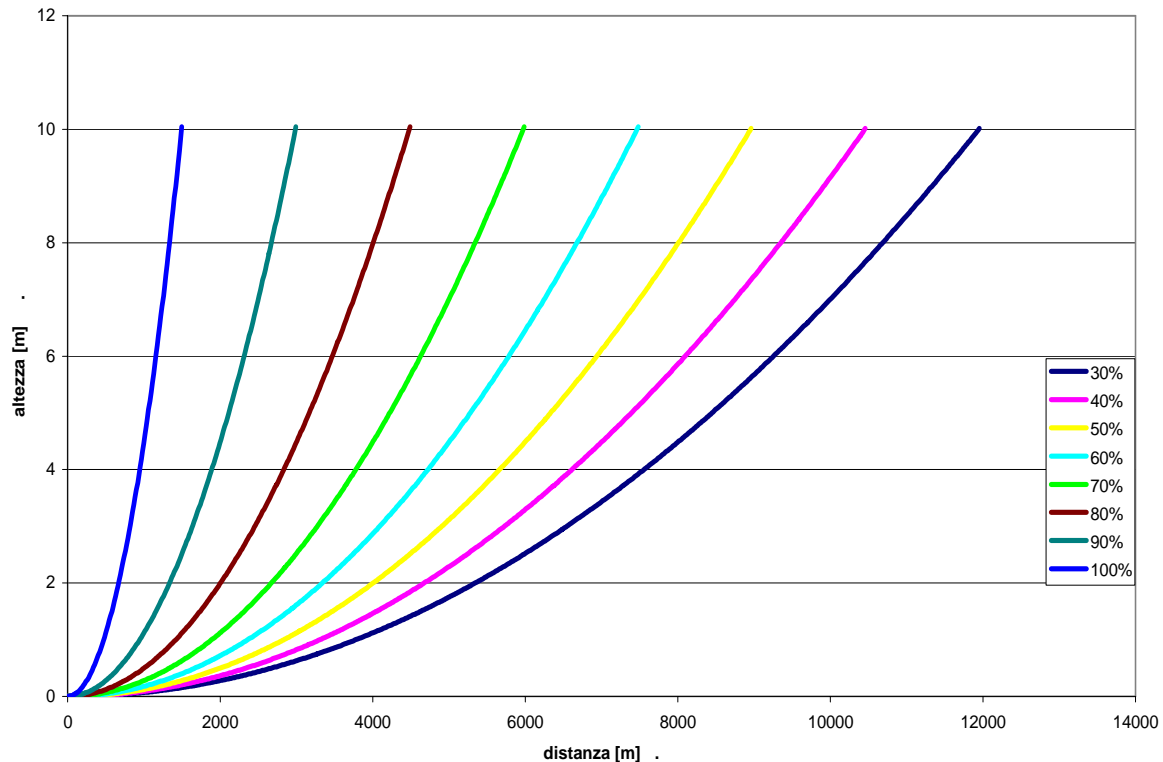


Figura 8 Curve di isoumidità relativa

La metodologia che ha portato alla determinazione delle varie curve di isoumidità relativa è partita dalla determinazione della curva al 30%. Infatti tale curva è quella che presenta la visibilità migliore, quindi i punti appartenenti a tale curva possono essere determinati a partire dalla formula della marina ipotizzando di conoscere la distanza che separa l'osservatore posto all'altezza del suolo ed un oggetto di altezza incognita.

L'altezza dell'oggetto è perciò determinata:

$$h = \left( \frac{D}{2.04 \cdot 1852} \right)^2 = 7.0058 \cdot 10^{-8} \cdot D^2 \text{ [m]}$$

Ad un aumento del 10% dell'umidità lo stesso oggetto di 11.6 m deve essere visto ad una distanza massima di 7 miglia.

Analizzando tutte le curve, esse presentano lo stesso andamento, rappresentato dalla formula generale:

$$h = 7.0058 \cdot 10^{-8} \cdot [D(1 + m)]^2$$

dove  $m$  è un parametro che dipende dall'umidità.

Confrontando tale formula con quella della Marina, si sono ricavati i fattori moltiplicativi della formula originaria, riportati in tabella 1.

*Tabella 1* Fattori moltiplicativi della distanza di minima visibilità teorica

	c
100%	0.13
90%	0.25
80%	0.37
70%	0.50
60%	0.63
50%	0.75
40%	0.87
30%	1.00

Tenendo conto che nel nostro territorio per la maggior parte dell'anno sono presenti valori di umidità superiori al 40% abbiamo considerato come distanza di massima visibilità quella di 20-25 km, coscienti di avere fatto una scelta “in sicurezza”.

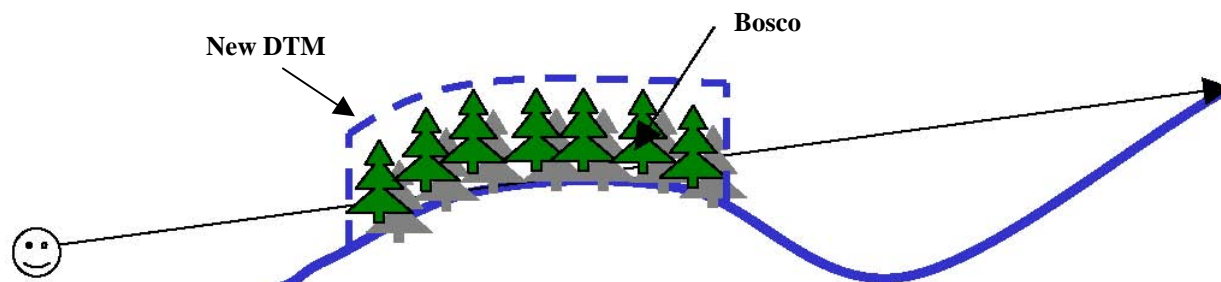
#### *A) ANALISI DI VISIBILITA'*

Un'analisi fondamentale risulta l'analisi della frequenza visiva, ovvero il calcolo, per ogni zona del territorio, della quantità di persone (cosiddetti “osservatori”) che possono vederla dal territorio circostante, sempre all'interno dell'area di impatto.

Per svolgere questa analisi si deve dapprima definire un sito di potenziale localizzazione e quindi, da questo, si calcola una prima area dei potenziali impatti, coincidente con l'area di intervisibilità e all'interno di questa si effettuerà l'analisi della “frequentazione visiva”.

Infatti, come indicato in figura 1, questa prima fase consiste in una interazione dinamica e continua tra area di impianto e aree di impatto, modificando la prima e vedendo la variazione della seconda, fino a determinare l'area che globalmente misura l'impatto minore.

Si è innanzitutto costruito il Modello Digitale del Terreno (DTM) “rialzato”, prendendo in considerazione gli elementi che ostruiscono o modificano la visibilità nell'area di studio; questo perché alcuni elementi possono variare la visibilità di alcuni luoghi rispetto ad un'analisi svolta considerando solamente la morfologia del terreno (come esemplificato nella figura 9).



*Figura 9* Esempio di ostruzione della visibilità

Dall'analisi della conformazione dell'area, delle presenze antropiche e naturali, il principale elemento da inserire per creare un DTM più realistico è il bosco, tenendo conto del possibile range di altezza per ogni tipo di pianta presente (diversa altezza della pianta in corrispondenza alla diversa età della stessa). La quota originaria del DTM è stata quindi rialzata, per ogni pixel, del valore dell'altezza della vegetazione..

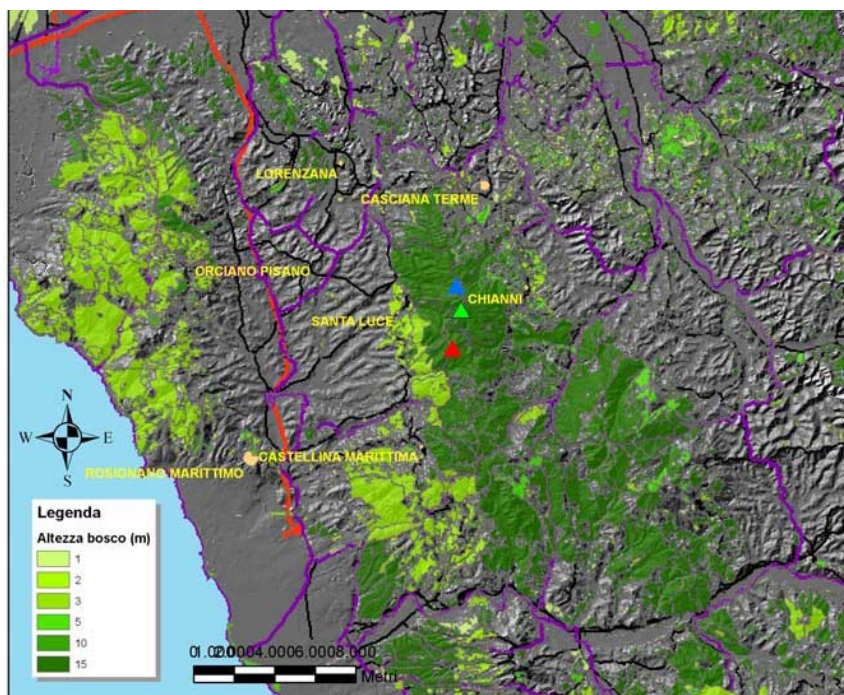


Figura 10 Mappa delle altezze della vegetazione

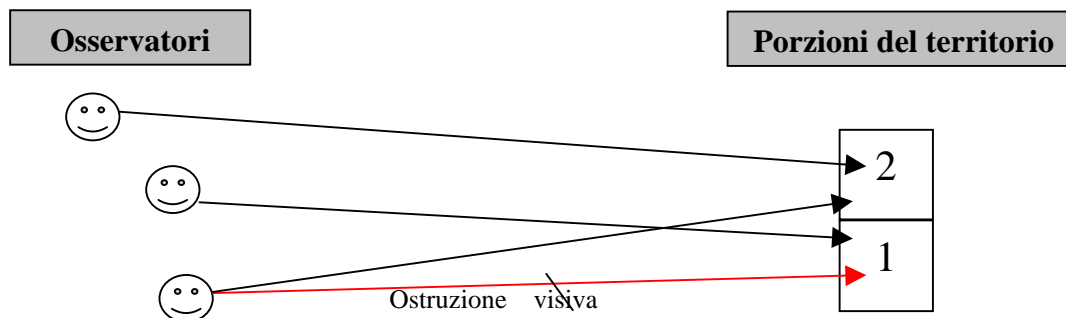
Il Piano di Gestione Forestale del complesso “Bosco di Santa Luce” suddivide le aree boscate in particelle e quindi si sono considerate le particelle ricadenti nell'area che l'analisi di ventosità dimostrava più vantaggiosa, al fine di delimitare l'**area di studio** per la localizzazione degli aerogeneratori.

L'area occupa circa 140 ettari di terreno, parte da Poggio Ceraso e, sfiorando la sommità di Poggio al Tiglio, arriva fino a Prunice interrompendosi per la presenza di un corso idrico (vedi figura 14).

#### VALUTAZIONE DELLA FREQUENZA VISIVA

Infine abbiamo svolto un'ultima indagine sulla visibilità, cercando di costruire un *indice di sensibilità visiva* dell'area di studio vasta. In altre parole è stata effettuata un'analisi volta a rappresentare la potenzialità visiva di ciascuna cella/porzione del territorio; in particolare per ogni cella del territorio sono stati individuati i potenziali punti di osservazione da cui la stessa cella risulta visibile (vedi figura 11). Tali punti di osservazione sono individuati come

centroidi delle celle nelle quali è maggiore la probabilità di avere fruitori visivi (abitanti di centri urbani, passeggeri dei treni, guidatori d'auto, ecc.).

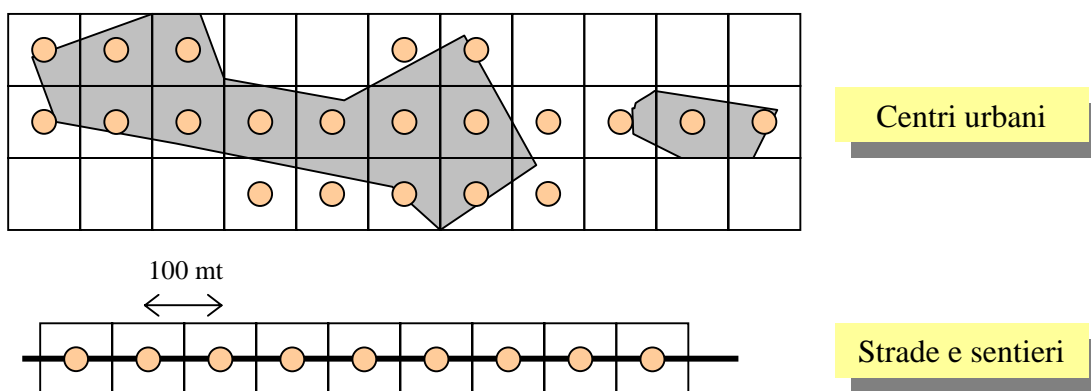


*Figura 11* Quantificazione dei fruitori visivi su celle di 20x20 mt

Gli osservatori sono stati divisi in tre gruppi principali:

- Osservatori dalle strade di transito (strade con principale funzione di collegamento);
- Osservatori da strade turistiche (strade con funzione di percezione del paesaggio, quali sentieri, ippovie, strade del trekking, mulattiere, ecc.);
- Osservatori dai centri urbani.

Gli osservatori sono stati quantificati prevedendo un passo di 100 metri, ovvero è stato creato un osservatore puntuale per ogni cella di lato 100 metri coperta da uno dei tre elementi territoriali suddetti, come indicato nella figura seguente (sono stati eliminati tutti gli osservatori che ricadevano all'interno di boschi).



*Figura 12* Metodologia di individuazione dei punti di osservazione

Nella figura 13 seguente è rappresentato l'esempio degli osservatori dalle strade.



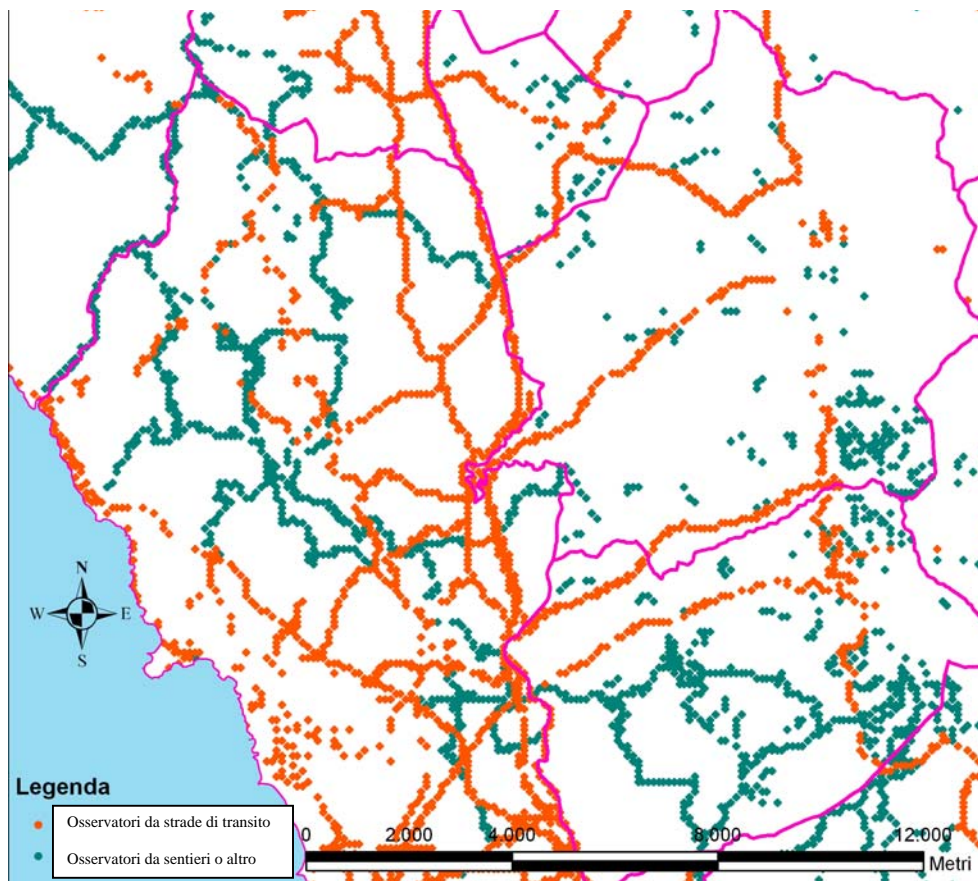


Figura 13 Osservatori dalle strade di comunicazione

Sono state ricavate tre carte di visibilità, relativamente alle tre tipologie di osservatori. In esse sono misurati, per ogni cella di lato 20 metri del territorio, il numero di osservatori da cui essa è visibile.

E' stata quindi ricavata una carta di visibilità totale effettuando una combinazione lineare dei tre rasters, supponendo una maggiore attenzione al paesaggio per gli osservatori localizzati nei sentieri, poi nei centri urbani e una minore attenzione alla qualità del paesaggio per coloro che percorrono le strade di collegamento.

Nella tabella 2 seguente sono indicati i pesi forniti nell'analisi.

Tabella 2 Pesi assegnati per il calcolo dell'indice di visibilità globale

	Visibilità dai sentieri	Visibilità da centri urbani	Visibilità da strade di transito
PESI	0.5	0.35	0.15

La mappa globale dell'indice di visibilità mostra l'area in esame come una zona dalla visibilità molto variabile e quindi si pone come primo elemento per la successiva localizzazione puntuale degli impianti. Nelle figura u seguente è mostrato il risultato finale.

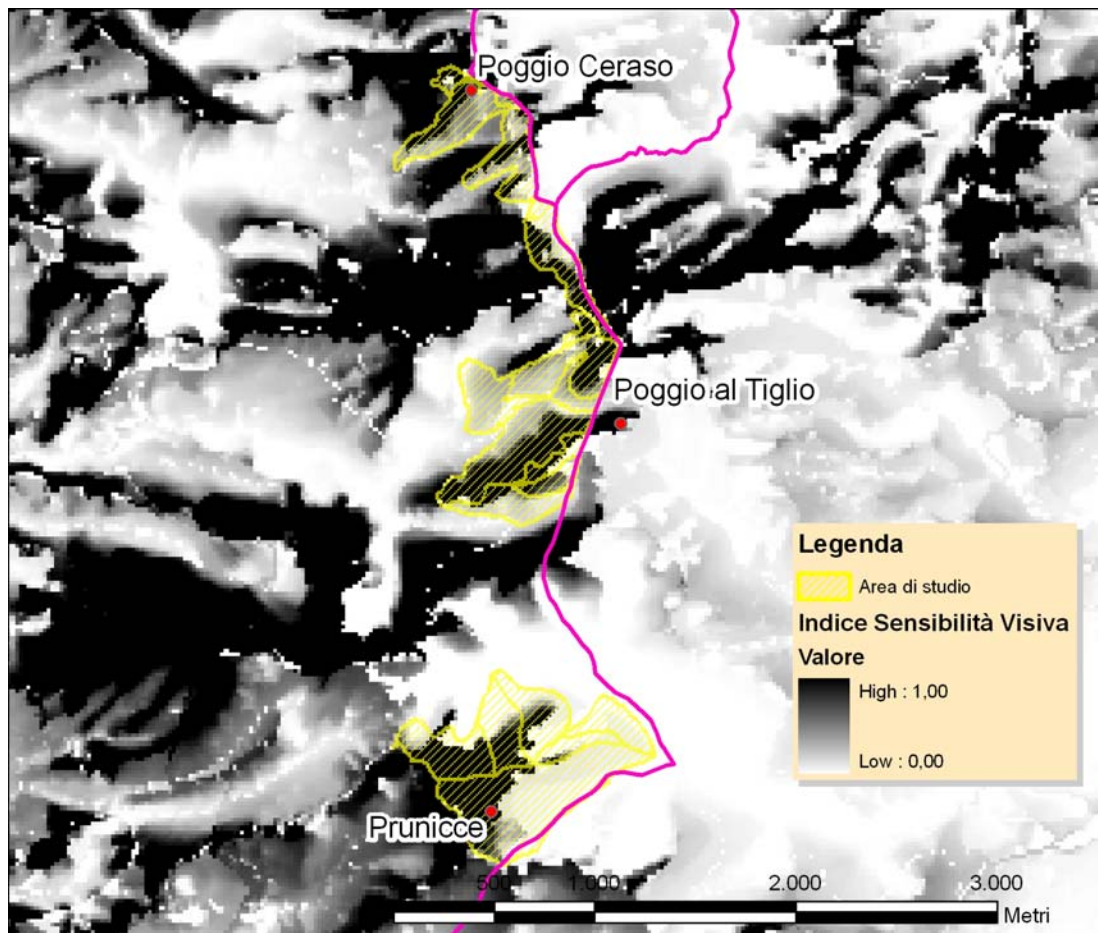


Figura 14 Calcolo dell'indice di Sensibilità Visiva

### 3.2.1.3 ANALISI PARTECIPATA

Terminate le analisi precedenti, una fase metodologica a sé stante consiste nella procedura di progettazione partecipata e interattiva delle possibili localizzazioni dell'impianto eolico. Sono state studiate attentamente le diverse tecniche di partecipazione e una di quelle più promettenti e innovative risulta la tecnica dei "Sistemi Multi Agente Partecipativi". In questi i singoli attori sono chiamati ad un incontro nel quale il "moderatore" funge da coordinatore ed è collegato con un pc, attraverso una rete interna, con i singoli computers forniti ad ogni attore. Il moderatore espone i risultati dell'analisi iniziale attraverso i pc e propone degli scenari che ciascun attore deve commentare attraverso un forum aperto in rete. Il software installato in rete registra i messaggi inviati da ogni attore in risposta a ciascuno scenario e il Sistema Multi Agente modifica gli scenari in conseguenza alle richieste o osservazioni ricevute. Il processo, che si presenta come un gioco di ruolo, continua fino ad avere la soluzione finale, che individua l'area di impianto della fattoria eolica (vedi in figura 15 un esempio di "Participatory Multi Agent Systems").



Figura 15 Esempi di Participatory Multi Agent Systems (Guyot e altri, 2007)

### 3.2.2 VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DELLE SINGOLE IPOTESI LOCALIZZATIVE

Questa seconda parte dello studio prevede un'analisi simile alla precedente relativamente al confronto dell'impatto paesaggistico-ambientale delle singole ipotesi localizzative dell'impianto eolico.

Logicamente si possono adoperare analisi più dettagliate per ricavare indici relativi all'altezza delle torri eoliche visibile da ciascuna cella dell'area di impatto, all'ampiezza del campo visivo umano occupato dall'impianto eolico, alla covisibilità dell'impianto con altri impianti già esistenti e altro.

#### A) INDICE DI VISIBILITA' IN ALTEZZA DELLE TORRI

L'importanza della visibilità di un oggetto non dipende solo dalla sua presenza/assenza nel campo visivo, ma anche da "quanta parte" dell'intero oggetto è visibile. Pertanto si è effettuata una analisi che ha consentito di misurare quantitativamente l'altezza visibile di ogni aerogeneratore localizzato nell'area. Si è perciò simulato all'interno del software GIS, al centro dell'area, un aerogeneratore di altezza totale (comprese le pale) di 100 metri e lungo di esso si sono posizionati dei punti target da osservare ogni 10 metri di altezza (come esemplificato in figura 16).

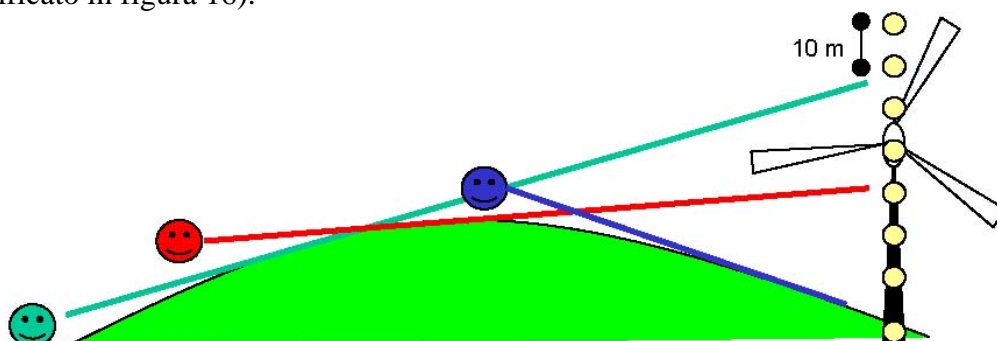


Figura 16 Diversi livelli di visibilità dell'aerogeneratore

Per ogni alternativa di posizionamento di ogni torre è stata poi ricavata la mappa di intervisibilità "pesata", ovvero una carta riportante, per ogni area quadrata di lato 20 metri



compresa nell'AIP (Area di Impatto Potenziale), il numero di punti target visibili (vedi per il monte Prunice la figura 17); quindi un valore del pixel uguale a tre significa che si vedono gli aerogeneratori dalla sommità delle pale fino a 20/30 metri mentre un valore uguale a 11 significa che si vede l'intero aerogeneratore. Gli osservatori sono ipotizzati ad una altezza di 1,6 metri dal suolo.

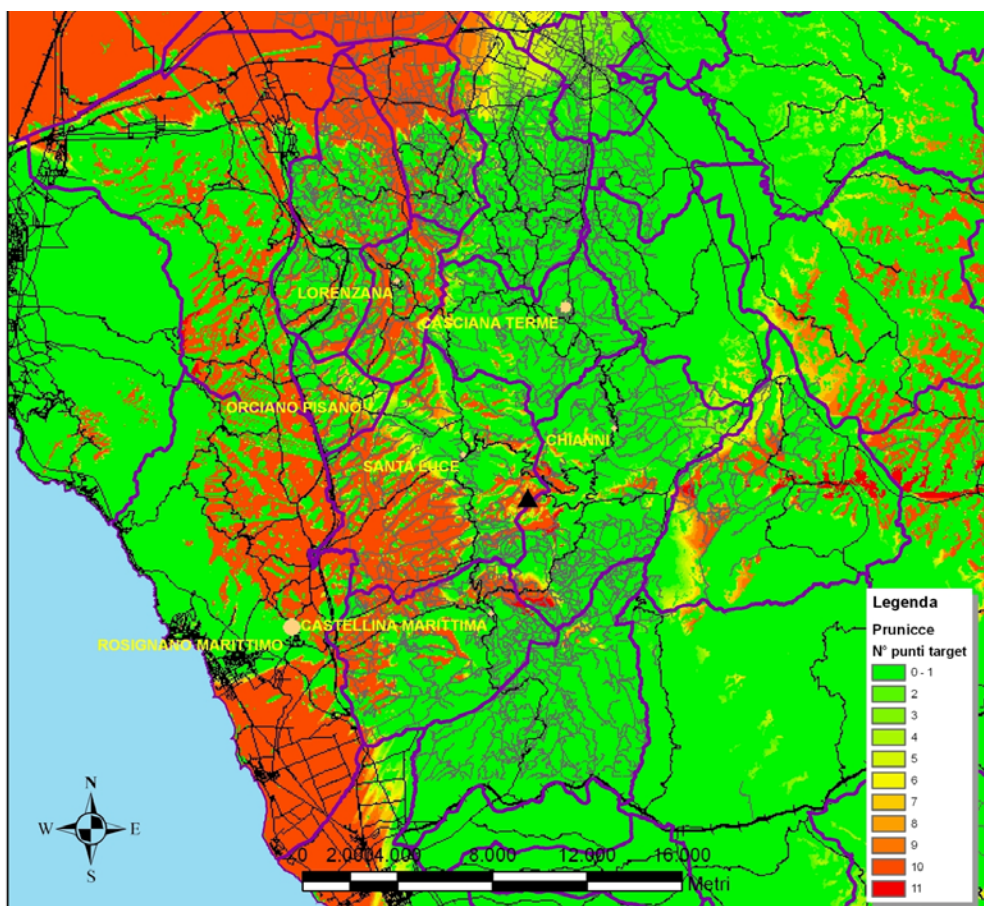


Figura 17 Mappa delle altezze di visibilità da Prunice

## B) INDICE DI COVISIBILITA'

E' stato svolto anche uno studio delle zone di sovrapposizione di visibilità con l'impianto esistente di Monte Vitalba, in cui si evidenziano le principali arterie stradali e i centri urbani presenti ed è possibile individuare le zone dalle quali si ha la visibilità di entrambi gli impianti e la presenza di eventuali osservatori.

E' stato calcolato quindi un indice di co-visibilità (vedi figura 18).

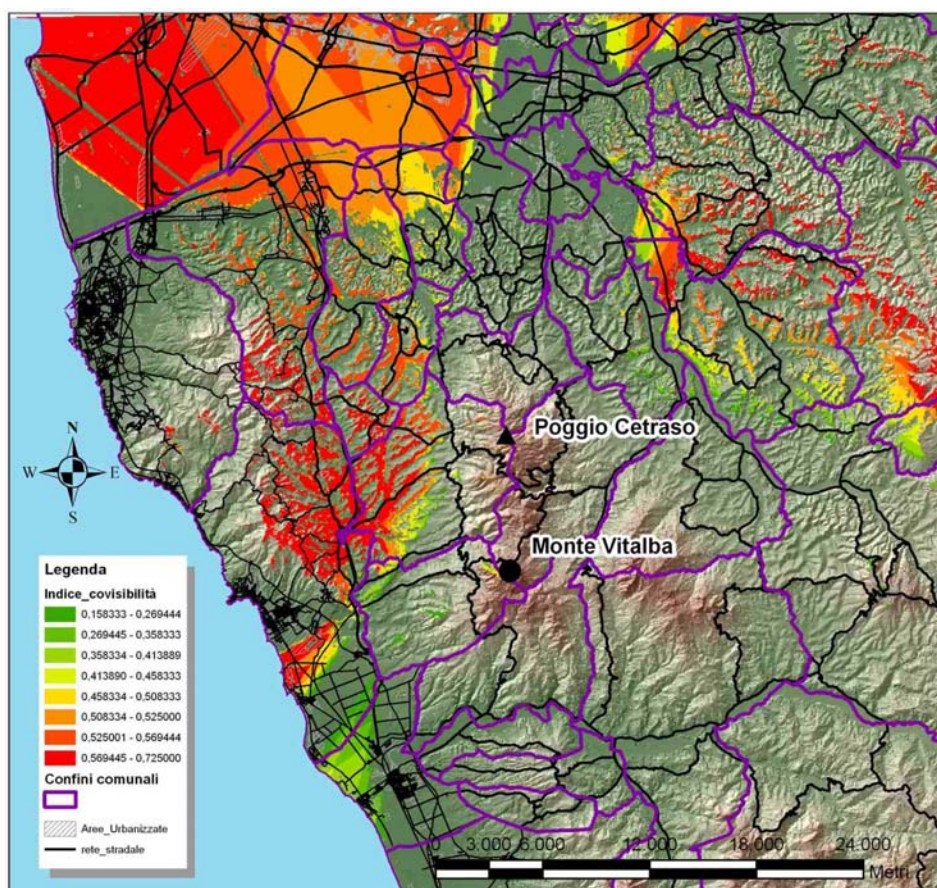


Figura 18 Indice di covisibilità fra l'ipotesi localizzativa Poggio Ceraso e Monte Vitalba

### C) INDICE DI INFLUENZA DELL'OCCHIO UMANO

Per la sua struttura e conformazione fisica l'occhio non riesce a vedere nello spazio a  $360^\circ$ , ma ha un campo di visuale più limitato. Questo campo è detto campo visivo e copre sull'orizzontale un arco di  $208^\circ$  e sulla verticale un arco di  $180^\circ$  come si vede dalla figura 19. Valutando perciò la porzione di spazio sulla verticale che un aerogeneratore può occupare all'interno del campo visivo dell'occhio umano in funzione della distanza e dell'altezza, riusciamo a trovare delle leggi di diminuzione dell'impatto che gli aerogeneratori hanno all'allontanarsi dell'osservatore dall'aerogeneratore stesso.

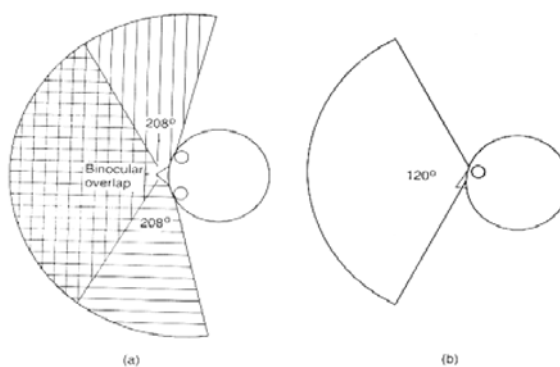


Figura 19 Il campo visivo umano

In primo luogo è stata valutata l'influenza della distanza partendo dall'ipotesi di trovare la distanza e l'altezza alla quale un osservatore posto in quel punto di massima vicinanza all'apparecchio avesse il campo visivo occupato interamente dall'aerogeneratore. Poiché il campo visivo copre un arco di  $120^\circ$ , ipotizzando che tutta l'altezza dell'aerogeneratore (torre più pale =  $h_{aerogeneratore}$ ) riempi tutto il campo visivo, l'osservatore si dovrebbe trovare all'altezza pari a:

$$h_{collina} + \frac{h_{aerogeneratore}}{2}$$

Si deduce quindi che la distanza alla quale è possibile avere una condizione di questo tipo è data da una semplice relazione trigonometrica che lega la tangente dell'angolo ai suoi due cateti:

$$d = \frac{\frac{h_{aerogeneratore}}{2}}{\tan(60^\circ)} [m]$$

Nel caso in cui un osservatore si trovasse proprio in questo punto dello spazio avrebbe tutto il campo visivo occupato dalla macchina eolica. Se cominciasse ad indietreggiare rimanendo però sempre alla stessa altezza di osservazione, l'intera macchina eolica occuperebbe una porzione di spazio sempre minore.

Si arriva quindi a determinare un coefficiente  $\gamma$  che rappresenta il rapporto tra l'altezza dell'aerogeneratore e il campo visivo dell'occhio umano. La formulazione matematica per questa relazione è la seguente:

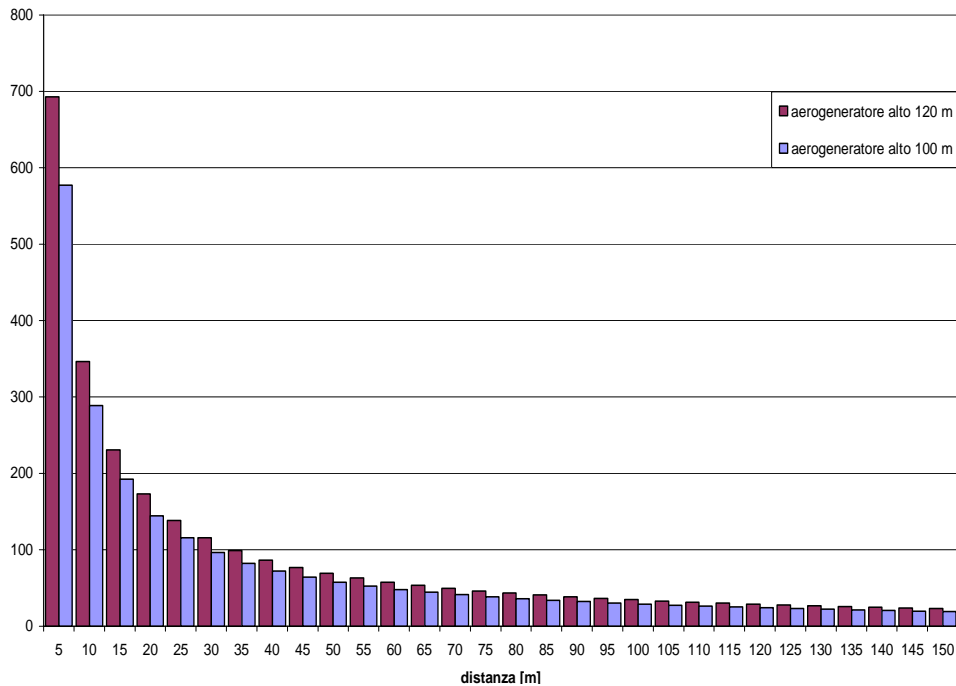
$$\gamma = \frac{h_{aerogeneratore}}{2 \cdot \tan(60^\circ) \cdot d} \cdot 100$$

Dall'analisi dimensionale si nota che il coefficiente  $\gamma$  è adimensionale:

$$\gamma = \frac{h_{aerogeneratore} [m]}{2 \cdot \tan(60^\circ) \cdot d [m]} \cdot 100$$

Se l'osservatore si trova ad avere la visuale coperta interamente dall'aerogeneratore il coefficiente assumerà valore 100 e sarà tanto maggiore quanto più l'osservatore si avvicina all'oggetto, indicando che l'osservatore non riuscirà più a vedere l'oggetto nella sua completezza, ma ne vedrà una parte in quanto è troppo vicino. Al contrario, se l'osservatore si sposta all'indietro vedrà la macchina eolica per intero che andrà ad occupare una porzione del campo visivo sempre minore rispetto a tutto quello che potrà osservare. L'andamento del coefficiente è una diminuzione quasi con andamento esponenziale all'aumentare della distanza reciproca tra osservato ed osservatore.

Si riporta adesso un grafico (figura 20) nel quale si evidenzia la diminuzione del coefficiente  $\gamma$  per i due diversi aerogeneratori con distanza crescente dal punto di osservazione. Si ipotizza che, per ciascun aerogeneratore, l'osservatore lo guardi nel suolo punto centrale.



*Figura 20* Andamento del coefficiente  $\gamma$  al crescere della distanza

La sensibilità che possiede questo coefficiente è elevata nelle vicinanze dell'aerogeneratore e diminuisce molto più lentamente successivamente. Infatti si passa dal valore di 1000 nel punto adiacente all'aerogeneratore, al valore di 100 nel punto distante 29 m nel primo caso e 35 m nel secondo. Da questo punto il valore del coefficiente diminuisce fino al valore nullo nel punto di lontananza pari alla distanza massima di visibilità.

Normalizzando  $\gamma$  si trova l'indice finale di influenza dell'occhio umano.

### 3.2.3 CORRELAZIONE DEGLI INDICI CON I PUNTI DI VISTA

Una volta ricavati gli indici per il confronto fra le ipotesi localizzative (par. 3.2.2.) questi vengono aggregati come fatto precedentemente ma inoltre essi sono utilizzati insieme ad alcuni indici ricavati nella prima fase (par. 3.2.1) per verificare l'effettivo impatto delle torri eoliche sui possibili osservatori.

Quello che si è fatto è, per ogni alternativa di localizzazione di ciascuna torre:

- Estrazione delle zone dell'AIP con visibilità almeno di metà della lunghezza delle pale del rotore (dall'indice di visibilità in altezza);
- Selezione dei possibili osservatori interni a ciascuna delle suddette zone;
- Per ogni gruppo di osservatori, ricostruzione del territorio visibile (zone anche non contigue), con individuazione delle singole viste, con il calcolo dell'indice storico e degli indici di ecologia del paesaggio già trattati (vedi figura 21);



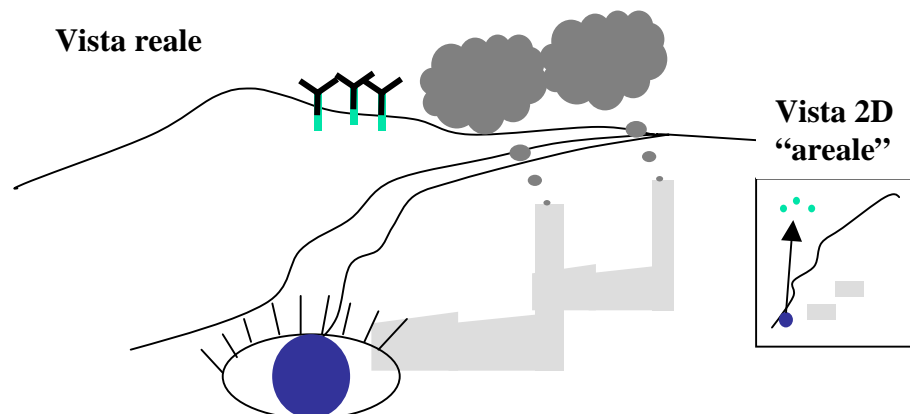


Figura 21 Ricostruzione della vista reale, con l'effetto di interazione visiva di diverse parti del territorio

- Calcolo, per ogni gruppo di osservatori, di un indice di detrazione visuale mediante aggregazione pesata (con tecniche multicriteri spaziali) degli indici suddetti con gli indici di cui ai punti A-C del precedente paragrafo.

Questo permette la ricostruzione della percezione del territorio da parte di ciascun individuo, correlando tutto quello che rientra nella parte di territorio visibile, territorio che può essere costituito da aree non adiacenti, situate a diversa distanza dall'osservatore e quindi non correlabili attraverso semplici analisi su mappe GIS; in altre parole si è seguito quanto riportato nell'articolo 1 della Convenzione Europea del Paesaggio:

*“Paesaggio designa una determinata parte del territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni”.*

## 4 CONCLUSIONI

La metodologia esposta introduce alcuni aspetti nuovi rispetto alle attuali tecniche di indagine.

Come primo elemento innovativo c'è la previsione esplicita della fase partecipativa all'interno della procedura generale in modo tale che essa sia integrata con il sistema di valutazione e non sia solamente una fase informativa.

Inoltre prevede due fasi di analisi ben distinte e logicamente correlate, ovvero l'analisi di individuazione dell'Aree di Potenziale Impianto e la valutazione delle singole ipotesi localizzative. All'interno di quest'ultima è stata inserita un'analisi dei punti di vista degli “osservatori interessati” che permette di ricostruire le visuali impattate, di valutarne la qualità e di prevedere puntualmente eventuali opere di mitigazione. Quest'ultima analisi collega tutti gli indici spaziali al paesaggio realmente percepito dai soggetti, che non coincide con la “vista



aerea” delle mappe di tutto il territorio come visualizzate dal GIS e come indicato nelle analisi delle Linee Guida Regionali toscane.

## **5 BIBLIOGRAFIA**

- Brusa A., Lanfranconi C. (2004) “Abstract: linee guida regionali per la realizzazione di impianti eolici e l’inserimento nel paesaggio” A.P.E.R. – Associazione Produttori Energia da fonti Rinnovabili.
- Cavalli S. e Drosera L. (1989) “Nuove stazioni eterotopiche di *Fagus Selvatica* L. nella Toscana centrale” in atti Società Toscana Scienze Naturali, Mem., Serie B, 96, pagg.257-264.
- Folgheraiter W. (2007) “Parco Eolico Monte Vitalba (Chianni)” su “Galileo, periodico dell’ordine degli ingegneri della Provincia di Pisa”, numero 2 annoII
- Guyot P., Murakami Y., Platon E. e Quenum J. (2007) “Participatory Design of Multi-Agent System” AAMAS 2007 Tutorial
- Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Dipartimento per i beni culturali e paesaggistici, Direzione per i beni architettonici e paesaggistici (2006) “Gli impianti eolici: suggerimenti per la progettazione e la valutazione paesaggistica”, in “Linee Guida per l’inserimento paesaggistico degli interventi di trasformazione territoriale” Di Bene A. e Scazzosi L. (a cura di), Gangemi editore, Roma.
- Pertugi A., Gabellini A. e Acciai A., (1995) “Bosco di Santa Luce “Carta naturalistica ed escursionistica”, Comune di Santa Luce.
- Petri M., Rossi M. (2007) “Landscape and wind power installations: the visibility assessment criterion”, all’interno della “European Research Group S4 Annual General Assembly & workshops” svoltosi a Pisa il 26-28 Aprile 2007
- Provincia di Rimini Servizi SITUA/Ambiente (2006) “Fonti rinnovabili e pianificazione energetica GIS based: una applicazione per la Provincia di Rimini” in Atti della 9° Conferenza Utenti ESRI, Roma
- Regione Toscana, (2004) “Linee guida per la valutazione dell’impatto ambientale degli impianti eolici” Centro Stampa Regione Toscana
- Rossi M. (2007) “Analisi della producibilità e dell’impatto visivo di un impianto di generazione eolica ubicato nel comune di Santa Luce”, tesi di laurea in Ingegneria Energetica

## *ABSTRACT*

The present work develops a methodology to identify and evaluate the location of wind farm. The research takes into account some important elements like the increasing need to use renewable energies, such as required from the European Community, but also the remarkable environmental sensitivity of the Tuscany landscape and of its inhabitants.

The main elements showed are the landscape characteristics defined both by physical, natural and historical factors and by population's aims and perceptions.

Based on this remarks we elaborated a methodology divided in two parts to evaluate landscape sensibility taking into account both the relations between physical, natural, historical factors, visibility and individual perception of landscape.

The methodology has been applied to the evaluation of possible alternative locations of a wind farm into the Santa Luce commune (province of Pisa).