

# Un modello di analisi multicriteri per la localizzazione di infrastrutture lineari in aree ad insediamento diffuso<sup>1</sup>

Paolo Rosato\*

## 1. Premessa

Negli ultimi anni, l'accresciuta sensibilità ambientale e consapevolezza della scarsità delle risorse non rinnovabili, ha radicalmente modificato il modo con cui sono assunte le decisioni sulla realizzazione di grandi infrastrutture pubbliche.

Infatti, sino a qualche decennio fa, le decisioni riguardanti tali opere erano prese in ambiti molto ristretti e, in generale, erano bene accolte dalle comunità locali che vi vedevano delle occasioni di sviluppo economico. Attualmente, invece, la localizzazione di una strada, di un elettrodotto o di uno svincolo provocano l'accendersi di conflitti e contenziosi che, spesso, porta alla paralisi del processo decisionale. Tali conflitti sono essenzialmente dovuti ad una forte asimmetria nella distribuzione dei benefici e dei costi (privati e sociali) prodotti dalle grandi opere pubbliche. Tali opere, infatti, pur recando spesso un notevole beneficio sociale a livello generale, presentano pesanti impatti a livello locale, il più delle volte non compensati.

Per affrontare questo tipo di problemi sono stati messi a punto numerosi strumenti di tipo normativo e valutativo. Al primo tipo appartiene l'ormai copiosa normativa comunitaria e nazionale in materia di valutazione di impatto ambientale<sup>2</sup> (VIA) mentre al secondo afferisce un notevole apparato metodologico che, pur sviluppatosi indipendentemente dalla normativa, ne è diventato l'espressione operativa. In sostanza *"La VIA è quindi un ambito privilegiato per lo studio e*

---

\* Università degli Studi di Padova, Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, AGRIPOLIS, 35020 Legnaro (PD) - Italy.

1) Lavoro eseguito nell'ambito del progetto di ricerca MURST 60% "L'agricoltura sostenibile nelle aree metropolitane". L'autore ringrazia Massimo Campa per la preziosa collaborazione fornita nella fase di raccolta ed elaborazione dei dati, nonché Patrizia Lombardi e gli anonimi revisori per gli utili suggerimenti.

2) L.N. 349 del 8.7.86 istitutiva del Ministero dell'Ambiente, la Direttiva Comunitaria n. 337 del 27.6.1985, il DPCM n. 377 del 10.8.88 e successivi.

*l'applicazione di metodologie di supporto alla decisione*" (Colorni et al., 1987). La metodologia che maggiormente ha contribuito a sistematizzare e ordinare i processi di scelta in ambito pubblico è sicuramente l'analisi multicriteri (AMC) che, originatasi a partire da una revisione critica dell'analisi costi benefici classica, si è sviluppata autonomamente in un complesso di procedure in grado di affrontare i problemi di scelta più vari. Tali procedure si articolano, generalmente, in due fasi:

- una fase di analisi dedicata all'identificazione delle alternative e delle componenti ambientali interessate;
- una fase di valutazione volta alla stima degli impatti ed all'ordinamento delle alternative progettuali.

Tutti gli strumenti, anche informatici, finora sviluppati si presentano molto rigorosi e articolati nell'affrontare la seconda fase ma risultano piuttosto carenti nel formalizzare la prima.

Queste carenze sono, per certi versi, inevitabili in quanto la fase di progettazione preliminare è un momento fortemente creativo difficilmente imbrigliabile in algoritmi matematici. Inoltre, vi è una notevole carenza a livello istituzionale che non fornisce a tale fase alcuna cornice procedurale volta a migliorare la partecipazione. Tuttavia, momenti della progettazione preliminare che potrebbero utilmente avvalersi dei metodi di AMC, uno di questi è l'individuazione dei tracciati di infrastrutture lineari come strade (Polelli e Sali, 1987; Rostirolla, 1997), elettrodotti (Marinelli, 1993) e metanodotti (Bernetti, 1993).

Lo scopo del presente lavoro è, appunto, quello di costruire un modello in grado di generare l'ottimo tracciato di una superstrada in presenza di un processo decisionale multicriterio. Il modello è stato costruito ricorrendo alla programmazione lineare a numeri interi e verificato risolvendo il problema del completamento dell'asse viario Trento-Venezia nel tratto fra Castelfranco Veneto, in provincia di Treviso, e Mestre in comune di Venezia.

## **2. L'analisi multicriteri**

I metodi di analisi multicriteri sono caratterizzati dal fatto di considerare contemporaneamente obiettivi e/o criteri multipli e di rappresentarli mediante le unità di misura più appropriate a rappresentarne l'utilità totale sociale. Il riconoscimento dell'esistenza di obiet-

tivi multipli nel processo decisionale comporta una riformulazione della funzione di utilità del decisore che, contrariamente a quanto avviene nell'analisi economica neoclassica, viene a strutturarsi su più argomenti (Rehman e Romero, 1989).

Ciò comporta, da un punto di vista matematico, l'ottimizzazione della seguente funzione:

$$\begin{array}{ll} \text{Ottimizza } U = g[f_i(x)] & i = 1, \dots, n \\ \text{con } x \in X & \end{array} \quad [1]$$

dove:

$U$  = utilità totale del decisore;

$f_i(x)$  = rappresenta lo stato dei criteri decisionali in funzione delle soluzioni;

$X$  = insieme delle soluzioni  $x$  che soddisfano il sistema dei vincoli e quindi sono realizzabili.

I problemi di AMC sono molto diversificati e possono essere distinti in due categorie principali (Marangon e Rosato, 1995):

- l'Analisi a Molti Obiettivi (AMO);
- l'Analisi a Molti Attributi (AMA).

Nell'AMO il processo decisionale riguarda l'individuazione della scelta migliore all'interno di un insieme infinito di alternative, implicitamente definito dai vincoli del problema. Al riguardo la [1] ben rappresenta questo tipo di problemi.

Nell'AMA, invece, il metodo permette di guidare la scelta tra un numero finito ed esplicito di alternative decisionali. Quindi:

$$\begin{array}{ll} \text{Scegli fra } A_k & k = 1, \dots, m \\ \text{in funzione di } a_i & \end{array} \quad [2]$$

dove:

$A_k$  sono le alternative identificate da stati predefiniti delle variabili decisionali ( $x_k$ ) e  $a_i = f_i(x_k)$ .

In altre parole, nei problemi di AMO l'insieme  $X$  delle soluzioni ammissibili è rappresentabile mediante uno spazio (iper) continuo, mentre nei problemi di AMA assume la connotazione di un insieme di punti finiti. La diversa forma del "feasible-set" ha profondamente condizionato lo sviluppo degli algoritmi volti alla risoluzione dei

problemi decisionali. Nell'AMO ci si è preoccupati di rappresentare adeguatamente il "feasible-set" e la funzione obiettivo (Goicoechea et al., 1982) ricorrendo a tecniche di programmazione matematica più o meno sofisticate. Nell'AMA, invece, essendo l'insieme delle soluzioni ammissibili perfettamente esplicito, gli studiosi si sono dedicati prevalentemente alla predisposizione di algoritmi in grado simulare i più disparati processi di scelta<sup>3</sup>.

Da una sommaria analisi comparativa, tuttavia, emerge che questa dicotomia è di carattere meramente operativo nel senso che l'approccio dell'AMC può considerarsi unitario e caratterizzato da una formalizzazione generale simile alla [1]. La distinzione fra i due approcci risiederebbe quindi nella "forma" del set delle soluzioni ammissibili e non nella logica di fondo. Tale assunzione è confortata dal fatto che molti problemi di AMA possono essere risolti con gli algoritmi di programmazione matematica comunemente utilizzati per la risoluzione di problemi di AMO. Ciononostante, l'evoluzione delle metodiche ha spesso seguito sentieri separati rendendone via via più difficile l'integrazione in un contesto formale unitario. Infatti, mentre nell'ambito dell'AMA lo sviluppo di procedure di ordinamento sempre più articolate e sofisticate ha avuto un notevole successo ed è in continua evoluzione con immediati ripercussioni operative, nell'ambito dell'AMO tale sforzo si è rivelato molto più gravoso in quanto il miglioramento delle funzioni multiobiettivo si è scontrato con i limiti imposti dagli algoritmi ottimizzanti necessari alla risoluzione di tali problemi.

### **3. Un modello generale di AMC per la localizzazione di infrastrutture lineari**

Un sommario esame delle principali applicazioni dell'AMA nella valutazione di impatto ambientale evidenzia che tali studi presentano un problema di partenza relativo alla individuazione delle alternative da prendere in considerazione. I progetti proposti sono, infatti, quasi sempre in numero assai limitato e, essendo stati selezionati in una fase preliminare caratterizzata da un'elevata soggettività, non vi è alcuna garanzia sulla loro efficienza e quindi non è possibile escludere a priori l'esistenza di alternative "sconosciute" dominanti. Natu-

---

3) Per una trattazione chiara ed esaustiva si veda Vincke (1992).

ralmente il problema è del tutto trascurabile quando i progetti sono di limitate dimensioni ma può diventare rilevante nel caso in cui le opere da valutare sono di grandi dimensioni e possono essere realizzate e/o localizzate con modalità diverse come, appunto, le infrastrutture lineari (strade, ferrovie, idrovie elettrodotti, metanodotti, ecc.).

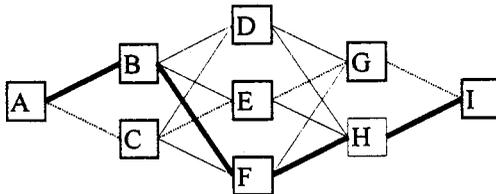
Un possibile approccio alla questione può essere quello di tentare di coniugare la logica ottimizzante dell'analisi multiobiettivo con il classico approccio multiattributo e, quindi, formalizzare operativamente il problema multicriteriale generale. Nel caso specifico della progettazione di massima d'infrastrutture lineari è possibile risolvere il problema localizzativo mediante le seguenti fasi:

- la rappresentazione del problema decisionale mediante la predisposizione di un grafo che rappresenti tutte le soluzioni al problema di collegamento, dove per grafo si intende un insieme di nodi collegati da archi.
- la predisposizione delle matrici di impatto per ciascun elemento del grafo;
- la costruzione di un algoritmo ottimizzante di risoluzione del grafo;
- la predisposizione di un'appropriata funzione obiettivo.

Tale procedura può essere formalizzata con il ricorso ad un modello (lineare e non) di programmazione matematica multiobiettivo a numeri interi in grado di risolvere problemi di ottimizzazione combinatoria (Colorni, 1988).

Per quanto riguarda la traduzione del problema decisionale della localizzazione di infrastrutture lineari in un grafo, si consideri la figura 1 che rappresenta tutti i percorsi ammissibili per raggiungere una determinata meta, ad esempio il punto I, partendo da una determinata origine (A).

Figura 1. Esempio di grafo



La risoluzione del grafo consiste nell'individuare il percorso che, collegando A con I, ottimizza un certo parametro (tempo, costo, etc.) oppure, nell'ambito di valutazioni più complesse, una data funzione multicriterio. In altre parole, il grafo rappresenta il cosiddetto "feasible-set" del problema decisionale. Dal punto di vista matematico il grafo può essere formalizzato mediante un set di equazioni a numeri interi in grado di rappresentare tutte le possibili concatenazioni di archi, cioè tutti i possibili collegamenti alternativi. Tali equazioni hanno per variabili gli archi, sono in numero pari a quello dei nodi, escludendo quelli terminali (A ed I), e stabiliscono che, se è attivato un arco entrante in un dato nodo, deve essere attivato anche un arco in uscita. A ciascuna variabile (arco) è poi possibile associare un vettore che descrive l'impatto prodotto se l'arco corrispondente viene inserito nel tracciato dell'opera. L'insieme di tali vettori vanno a formare la cosiddetta matrice di valutazione sulla quale opera la funzione obiettivo del decisore.

Ad esempio una formulazione generale del problema può essere la seguente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Ottimizza } U = g(a_i) \\
 & \text{con} \\
 & a_i = f_i(x_k) \qquad [3] \\
 & \sum_{e=1}^t x_{kez} - \sum_{u=1}^s x_{kuz} = 0 \\
 & x_k = 0/1
 \end{aligned}$$

dove:

$U$  è la funzione obiettivo;

$a_i$  sono i criteri di scelta;

$x_k$  sono le variabili decisionali e cioè gli archi che compongono il grafo;

$t$  sono gli archi che entrano nel generico nodo  $z$ ;

$u$  sono gli archi che escono dal generico nodo  $z$ .

La prima equazione è la cosiddetta funzione obiettivo e cioè la regola che guida il processo di individuazione del percorso ottimo; la ricerca può essere eseguita sia minimizzando un impatto aggregato sia massimizzando un'opportuna funzione di utilità.

La seconda espressione rappresenta le  $i$  equazioni per il calcolo dello stato dei criteri decisionali in funzione del percorso di volta in volta attivato.

La terza rappresenta tutte le  $z$  equazioni necessarie a rappresentare il grafo e l'ultima serve a dichiarare che le variabili che rappresentano gli archi sono binarie (0/1).

Se, ad esempio, si adotta una funzione di tipo lineare ed additivo che, tra l'altro, rappresenta la procedura di selezione multiattributo denominata "Somma Pesata" (Einhorn e McCoach, 1977), la [3] può essere semplificata nella seguente:

$$\begin{aligned}
 & \text{Ottimizza } U = \sum_{i=1}^n w_i a_i \\
 & \text{con} \\
 & a_i = \sum_{k=1}^m a_{ik} x_k \\
 & \sum_{e=1}^r x_{kez} - \sum_{u=1}^s x_{kuz} = 0 \\
 & x_k = 0/1
 \end{aligned} \tag{4}$$

dove:

$w_i$  sono i pesi attribuiti ai criteri di scelta  $a_i$ ;

$n$  è il numero dei criteri di scelta;

$m$  sono gli archi che formano il grafo.

Il modello proposto presenta, rispetto al classico approccio multiattributo almeno tre vantaggi: 1) riduce in modo significativo la soggettività che caratterizza la fase di selezione preliminare delle alternative di tracciato; 2) non richiede che tutte le alternative ammissibili siano preventivamente esplicitate in quanto fornisce direttamente quella ottimizzante la funzione obiettivo; 3) può essere risolto mediante un comune risolutore di matrici di programmazione lineare, se la funzione obiettivo è lineare, oppure con un risolutore di problemi non lineari, se si adottano funzioni obiettivo più complesse.

#### 4. L'applicazione del modello nell'individuazione del tracciato della "Supercastellana"

L'esempio proposto per testare il modello in precedenza illustrato riguarda la realizzazione della cosiddetta "Supercastellana", il tratto terminale di un vasto sistema viario volto a migliorare il collegamento fra Trento e Venezia. Il presente lavoro ha preso in considera-

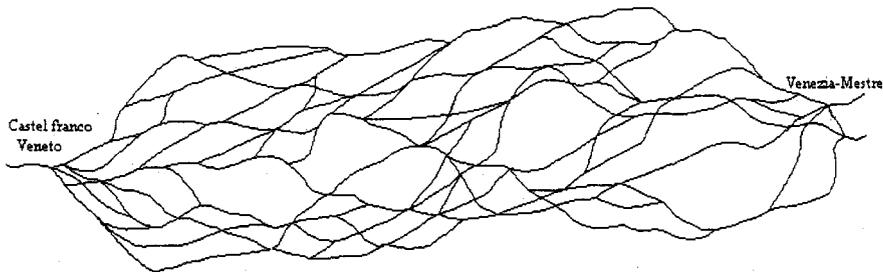
zione il problema della localizzazione della porzione terminale del tracciato e in pratica quella che collega la tangenziale di Mestre, a ridosso di Venezia, con quella di Castelfranco per una distanza in linea d'aria di circa trentadue chilometri. Nel valutare la localizzazione si è fatto riferimento ad una tipologia costruttiva predefinita costituita da una strada a raso con cavalcavia e svincoli, due corsie di 3,5 m. per senso di marcia, comprensiva di banchine e spartitraffico per una sezione complessiva di 23 metri.

#### 4.1. La costruzione del grafo

La costruzione del modello è iniziata con uno studio dell'edificato residenziale, produttivo e commerciale esistente, allo scopo di identificare le parti di territorio dove era possibile far passare la superstrada. In altre parole sono stati individuati tutti i tracciati alternativi realizzabili che, collegando le tangenziali di Castelfranco e di Mestre, si diramano nel territorio compreso, sfruttando tutti i corridoi utili.

Il risultato di tale studio è un grafo che rappresenta tutte le soluzioni ammissibili al problema di collegamento. Tale grafo si compone di 92 nodi collegati da 168 archi (vedi figura 2).

Figura 2. Grafo dei tracciati alternativi



Su tale grafo è stato costruito il modello matematico per la simulazione dell'impatto ambientale dell'opera e, quindi, per la ricerca delle soluzioni ottimali. A fini operativi, i nodi sono stati identificati da una coppia di lettere maiuscole (AA, AB, AC, etc.) mentre gli archi sono stati

definiti mediante quattro lettere maiuscole identificati, rispettivamente, il nodo iniziale e quello di terminale (AAAB, AAAC, etc.).

#### 4.2. *L'analisi dell'impatto del tracciato stradale*

La fase successiva della costruzione del modello di valutazione ha riguardato la costruzione della matrice di analisi dell'impatto del tracciato stradale. Ovviamente, data l'impostazione del modello decisionale, tale matrice contiene gli impatti distinti per ogni arco ipotizzato.

L'analisi ha attinto ad una copiosa documentazione esistente a livello regionale e, in particolare:

- Il piano per il risanamento delle acque;
- La carta delle unità geomorfologiche;
- La carta dell'uso del suolo;
- La carta geologica;
- Le planimetrie aereofotogrammetriche;
- Il piano territoriale regionale di coordinamento;
- I piani territoriali delle province di Treviso, Padova e Venezia;
- I piani regolatori generali dei comuni potenzialmente interessati al tracciato.

Tali informazioni sono state utilizzate per predisporre alcune tavole di sintesi per sistematizzare e riunire tutte le informazioni utili alla compilazione della matrice di analisi<sup>4</sup>.

Dal confronto fra le tavole di sintesi ed il grafo rappresentante tutte le alternative possibili di tracciato è stato possibile compilare una scheda (vedi appendice) per ogni arco riportante tutti i dati utili alla stima dei criteri di valutazione. In seguito è stata compilata la matrice di valutazione vera e propria. I criteri ritenuti utili e sufficientemente esaustivi di tutti gli aspetti del problema decisionale sono stati i seguenti:

- I costi di realizzazione (CR);
- L'impatto sull'agricoltura (IA);
- L'impatto sul paesaggio rurale (IPR);
- L'impatto sulle aree naturali (IRN);

---

4) Le tavole sono le seguenti: tavola degli strumenti urbanistici vigenti, tavola idrogeomorfologica, tavola dell'uso del suolo, tavola dei tipi prevalenti di paesaggio, tavola della tutela delle aree di rilevante valore naturalistico, tavola dei valori storico-ambientali.

- L'impatto sulle emergenze storiche (IES);
- L'impatto sull'edificato residenziale esistente (IER);
- La connettività con le infrastrutture viarie esistenti (CIV);
- I tempi di percorrenza (TP).

La valutazione dei criteri risulta abbastanza agevole per alcuni aspetti, per esempio i costi di realizzazione, per altri, invece si è reso necessario effettuare delle assunzioni e trasformazioni piuttosto complicate ed opinabili. In altre parole emerge il ben noto, e per lo più irrisolto, nodo della stima delle funzioni di utilità a partire da informazioni di tipo tecnico<sup>5</sup>. In tabella 1 è riportata una sintesi delle modalità di stima dei criteri dalla quale si potrà agevolmente dedurre che si è fatto largo uso dell'attribuzione diretta di punteggi che, in qualche modo, rappresentano la qualità dei fenomeni di volta in volta presi in considerazione (Alberti et al., 1988; Bruschi e Gisotti, 1992). Tale approccio implica, inevitabilmente, un forte componente soggettiva, mitigabile, tuttavia, con vari accorgimenti (interviste, confronto a coppie, approcci fuzzy)<sup>6</sup>.

**Tabella 1. Sintesi dei metodi di stima dei criteri**

Criterio	Scala	Fonte informativa	Metodo di valutazione
CR	Cardinale	Elenchi dei prezzi per opere simili	Stima parametrica
IA	Ordinale	PRG	Punteggi di merito ponderati per la superficie sottratta dalla superstrada
IPR	Ordinale	PTP, PRG	Punteggi di merito ponderati per la lunghezza della superstrada
IRN	Ordinale	PTP, PRG	Punteggi di merito ponderati per la distanza della superstrada dalle emergenze naturali
IES	Ordinale	PTRC, PTP, PRG	Punteggi di merito ponderati per la distanza della superstrada dalle emergenze storiche
IER	Cardinale	PRG	Stima della popolazione residente in prossimità della superstrada
CIV	Cardinale	PRG	Distanze degli svincoli della superstrada dalla viabilità esistente
TP	Cardinale	Tempi percorrenza di strade simili	Stima parametrica

5) A questo proposito si segnala un recente volume di Beinat (1997) dove viene presentata una interessante rassegna dei metodi più comunemente utilizzati per la stima delle funzioni di utilità.

6) Per un'illustrazione dettagliata delle modalità di stima dei criteri si rimanda a Campa (1997).

7) PTRC - Piano territoriale regionale di coordinamento della regione Veneto; PTP - Piani Territoriali Provinciali delle provincie interessate; PRG - Piani regolatori generali dei comuni attraversati.

#### 4.3. La matrice di valutazione

Le informazioni precedentemente illustrate sono state riunite in una matrice riassuntiva, che consente una agevole e completa lettura di tutti gli indicatori considerati. La matrice è formata da otto colonne (i criteri) e da 168 righe (gli archi). Ogni casella esprime la "performance" di ogni arco rispetto ad ogni indicatore. In tabella 2 è riportata una porzione esemplificativa di tale matrice.

Tabella 2. La matrice di analisi

Arco		Indicatore							
n.	Identif.	CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
1	AAAB	40,70	3,28	8,20	937,14	1,00	141	820	59,04
2	ABAC	8,66	0,92	2,30	460,00	0,00	22	1510	16,56
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
167	EHEL	11,77	2,76	3,20	8,00	1,00	66	690	49,68
168	EIEM	7,85	1,62	1,91	13,90	0,03	92	405	29,16

La matrice di analisi è stata successivamente normalizzata e trasformata in modo tale ottenere la cosiddetta matrice di valutazione (tab. 3) dove, per ciascun arco e per ciascun parametro decisionale viene riportata la stima della variazione di utilità connessa con la realizzazione del tracciato stradale. Tale operazione è stata eseguita dividendo i valori di ciascuna colonna per il valore massimo presente ed assumendo una relazione lineare tra la stima dell'indicatore ed il conseguente livello di utilità. Tale assunzione è sicuramente opinabile, se non altro perché è assodato che la relazione fra parametri tecnici e utilità è tipicamente non lineare. Tuttavia, poiché gran parte dei parametri inseriti nella matrice di analisi, sono stati stimati mediante attribuzioni di punteggi e, quindi, già incorporano una stima diretta delle variazioni di utilità, le trasformazioni adottate sembrano ragionevoli e sufficienti a rappresentare il reale andamento dell'utilità nelle situazioni prese in considerazione.

Tabella 3. La matrice di valutazione normalizzata

Arco		Criterio							
n.	Ident.	CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
1	AAAB	0,541	0,223	0,223	0,067	1,000	0,551	0,183	0,223
2	ABAC	0,115	0,063	0,063	0,033	0,000	0,086	0,336	0,063
..	..	..	..	..	..	..	..	..	..
167	EHEL	0,157	0,188	0,087	0,001	1,000	0,258	0,154	0,188
168	EIEM	0,104	0,110	0,052	0,001	0,025	0,359	0,090	0,110

La tabella 4 riporta le medie, il coefficiente di variazione ed un indicatore di asimmetria della distribuzione rispetto a quella normale<sup>8</sup>.

**Tabella 4. Alcune statistiche sui criteri di valutazione**

	Criterio							
	CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
Media	20,714	3,874	6,005	1719,855	,069	56,065	1566,667	71,713
Dev. Std.	14,186	2,310	5,126	2326,217	,189	42,816	1023,746	41,995
Coeff. Variaz.	0,685	0,596	0,853	<u>1,353</u>	<u>2,739</u>	0,764	0,653	0,586
Asimmetria	1,467	1,926	2,121	2,699	<u>4,404</u>	1,807	,541	1,820
Min	2,43	,92	,62	2,10	,00	,00	,00	16,56
Max	75,19	14,68	36,70	14000,00	1,00	256,00	4490,00	264,24

Dall'esame della tabella emerge che gli archi presentano una elevata variabilità rispetto a tutti i parametri considerati e, quindi, che il tracciato stradale può assumere impatti molto diversi. Questo giustifica il supporto di uno strumento di valutazione come quello proposto. Particolarmente variabile si presenta l'impatto sulle risorse puntuali, come le risorse storiche e quelle naturali. Più omogenei, invece, risultano sugli indicatori relativi a risorse presenti in modo diffuso, come quelle produttive agricole e quelle residenziali. Da notare, infine, che gli impatti sulle risorse puntuali presentano una spiccata asimmetria positiva. Ciò significa che pesano molto per quei tracciati che lambiscono le risorse in questione mentre sono del tutto ininfluenti per gli altri.

La tabella 5 presenta un'analisi di correlazione fra gli indicatori dalla quale è possibile evincere alcune tendenze di carattere generale sui trade-off esistenti fra i diversi parametri decisionali.

**Tabella 5. Le correlazioni esistenti fra criteri di valutazione**

Criterio	Criterio						
	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
CR	<u>.814</u>	,544	,489	<u>.646</u>	,358	-,186	<u>.836</u>
P	<u>.000</u>	,000	,000	<u>.000</u>	,000	,016	<u>.000</u>
IA		<u>.637</u>	,596	<u>.616</u>	,245	,064	<u>.987</u>
P		<u>.000</u>	,000	<u>.000</u>	,001	,408	<u>.000</u>
IPR			,403	,379	,132	-,036	<u>.651</u>
P			,000	,000	,088	,641	<u>.000</u>
IRN				,183	,220	,177	<u>.586</u>
P				,018	,004	,022	<u>.000</u>
IES					,339	-,000	<u>.653</u>
P					,000	,999	<u>.000</u>
IER						-,0677	<u>.273</u>
P						,383	<u>.000</u>
CIV							<u>.059</u>
P							<u>.450</u>

P = 2-tailed Significance

8) L'indicatore è positivo, se i valori estremi sono superiori alla media, negativo in caso contrario.

Le relazioni più evidenti riguardano i tempi di percorrenza e l'impatto sull'agricoltura, cioè i percorsi più lunghi consumano più suolo e sono localizzati in aree più importati dal punto di vista agricolo. Tali archi, ovviamente, risultano anche più costosi. In sostanza viene ribadito il fatto che, in prima approssimazione, l'impatto è direttamente proporzionale alle dimensioni dell'opera. Calcolando, infatti, la matrice di correlazione sugli impatti ponderati per i tempi di percorrenza (proxy della lunghezza), le correlazioni cambiano e si riducono sensibilmente, pur mantenendo, in alcuni casi, una certa significatività (vedi tabella 6).

Da questo punto di vista le correlazioni positive accertate riguardano l'impatto sull'edificato esistente e quello sulle emergenze storiche e la connettività con la viabilità preesistente. In sostanza, i tracciati più prossimi alle abitazioni sono anche più vicini alle ville e parchi storici ed alla viabilità locale. Le relazioni negative riguardano, invece, l'impatto sull'edificato esistente con quello sulle risorse naturali in quanto esse, mediamente, sono ubicate nelle aree più periferiche. Infine, una reazione negativa significativa sussiste fra il corso di realizzazione e la connettività con le strade preesistenti causata dai costi di costruzione delle opere di collegamento. Comunque, l'analisi descrittiva evidenzia che, a parte le dimensioni dell'opera, esiste una certa indipendenza dello stato dei criteri decisionali negli archi presi in considerazione. Ciò avvalorava la scelta dei criteri e indica una certa flessibilità del sistema territoriale esaminato per l'individuazione di soluzioni di compromesso.

Tabella 6. Le correlazioni esistenti fra criteri di valutazione normalizzati per i tempi di percorrenza

Criterio	Criterio					
	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV
CR	-,169	,067	-,016	,195	,121	-,279
P	,029	,387	,832	,011	,119	<u>,000</u>
IA		-,114	,144	-,023	-,106	,094
P		,140	,062	,770	,170	,227
IPR			,012	-,036	-,042	-,085
P			,882	,645	,588	,273
IRN				,014	-,206	,107
P				,856	<u>,007</u>	,166
IES					<u>,229</u>	-,041
P					<u>,003</u>	,600
IER						<u>,271</u>
P						<u>,000</u>

P = 2-tailed Significance

#### 4.4. Il modello di programmazione

Sulla base di quanto illustrato precedentemente, la matrice di valutazione normalizzata e la relativa procedura multicriterio per l'individuazione dell'ottima alternativa, è stata formalizzata nel seguente modello di programmazione lineare dinamica a numeri interi<sup>9</sup>.

```

FO) MIN  $P_{CR} \cdot CR + P_{IA} \cdot IA + P_{IPR} \cdot IPR + P_{IRN} \cdot IRN + P_{IES} \cdot IES + P_{IER} \cdot IER + P_{CIV} \cdot CIV + P_{TP} \cdot TP$ 
Con
CR)  $0.5415AAAB + 0.115ABAC + .. + 0.157EHHEL + 0.104EIEEM - CR = 0$ 
IA)  $0.223AAAB + 0.063ABAC + .. + 0.188EHHEL + 0.110EIEEM - IA = 0$ 
IPR)  $0.223AAAB + 0.063ABAC + .. + 0.087EHHEL + 0.052EIEEM - IPR = 0$ 
IRN)  $0.067AAAB + 0.033ABAC + .. + 0.001EHHEL + 0.001EIEEM - IRN = 0$ 
IES)  $1.000AAAB + 0.000ABAC + .. + 1.000EHHEL + 0.025EIEEM - IES = 0$ 
IER)  $0.551AAAB + 0.086ABAC + .. + 0.258EHHEL + 0.359EIEEM - IER = 0$ 
CIV)  $0.183AAAB + 0.336ABAC + .. + 0.154EHHEL + 0.090EIEEM - CIV = 0$ 
TP)  $0.223AAAB + 0.063ABAC + .. + 0.188EHHEL + 0.110EIEEM - TP = 0$ 
1)  $AAAB - (ABAC + ABAE + ABAD) = 0$ 
2)  $ABAC - (ACAN + ACAH + ACAG) = 0$ 
..) .....
90)  $(ECEG + EDEG) - (EGEH + EG EI) = 0$ 
91)  $(EFEH + EGEH + EEEH) - (EHHEL + EH EI) = 0$ 
92)  $(ECEI + EH EI + EG EI) - (EIEL + EIEEM) = 0$ 
INTEGER AAAB
INTEGER ABAC
.....
INTEGER EHHEL
INTEGER EIEEM
END

```

La funzione multicriterio FO) incorpora una procedura di selezione basata sulla somma pesata degli impatti da minimizzare, dove:

$P_{CR}$  = Peso attribuito al costo totale di realizzazione dell'opera;

CR = Indicatore del costo totale;

$P_{IA}$  = Peso attribuito all'impatto sul comparto agricolo;

IA = Impatto aggregato sull'agricoltura;

$P_{IPR}$  = Peso attribuito all'impatto sul paesaggio rurale;

9) Il modello è stato risolto con il software LINDO (Schrage, 1987).

IPR = Impatto aggregato sul paesaggio rurale;  
 $P_{IRN}$  = Peso attribuito all'impatto sulle risorse naturali;  
 IRN = Impatto aggregato sulle risorse naturali;  
 $P_{IES}$  = Peso attribuito all'impatto sulle emergenze storiche;  
 IES = Impatto aggregato sulle emergenze storiche;  
 $P_{IER}$  = Peso attribuito all'impatto sui residenti;  
 IER = Impatto aggregato sull'edificato residenziale;  
 $P_{CIV}$  = Peso attribuito alla connettività con la viabilità esistente;  
 CIV = Indicatore di connettività complessiva;  
 $P_{TP}$  = Peso attribuito ai tempi di percorrenza;  
 TP = Indicatore del tempo di percorrenza totale del tracciato

Le equazioni da CR) a TP) incorporano la matrice di valutazione mentre quelle da 1) a 92) formalizzano il grafo. Infine, è stato imposto, con l'istruzione INTEGER che le variabili che rappresentano gli archi possano assumere, esclusivamente, il valore 1, se l'arco è interessato dal tracciato, o il valore 0 in caso contrario. Le soluzioni vengono, quindi, individuate minimizzando la funzione obiettivo, incorporando un opportuno set di pesi, e sono costituite da una serie di archi concatenati che congiungono il punto di origine del grafo con quello terminale, cioè la tangenziale di Castelfranco Veneto con quella di Mestre-Venezia.

## 5. Alcune simulazioni

Sul modello precedentemente illustrato sono state eseguite alcune simulazioni volte, da un lato a verificarne il funzionamento, dall'altro ad individuare alcune soluzioni di compromesso. Le simulazioni effettuate sono state di tipo monocriterio e multicriterio. Le prime sono state effettuate per testare la sensibilità del modello e per individuare i principali conflitti esistenti fra la minimizzazione dei diversi impatti. Le seconde, invece, sono state eseguite per individuare, nell'ipotesi che la strada debba comunque essere costruita, la soluzione ottima in funzione del tipo di decisore partendo, ovviamente, da quelli che abitualmente scendono in campo in queste occasioni.

### 5.1. Le simulazioni monocriterio

La tavola 1 illustra le soluzioni ottenute ottimizzando, di volta in volta, un solo criterio. Essa riporta i nodi che vengono attivati almeno un volta e l'attivazione è rappresentata dal punto nero.

Tavola 1. I tracciati individuati nelle simulazioni monocriterio

Nodo	Totale attivaz.	Ottimizza							
		CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
AA	8	.	.	.	.	.	.	.	.
AB	8	.	.	.	.	.	.	.	.
AC	5	.	.	.	.	.	.	.	.
AE	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AG	5	.	.	.	.	.	.	.	.
AH	1	.	.	.	.	.	.	.	.
AL	1	.	.	.	.	.	.	.	.
AM	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AN	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AO	1	.	.	.	.	.	.	.	.
AP	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AQ	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AS	2	.	.	.	.	.	.	.	.
AU	3	.	.	.	.	.	.	.	.
AV	1	.	.	.	.	.	.	.	.
AZ	3	.	.	.	.	.	.	.	.
BA	1	.	.	.	.	.	.	.	.
BB	3	.	.	.	.	.	.	.	.
BD	1	.	.	.	.	.	.	.	.
BE	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BG	4	.	.	.	.	.	.	.	.
BI	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BL	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BM	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BP	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BQ	1	.	.	.	.	.	.	.	.
BS	2	.	.	.	.	.	.	.	.
BT	1	.	.	.	.	.	.	.	.
BZ	4	.	.	.	.	.	.	.	.
CA	2	.	.	.	.	.	.	.	.
CB	2	.	.	.	.	.	.	.	.
CD	2	.	.	.	.	.	.	.	.
CE	3	.	.	.	.	.	.	.	.
CF	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CG	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CH	2	.	.	.	.	.	.	.	.
CI	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CL	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CM	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CP	3	.	.	.	.	.	.	.	.
CQ	3	.	.	.	.	.	.	.	.
CS	1	.	.	.	.	.	.	.	.
CT	3	.	.	.	.	.	.	.	.
CZ	4	.	.	.	.	.	.	.	.
DC	1	.	.	.	.	.	.	.	.
DD	4	.	.	.	.	.	.	.	.
DF	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DG	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DH	1	.	.	.	.	.	.	.	.
DL	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DN	1	.	.	.	.	.	.	.	.
DO	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DP	4	.	.	.	.	.	.	.	.
DQ	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DR	1	.	.	.	.	.	.	.	.
DT	5	.	.	.	.	.	.	.	.
DU	2	.	.	.	.	.	.	.	.
DZ	5	.	.	.	.	.	.	.	.
EA	4	.	.	.	.	.	.	.	.
EB	3	.	.	.	.	.	.	.	.
EE	7	.	.	.	.	.	.	.	.
EG	1	.	.	.	.	.	.	.	.
EH	7	.	.	.	.	.	.	.	.
EI	2	.	.	.	.	.	.	.	.
EL	6	.	.	.	.	.	.	.	.
EM	2	.	.	.	.	.	.	.	.
Totale		21	25	20	24	25	23	16	22

Innanzitutto, le soluzioni si presentano piuttosto diversificate in quanto il numero dei nodi attivati almeno una volta è pari a 66 su un totale di 92 e ciascun percorso interessa, mediamente, 22 nodi. Ovviamente, i nodi prossimi all'origine del grafo ed alla fine sono attivati in quasi tutte le simulazioni mentre quelli intermedi vengono interessati solo episodicamente. Vi sono, tuttavia, dei nodi intermedi, che compaiono più frequentemente di altri (BG, BZ, CZ, DD), che rappresentano delle vere e proprie "strozzature" del territorio dove è conveniente passare rispetto ad un buon numero di criteri decisionali. Da questo punto di vista le simulazioni monocriterio possono essere utili anche come procedura di screening delle aree più vocate ad ospitare l'infrastruttura oggetto di valutazione.

La tabella 7, inoltre, fornisce una quantificazione della similitudine fra i tracciati individuati dalle simulazioni monocriterio. Tale somiglianza è stata stimata mediante il calcolo della percentuale dei nodi interessati da una certa soluzione che sono condivisi da altre soluzioni. Ad esempio, il 24% dei nodi individuati ottimizzando l'impatto sull'agricoltura sono interessati anche dalla soluzione minimizzante il costo (CR).

**Tabella 7. Matrice di somiglianza fra simulazioni monocriterio (%)**

Soluzione	Soluzione ottima							
	CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
CR	100,0	24,0	35,0	16,7	28,0	<u>69,6</u>	18,8	40,9
IA		100,0	30,0	29,2	28,0	39,1	<u>62,5</u>	59,1
IPR			100,0	33,3	24,0	56,5	75,0	45,5
IRN				100,0	52,0	30,4	50,0	36,4
IES					100,0	39,1	31,3	45,5
IER						100,0	37,5	<u>68,2</u>
CIV							100,0	27,3
TP								100,0

L'analisi ha evidenziato che l'indice di somiglianza non supera mai il 70% e che le soluzioni più vicine sono quelle ottenute minimizzando il costo (CR) e l'impatto sull'edificato residenziale (IER). Altre evidenti somiglianze si hanno fra le soluzioni CIV vs IA e TP vs IER.

La tabella 8 riporta, invece, i trade-off fra i diversi criteri di valutazione emersi durante le simulazioni monocriterio. I valori ottenuti rappresentano la stima dell'impatto aggregato rispetto a ciascun criterio e, stante la funzione obiettivo del modello di ottimizzazione, una situazione è tanto più preferibile quanto lo stato dei criteri più si avvicina allo zero.

In linea generale dai risultati emerge una evidente conflittualità fra la minimizzazione dell'impatto sulle aree più densamente urbanizzate e quelle rurali. Infatti, la minimizzazione dell'impatto sull'edificato residenziale esistente implica elevati impatti sulle risorse localizzate prevalentemente in aree periferiche come quelle agricole, naturali e paesaggistiche.

Scendendo nel dettaglio si ha che:

- La minimizzazione dei costi di realizzazione individua non tanto il percorso più breve ma quello che, interferendo meno con le infrastrutture viarie esistenti e fiumi necessita di minori opere (cavalcavia, sottopassi, svincoli, etc.). Questi risparmi vengono pagati, anche se in misura modesta, in termini di connettività viaria.
- La minimizzazione dell'impatto agricoltura privilegia un tracciato lontano dalle aree agricole di pregio e quindi prossimo ai centri abitati. La minimizzazione dell'impatto sull'agricoltura peggiora la connettività viaria (in zone densamente abitate è più difficile costruire svincoli) ed aumenta la pressione sui residenti.
- La minimizzazione dell'impatto sul paesaggio individua una soluzione intermedia che non sembra evidenziare particolari conflitti. Infatti, il tracciato interessa zone periferiche di bonifica relativamente recente e di valenza agricola intermedia.

**Tabella 8. I risultati delle simulazioni monocriterio**

Criterio Ottimizzato	Stato del criterio							
	CR	IA	IPR	IRN	IES	IER	CIV	TP
CR	4,2	4,7	2,7	2,3	2,4	4,2	7,0	4,6
IA	5,2	4,3	2,6	2,0	2,7	4,6	8,3	4,6
IPR	4,5	4,7	2,2	2,1	3,5	4,2	6,3	4,7
IRN	5,6	4,8	3,1	0,7	3,5	5,2	8,3	5,0
IES	5,9	5,1	3,3	1,8	1,2	5,0	8,1	5,2
IER	4,6	14,8	11,4	20,2	8,4	3,3	7,7	4,7
CIV	4,8	4,7	2,8	2,0	3,3	4,7	4,3	4,8
TP	4,8	14,1	10,7	19,2	7,4	3,9	8,0	4,5

- La minimizzazione dell'impatto sulle risorse naturali individua un percorso piuttosto articolato (24 nodi) che si tiene alla larga dagli ecosistemi delle acque dolci e dai biotopi presenti. Tale esigenza implica costi di realizzazione mediamente più elevati, un sensibile peggioramento dei tempi di percorrenza e dell'impatto sull'edificato esistente. La tortuosità del tracciato peggiora anche la connettività con le infrastrutture viarie esistenti.

- La minimizzazione dell'impatto sui beni storico architettonici produce una situazione analoga a quella precedente ma con effetti sui costi e sui tempi di percorrenza leggermente peggiori.
- La minimizzazione dell'impatto sull'edificato esistente evidenzia i maggiori conflitti con il perseguimento degli altri criteri di valutazione. Infatti, l'ottimizzazione di tale criterio produce le peggiori performance rispetto agli impatti su agricoltura, paesaggio rurale, risorse naturali ed emergenze storiche.
- L'ottimizzazione della connessione con le infrastrutture viarie esistenti fa emergere una soluzione piuttosto interessante in quanto pur realizzando notevoli miglioramenti nella connettività non implica particolari peggioramenti negli impatti sugli altri criteri decisionali.
- La minimizzazione dei tempi di percorrenza, infine, individua il percorso più breve e che più si avvicina alla retta congiungente le tangenziali di Castelfranco Veneto e Mestre. Tale soluzione implica però, al pari della soluzione minimizzante l'impatto sulle residenze, elevati impatti sulle risorse naturali, storico-paesaggistiche e produttive agricole.

## 5.2. *Le simulazioni multicriterio*

In questa parte conclusiva del lavoro vengono presentate, a scopo esemplificativo, alcune simulazioni multicriterio. Tali simulazioni non hanno l'ambizione di rappresentare i reali decisori ipotizzati ma di evidenziare gli orientamenti di massima. Simulazioni con decisori reali possono essere condotte adottando un approccio iterativo e approfondendo l'elicitazione delle preferenze mediante opportune tecniche (AHP, Delphi, etc..). In questo caso, invece, si è proceduto in modo più semplice. In primo luogo si è costruito uno scenario di riferimento e, successivamente, si è aumentato progressivamente il peso degli attributi ritenuti prioritari per il decisore simulato. I tracciati delle diverse simulazioni sono riportati nella tavola 2, mentre la tabella 9 evidenzia le somiglianze.

Tavola 2. I tracciati individuati nelle simulazioni multicriterio

Nodo	Totale attivaz.	Tipo di decisore								
		Base	A		B		C			
			$p \leq 3$	$p \geq 4$	$p \leq 3$	$p \geq 4$	$p = 2$	$p = 3-4$	$p = 5$	$p \geq 6$
AA	9	•	•	•	•	•	•	•	•	•
AB	9	•	•	•	•	•	•	•	•	•
AC	1		•			•				
AD	5	•	•	•	•		•			
AE	3							•	•	•
AF	5	•	•	•	•		•			
AG	3							•	•	•
AN	1					•				
AP	1					•				
AS	3							•	•	•
AZ	1					•				
BA	5	•					•	•	•	•
BB	1					•				
BE	5	•					•	•	•	•
BF	3		•	•	•					
BI	5	•					•	•	•	•
BL	1					•				
BN	3		•	•	•					
BT	5	•					•	•	•	•
BV	1					•				
CB	1									•
CC	7	•	•	•	•		•	•	•	
CD	1									•
CG	1									•
CL	1					•				
CM	1	•								
CN	7		•	•	•		•	•	•	•
CR	8	•	•	•	•		•	•	•	•
DB	8	•	•	•	•		•	•	•	•
DC	1					•				
DE	2							•	•	•
DM	6	•	•	•	•		•	•	•	•
DQ	2							•	•	•
DU	1					•				
DZ	2							•	•	•
EB	1					•				
ED	8	•	•	•	•		•	•	•	•
EE	1					•				
EG	8	•	•	•	•		•	•	•	•
EH	2		•	•	•	•				
EI	7	•	•	•	•		•	•	•	•
EL	2		•	•	•	•				
EM	7	•	•	•	•		•	•	•	•
Totale		17	15	15	15	16	17	18	20	22

**Tabella 9. Matrice di somiglianza fra simulazioni multicriterio (%)**

Tipo di decisore	Tipo di decisore								
	Base	A		B		C			
		$p \leq 3$	$p \geq 4$	$p \leq 3$	$p \geq 4$	$p = 2$	$p = 3-4$	$p = 5$	$p \geq 6$
Base	100,0	<u>80,0</u>	66,7	<u>80,0</u>	12,5	<u>94,1</u>	<u>77,8</u>	65,0	54,5
A	$p \leq 3$	100,0	86,7	<u>100,0</u>	12,5	<u>76,5</u>	61,1	50,0	40,9
	$p \geq 4$		100,0	<u>86,7</u>	<u>87,5</u>	<u>64,7</u>	50,0	40,0	31,8
B	$p \leq 3$			100,0	12,5	<u>76,5</u>	61,1	50,0	40,9
	$p \geq 4$				100,0	<u>11,8</u>	11,1	10,0	9,1
C	$p = 2$					100,0			
	$p = 3-4$						83,3	70,0	59,1
	$p = 5$						100,0	85,0	72,7
	$p \geq 6$							100,0	86,4
									100,0

### 5.2.1. Scenario con decisore "Base"

Lo scenario di base per le simulazioni multicriterio è stato costruito attorno ad un ipotetico decisore che mira ad esaltare nel processo di scelta l'effetto delle caratteristiche del territorio che dovrà ospitare l'opera. A tale proposito è facilmente rilevabile che il peso di un criterio è direttamente commisurata alla sua variabilità nel territorio. In altre parole, se la distribuzione di un certo parametro è uniforme non avrà capacità discriminante i tracciati e quindi sarà poco importante nelle scelte. Se, invece, un certo aspetto si presenta molto variabile assumerà un ruolo determinante. Quindi, un primo approccio alla decisione multicriteri può essere effettuato ricorrendo ad un vettore dei pesi ricavato da una misura di variabilità relativa<sup>10</sup>. Tale misura può essere rappresentata dal coefficiente di variazione riportato in tabella 4.

In questo caso la funzione obiettivo diventa la seguente:

$$\text{MIN } Z = +0,7\text{CR} + 0,6\text{IA} + 0,9\text{IPR} + 1,4\text{IRN} + 2,7\text{IES} + 0,8\text{IER} + 0,7\text{CIV} + 0,6\text{TP}$$

La simulazione individua (vedi fig. 3) una soluzione che fornisce ottime performance per i criteri più variabili, come l'impatto sulle emergenze puntuali (storiche e naturali) mentre trascura i parametri più uniformemente distribuiti. Ne consegue che la soluzione risulta intermedia fra quelle ottimizzanti gli impatti sulle risorse naturali e quelle stori-

10) Tale assunzione è giustificata anche dal fatto che, solitamente, i conflitti si accendono quando le asimmetrie distributive nei costi e nei benefici superano una certa soglia e quindi rivalutare l'importanza di criteri maldistribuiti nel territorio permette, per certi versi, di incorporare il rischio di superamento di dette soglie.

che. Tuttavia, la necessità di tener conto anche di altri parametri ha forzato la soluzione verso un limitato numero di nodi, tant'è che costi di realizzazione e tempi di percorrenza risultano piuttosto contenuti.

### 5.2.2. Scenario con decisore "A"

Lo scenario "A" prevede l'aumento del peso dei criteri che rappresentano gli interessi dei residenti nelle aree interessate al passaggio dell'infrastruttura. La difesa di questi interessi è stata simulata moltiplicando per un fattore  $p$  il peso dei criteri che misurano gli impatti patiti dalle comunità locali e cioè l'impatto sull'edificato esistente, l'impatto sull'agricoltura (sottrazione di suolo) e la connessione con le infrastrutture esistenti.

La funzione obiettivo diventa la seguente:

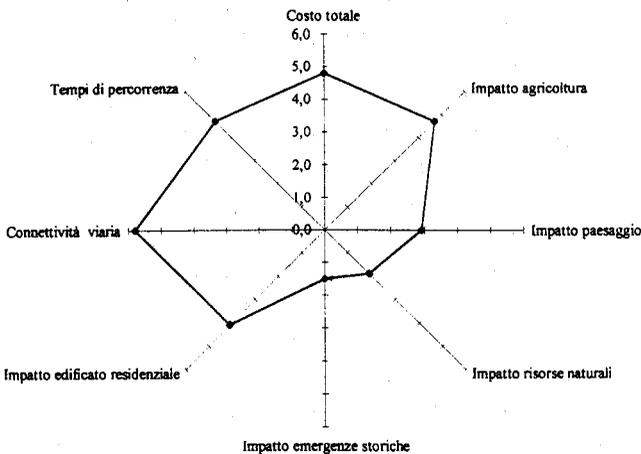


Figura 3. I risultati della simulazione "Base"

$$\text{MIN } Z = +0,7\text{CR} + p \ 0,6\text{IA} + 0,9\text{IPR} + 1,4\text{IRN} + 2,7\text{IES} + p \ 0,8\text{IER} + p \ 0,7\text{CIV} + 0,6\text{TP}$$

Adottando un fattore di rivalutazione fino a 3 la soluzione è abbastanza simile a quella "Base" (80%) e quindi non presenta particolari incrementi nello stato dei criteri interessati dalla rivalutazione (vedi fig. 4). Aumentando  $p$  la soluzione cambia realizzando, nello stesso tempo, un certo miglioramento nell'indice di impatto sulle residenze. Tale miglioramento non coinvolge l'agricoltura e la

connettività viaria che, anzi, peggiora leggermente. L'aspetto che viene maggiormente compromesso in questa simulazione è, comunque l'indice di impatto sulle emergenze storiche. Tale simulazione, per certi versi esemplificativa di tante situazioni verificatesi in passato, sembra confermare che la strenua difesa degli interessi locali, da un lato pone l'agricoltura in posizione marginale e, dall'altro, vede soccombere quei valori di civiltà e cultura che, come numerose vicende hanno dimostrato, abbisognano di azioni di tutela a livello centrale.

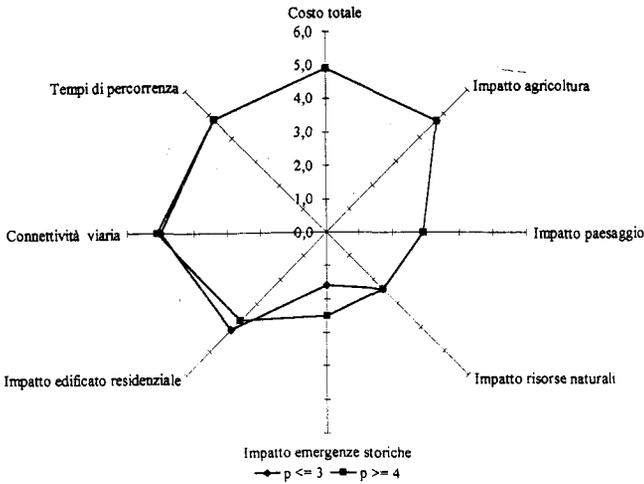


Figura 4. I risultati della simulazione "A"

### 5.2.3. Scenario con decisore "B"

In questa simulazione si è ipotizzato un decisore che pone al centro gli interessi dell'ente preposto alla realizzazione dell'opera. Tale scenario è, quindi, caratterizzato dalla rivalutazione degli indicatori più importanti per tale decisore e cioè i costi di realizzazione, i tempi di percorrenza e la connettività con le strade preesistenti.

La funzione obiettivo diventa, quindi, la seguente:

$$\text{MIN } Z = + p \, 0,7\text{CR} + 0,6\text{IA} + 0,9\text{IPR} + 1,4\text{IRN} + 2,7\text{IES} + 0,8\text{IER} + p \, 0,7\text{CIV} + p \, 0,6\text{TP}$$

Le soluzioni proposte dalla simulazione "B" sono piuttosto controverse (vedi fig. 5). Assumendo  $p$  minore o uguale a 3 viene individuata una soluzione identica a quella "A" con pesi bassi. Tale risultato

appare ragionevole in quanto gli scenari, condividendo il criterio di connettività viaria, hanno degli obiettivi comuni. Aumentando ulteriormente  $p$  il modello individua una soluzione completamente diversa da quella precedente, ma abbastanza simile a quella ottenuta accentuando il "localismo" del decisore. La soluzione ottima per il realizzatore dell'opera prevede un certo miglioramento della connettività viaria e dei costi mentre peggiorano sensibilmente gli impatti sulle emergenze storiche e sull'edificato residenziale.

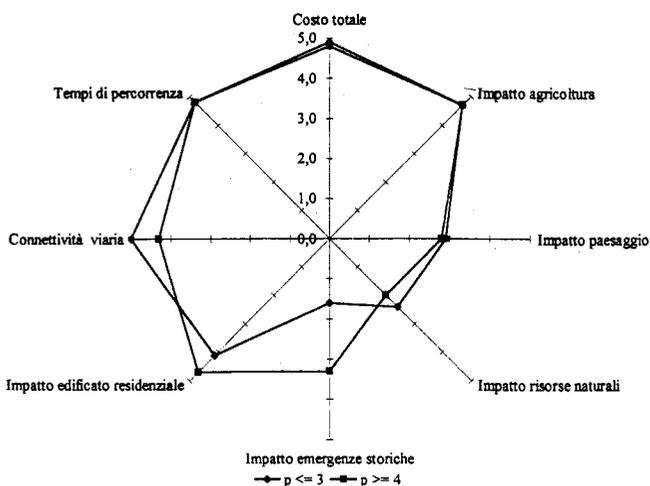


Figura 5. I risultati della simulazione "B"

#### 5.2.4. Scenario con decisore "C"

L'ultima simulazione ha riguardato il decisore "C" e cioè un soggetto particolarmente sensibile alla tutela delle risorse naturali e culturali presenti nel territorio. Tale simulazione, analogamente alle precedenti, si è concretizzata nella rivalutazione del peso di alcuni criteri e, in particolare dell'indicatore di impatto sul paesaggio rurale, sulle risorse naturali e sulle emergenze storiche.

La relativa funzione obiettivo è la seguente:

$$\text{MIN } Z = +0,7\text{CR} + 0,6\text{IA} + p\,0,9\text{IPR} + p\,1,4\text{IRN} + p\,2,7\text{IES} + 0,8\text{IER} + 0,7\text{CIV} + 0,6\text{TP}$$

I risultati delle simulazioni indicano un livello di somiglianza con le altre soluzioni decrescente al crescere del peso attribuito agli

indicatori di tipo ambientale (vedi fig. 6). Assumendo  $p$  pari a 2 si ottiene un tracciato quasi identico a quello delle simulazione "Base", e molto simile a quelli delle simulazioni "A" e "B" con  $p$  uguale a due.

Aumentando  $p$  il tracciato si differenzia significativamente dalle altre simulazioni ad eccezione di quella "Base". Tale differenziazione, ovviamente, si riflette sullo stato dei criteri decisionali. Per quanto riguarda i criteri di tipo ambientale si evidenzia un miglioramento evidente solo dell'impatto sulle risorse naturali. Gli altri due indicatori (IES e PR) non migliorano in modo apprezzabile. La diminuzione dell'impatto ambientale comporta essenzialmente un peggioramento della connettività viaria e dell'impatto sull'edificato esistente. Da notare, infine che la diminuzione dell'impatto ambientale comporta anche una leggera di diminuzione dei costi.

Riassumendo, è possibile affermare che l'introduzione di una funzione obiettivo multicritero semplifica notevolmente il tracciato. Infatti, i nodi attivati almeno una volta sono stati 44 rispetto ai 66 attivati nelle simulazioni monocritero. Inoltre, il numero medio di nodi per tracciato si riduce a 17-18. Infine, i tracciati risultano mediamente più simili di quelli individuati dalle soluzioni monocritero e quindi il modello sembra, intrinsecamente, capace di ricercare delle soluzioni di compromesso fra interessi opposti.

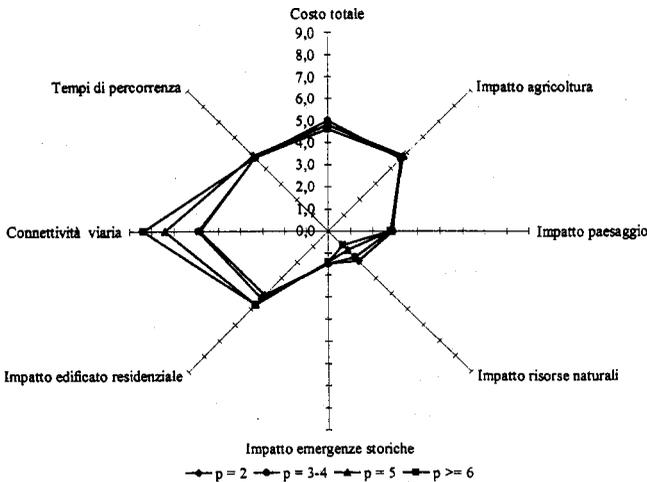


Figura 6. I risultati della simulazione "C"

## 8. Conclusioni

Il lavoro qui brevemente presentato aveva lo scopo di approfondire la possibilità e l'utilità di estendere alcune tecniche di programmazione matematica al vasto campo della valutazione di piani e progetti di tipo pubblico. In particolare, ci si proponeva di sperimentare l'applicazione di algoritmi ottimizzanti nell'ambito classico dell'analisi multiattributo e cioè quello delle scelte di tipo discreto. Il modello sviluppato e la relativa applicazione sembrano dimostrare delle buone potenzialità applicative, oggettivando la fase di costruzione delle alternative. Ovviamente, il modello è predisposto per la risoluzione di problemi particolari, come quello della localizzazione di infrastrutture lineari, ma potrebbe essere facilmente esteso a tutti i problemi formalizzabili mediante tecniche di ottimizzazione combinatoria. L'approccio illustrato sembra dilatare notevolmente i gradi di libertà del decisore consentendo la gestione contemporanea di un gran numero (teoricamente infinito) di alternative senza la necessità di esplicitarle preliminarmente, come invece avviene nell'approccio multiattributo classico. Inoltre, le modalità di risoluzione del modello garantiscono l'efficienza della soluzione individuata.

L'approccio presenta, comunque, dei limiti e fa intravedere alcune linee di sviluppo.

Il limite principale consiste nell'elevato fabbisogno di dati. Infatti, la costruzione di un set delle soluzioni ammissibili così complesso si accompagna, ovviamente, ad una disponibilità di dati adeguata a costruire le relative matrici di valutazione. Tale limite potrebbe, comunque, essere superato mediante il ricorso a sistemi di informativi geografici che possono agevolmente e rapidamente gestire basi dati anche molto vaste. Tali sistemi, inoltre cominciano ad incorporare procedure di analisi multicriteri.

Le linee di sviluppo del modello sono numerose e riassumibili nei seguenti punti:

- il perfezionamento delle modalità di elicitazione dei parametri di tipo qualitativo mediante tecniche di analisi gerarchica (Saaty, 1980);
- l'incorporazione degli aspetti distributivi a livello territoriale dei vantaggi e degli svantaggi della localizzazione delle opere in quanto la funzione obiettivo è prettamente compensativa; tale aspetto potrebbe essere incorporato mediante l'assunzione di criteri decisionali georeferenziati e adottando un set di norme circa gli aspetti distributivi.

- il miglioramento della funzione obiettivo sia mediante il perfezionamento delle funzioni di utilità da attribuire ai diversi parametri decisionali sia mediante la simulazione di procedure decisionali più complesse (SAW, ELECTRE, TOPSIS, MIN-MAX, ecc.). Tale possibilità è strettamente connessa con lo sviluppo di algoritmi ottimizzanti in grado di risolvere problemi non lineari ed a numeri interi.

In conclusione, la reinterpretazione dei classici approcci multiattributo mediante tecniche di programmazione matematica sembra rilassarne notevolmente i limiti riconducibili ad una certa rigidità ed arbitrarietà nella fase di generazione delle alternative. Comunque, l'opportunità di avvalersi di questo tipo di approccio varia da caso a caso ed è funzione del grado di libertà del decisore nell'ipotizzare soluzioni. In ogni caso sembra costituire un filone di ricerca di un certo interesse per il miglioramento delle performance dei sistemi di supporto alla decisione in ambito pubblico.

## Bibliografia

Alberti M., Bettini V., Bollini G., Falqui E. (1988) *Metodologie di valutazione dell'impatto ambientale*. Clup, Milano.

Beinat E. (1997) *Value Function for Environmental Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Bernetti I. (1993) *L'impiego dell'analisi multicriteriale nella valutazione di impatto ambientale delle condotte pubbliche*. Atti del XXIII Incontro del Ce.S.E.T., Ce.S.E.T., Firenze, pp. 89-101.

Bruschi S., Gisotti G. (1992) *Valutare l'ambiente*. La Nuova Italia Scientifica, Roma.

Campa M. (1997) *Modello di programmazione dinamica a numeri interi per la VIA delle strade di grande comunicazione*, Tesi di Laurea, IUAV, Venezia. Pp. 36-53.

Colorni A. (1988) *Elementi di ricerca operativa*. Zanichelli, Milano.

Colorni A., Laniado E., Rosace F. (1987) *Valutazione integrata per la scelta tra progetti alternativi*. Clup, Milano.

Einhorn H.J., McCoach W. (1977) *A Simple Multiattribute Procedure for Evaluation*. Behavioural Science, n. 22, pp. 270-282.

Goicoechea A., Hansen D.R., Duckstein L. (1982) *Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications*. John Wiley & Sons, New York.

Marangon F., Rosato P. (1995) *L'analisi multi-criteri nella gestione delle risorse naturali. Il caso delle risorse agroambientali*. Economia delle Fonti di Energia e dell'Ambiente, n. 2, pp. 45-89.

Marinelli A. (1993) *Le servitù per condotte e la loro influenza nella gestione del territorio montano e delle foreste*. Atti del XXIII Incontro del Ce.S.E.T., Ce.S.E.T., Firenze, pp. 89-101.

Polelli M., Sali G. (1987) *La valutazione di impatto ambientale, criteri generali e procedure applicative: il caso delle linee di trasporto*. Genio Rurale, n. 4, pp. 7-16.

Romero C., Rehman T. (1989) *Multiple Criteria Analysis for Agricultural Decisions*. Elsevier, Amsterdam.

Saaty T. (1980) *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw Hill. New York.

Schrage L. (1987) *Linear, Integer and Quadratic Optimization with LINDO*. The Scientific Press, Palo Alto.

Rostirolla P. (1997) *La valutazione nella fase di progettazione preliminare di un tracciato autostradale: tecniche e supporti informatici*, sta in: L. Fusco Girard e P. Nijkamp (eds) *Le valutazioni per lo sviluppo sostenibile della città e del territorio*. F. Angeli, Milano, pp. 487-516.

Vincke, P. (1992) *Multicriteria Decision Aid*. John Wiley & Sons, New York.

## Appendice: Esempio di scheda di analisi

ARCO: AA-AB

LUNGHEZZA: 1640 metri

ZONA AGRICOLA: E2

USO AGRICOLO DEL SUOLO: 1/4 grano;  
3/4 su mais

PAESAGGIO RURALE: Paesaggio dei campi chiusi con sistemazione a cavino.

RISORSE NATURALISTICHE: 1/7 su biotopo.

RISORSE STORICHE: 1/6 tot su zona a vincolo monumentale.

IDROGEOLOGIA: ghiaie e sabbie prevalenti, area di protezione della falda.

GEOMORFOLOGIA: depositi fluvio-glaciali e alluvionali antichi e recenti.

CONNESSIONE INFRASTRUTTURE ESISTENTI:

A) incontra : 2 ferrovie, 1 strada statale, 1 provinciale ed 1 comunale.

B) necessita di : 1 svincolo

C) dista : 820 m da svincolo e 1100 m da altra statale

EDIFICI RESIDENZIALI A MENO DI 100 METRI: 141 edifici.

TEMPO DI PERCORRENZA (velocità di 100 km/h ): 59 sec.

COSTI DI REALIZZAZIONE ( in miliardi ) :

1/2 viadotto (h>6m): 19.68

1/2 rilevato (h>4m): 5.08

1 svincolo: 15.40

Espropri: 0.54

---

Totale 40.70