



CATALOGAZIONE DI TRATTI STRADALI A RISCHIO NATURALE O ANTROPICO MEDIANTE L'APPLICAZIONE DEL GIS

Costanzo Graffi

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento
Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, - 20133 Milano - Italia
Tel: +39 011.5645625 - Fax: +39 011.5645614
E-mail: graffi@polito.it

Savino Rinelli

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento
Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, - 20133 Milano - Italia
Tel: +39 02.23996613 - Fax: +39 02.23996606
E-mail: rinelli@mail.dstm.polimi.it

Loretta Venturini

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento
Politecnico di Milano - Piazza Leonardo da Vinci 32, - 20133 Milano - Italia
Tel: +39 02.23996619- Fax: +39 02.23996657
E-mail: venturini@mail.dstm.polimi.it

CATALOGAZIONE DI TRATTI STRADALI A RISCHIO NATURALE O ANTROPICO MEDIANTE L'APPLICAZIONE DEL GIS

- COSTANZO GRAFFI – Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento - Politecnico di Milano
RINELLI SAVINO – Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento - Politecnico di Milano
LORETTA VENTURINI – Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambientale e Rilevamento - Politecnico di Milano

Sommario

Gli interventi innovativi o di adeguamento funzionale sulla rete stradale devono tenere in considerazione anche i “vincoli esterni” all’infrastruttura quali, ad esempio, aree edificate, aree naturali protette, zone a rischio (idrogeologico, industriale, incendio boschivo, sismico e nucleare).

Un possibile strumento per la rapida gestione dei dati relativi ai fattori menzionati è il Geographical Information System (GIS), con il quale è possibile modellizzare la superficie terrestre ed analizzare le caratteristiche d’interesse. Il GIS qualifica gli oggetti dal punto di vista geometrico e topologico, rendendo possibile l’assegnazione ad essi di specifici attributi. Per l’ottenimento del risultato si realizzano mappe digitali tematiche georeferenziate (layers) e si fa ricorso ad opportuni database ed a software per l’analisi spaziale delle informazioni. L’archiviazione dei dati può avvenire utilizzando il formato vettoriale (dati geometrici definiti da coordinate) o il formato raster (suddivisione della mappa in pixel, i cui attributi sono definiti da un valore alfanumerico), il quale risulta più agevole per l’analisi proposta.

Si propone di utilizzare il GIS come strumento di supporto alla decisione sia nella fase progettuale, sia nella fase gestionale e manutentiva delle infrastrutture stradali.

Nel caso della progettazione si deve realizzare una mappa riassuntiva ottenuta attraverso la correlazione delle mappe tematiche considerate. Tale procedimento è ottenibile grazie all’utilizzo di appositi software che tengono in considerazione i pesi assegnati ai singoli “vincoli esterni”. L’analisi della mappa riassuntiva permette di determinare i valori degli “indici globali di vincolo” delle varie soluzioni, secondo i quali avviene la scelta del tracciato ottimale.

La gestione e manutenzione stradale, invece, necessita della sola determinazione della mappa riassuntiva, in funzione della quale si definisce direttamente la priorità di intervento delle diverse zone della infrastruttura viaria, a seconda del riferimento tematico prescelto quale significativo.

Si riportano due applicazioni del metodo, una relativa alla progettazione e l’altra al monitoraggio e prevenzione dei rischi di pertinenza della Protezione Civile.

Abstract

The intervention for the renewing and the functional adjustments of the road net must also to respect the ties external to the infrastructure, that are, for instance, built areas, protected natural areas, risk zones (hydro geological, industrial, wooded, seismic and nuclear).

Relating to the mentioned factors the Geographical Information System (GIS) is a tool to make data management faster. The GIS is able to model the terrestrial surface and to analyze the characteristics of interest. The GIS qualifies the objects from the geometric and topological point of view, making possible the assignment of specific attributes to them. To obtain this result it realizes thematic georeferenced digital maps (layers) and it uses opportune database and software for the spatial analysis of the information. For the data filing the vectorial (geometric data defined by coordinates) or the raster format (map subdivided in pixels, whose attributes are defined by an alphanumeric value) can be used. The last one results easier for the proposed analysis.

In this paper the GIS is presented as a tool of support for the decision both in the design process and in the management and maintenance phase of the road infrastructures.

In the road design a resuming map, obtained from the correlation of the considered thematic maps, must be realized. Such procedure is realized using special softwares that consider the weights assigned to the single external "ties". The analysis of the resuming map allows to determine the values of the "global indexes of tie" of the varied solutions, according to which the optimal layout is chosen.

The road management and maintenance need only the determination of the resuming map, that defines the priority of intervention of the road infrastructure's different zones, directly according to the select thematic reference selected as meaningful.

Two applications of the method are reported, one related to the planning and the other to the monitoring and prevention of the risks of the Civil Protection's pertinence.

1. INTRODUZIONE

La progettazione e la gestione delle infrastrutture viarie trovano un valido strumento nel GIS. Esso consiste in un sistema elettronico di gestione di dati di differente natura e formato mediante il quale si possono semplificare operazioni le quali, se eseguite manualmente, risultano piuttosto lunghe e dispendiose.

Nel presente lavoro sono descritti due ambiti del settore della progettazione e manutenzione delle infrastrutture viarie nei quali il GIS può trovare applicazione.

Si propone il GIS come strumento per la rappresentazione e l'elaborazione dei dati nel processo decisionale legato alla costruzione di una strada. Si applica l'analisi multicriteri per giungere ad una scelta tra differenti tracciati definendo, per ognuno di essi, un grado di pericolosità. I parametri utilizzati per il confronto possono essere facilmente ricavati mediante l'utilizzo del GIS.

In un secondo tempo si propone un'applicazione utile per l'organizzazione degli interventi della Protezione Civile nel caso d'eventi naturali straordinari. In tali evenienze, infatti, è di grande importanza la tempestività con la quale s'isolano le zone a maggior rischio di calamità al fine di preservare l'incolumità delle persone. Il GIS fornisce una rapida visualizzazione di dette zone con la possibilità di definire le tempistiche d'intervento.

I due casi esaminati sono descritti mediante l'utilizzo d'esempi pratici.

2. IL GIS

Il GIS è uno strumento scientifico che consente l'acquisizione, l'elaborazione, la gestione e la rappresentazione d'informazioni relative al territorio ed all'ambiente. Esso è, infatti, anche definito come Sistema Informativo Territoriale o Sistema Informato Ambientale. Si tratta di un sistema utilizzabile in campo tecnico, amministrativo e

sociale, in quanto non solo è in grado di caratterizzare il territorio dal punto di vista geometrico e topologico, ma anche di associare ad esso degli attributi ed esaminarlo in funzione di questi ultimi.

Il GIS consiste, generalmente, in mappe digitali, database e software per l'elaborazione e la rappresentazione delle informazioni.

Una mappa costituisce un'astrazione della realtà finalizzata alla localizzazione degli elementi ambientali ed antropici ed all'individuazione di eventuali relazioni esistenti tra fenomeni di varia natura. Una delle caratteristiche fondamentali delle mappe è la "georeferenziazione" dei dati in esse contenuti, ovvero l'attribuzione ad ogni elemento delle relative coordinate spaziali in funzione dei tradizionali sistemi di riferimento (ad esempio U.T.M., Gauss-Boaga); nel GIS non si utilizzano sistemi di riferimento arbitrari.

La tipologia di mappe utilizzate dai GIS è quella *digitale*. Definito il sistema di riferimento e il modello dei dati, l'archiviazione di questi può avvenire in *formato vettoriale* o in *formato raster*.

La gestione del Database avviene attraverso una molteplicità di strutture e formati; la struttura più semplice è rappresentata da una tabella nelle cui righe sono poste le entità e nelle cui colonne sono inseriti i relativi attributi alfanumerici. Tale struttura risulta poco efficiente se si hanno differenti livelli di erogazione dei dati o molte entità da gestire. In questi casi è preferibile ricorrere a Data Base Management System (DBMS), sistemi finalizzati alla gestione di più tabelle, files o database.

La suddivisione in categorie dei DBMS avviene in funzione della modalità di strutturazione e gestione degli archivi dei dati alfanumerici. Si hanno DBMS di tipo:

- Gerarchico (struttura ad albero);
- Reticolare (struttura a grafo);
- Relazionale (serie di tabelle);
- Ad oggetti (spazio suddiviso in oggetti di geometria definita).

Il GIS elabora dati soltanto in formato digitale, per questo tutte le informazioni disponibili in formato analogico devono essere convertite. L'acquisizione dei dati consiste, quindi, nella digitalizzazione delle primitive geometriche, nella numerazione dei vari attributi e nell'assegnazione di questi ultimi alle primitive.

I prodotti ottenuti dalla digitalizzazione possono avere due differenti formati: vettoriale e raster. Nel caso della cartografia vettoriale i dati acquisiti sono archiviati in due files in formato ASCII: nel primo sono riportate le coordinate opportunamente codificate delle primitive; nel secondo è memorizzata, per ogni primitiva codificata, la relativa stringa degli attributi.

Nel caso della cartografia raster il file generato contiene le informazioni inerenti al numero di righe e di colonne della scansione, alla dimensione del pixel, alle coordinate strumentali di uno dei quattro vertici della matrice e l'orientamento delle righe rispetto all'asse delle ascisse del sistema di riferimento dello strumento.

I dati acquisiti devono essere successivamente analizzati con lo scopo di controllare, ed eventualmente modificare, le informazioni geometriche e gli attributi dei dati archiviati. La funzione più comune espletata dal GIS consiste nel *calcolo di grandezze geometriche* come la lunghezza, il perimetro e l'area degli elementi presenti sulle mappe digitali. E' necessario ricordare che le grandezze restituite sono affette da approssimazione a causa del formato adottato: quello vettoriale rappresenta gli elementi mediante l'utilizzo di segmenti concatenati fra di loro; quello raster approssima gli

oggetti utilizzando i pixel, la dimensione dei quali influenza la precisione della rappresentazione.

Un'altra funzione fondamentale del GIS consiste nella possibilità di estrapolare dati specifici contenuti nel database tramite la formulazione di “*queries*”, le quali consentono, inoltre, di controllare la qualità dei dati e dei risultati ottenuti. Le queries formulabili sono di due tipologie: spaziali e non-spaziali. Le prime permettono di conoscere la posizione spaziale di un elemento; le seconde di rilevare elementi in funzione dei loro attributi. Queste due tipologie possono essere combinate tra loro per soddisfare quesiti più complessi.

Una variante delle queries è la “*riclassificazione*”, funzione utilizzabile unicamente per i dati in formato raster. La riclassificazione consiste nel fornire un nuovo valore ai singoli pixel secondo diversi criteri di valutazione ed assegnazione. Tra questi si possono citare il metodo Booleano (i pixel relativi ad un elemento o attributo di interesse vengono riclassificati col numero 1, agli altri si assegna il valore 0) ed il metodo della “*pesatura*” (i valori dei pixel riclassificati sono assegnati in funzione dell'importanza dell'oggetto o dell'attributo).

Il GIS possiede, inoltre, una serie di funzioni che permettono la reciproca influenza tra diverse entità spaziali vicine, dando origine ad attributi per vicinanza.

La funzione chiave del GIS è la “*sovrapposizione di mappe*” la quale permette il confronto visivo tra dati contenuti in mappe diverse. Nel caso della cartografia vettoriale il confronto comporta un'elaborazione lunga, costosa e complessa. Nel caso della cartografia raster, invece, il confronto risulta veloce, semplice ed efficiente.

La procedura di valutazione degli attributi ignoti di un elemento avviene tramite “*l'interpolazione spaziale*”, funzione che assegna un attributo in funzione degli attributi delle zone limitrofe. Benché esistano differenti tecniche d'interpolazione, i dati ricavati sono sempre delle approssimazioni dello stato reale. L'utilizzo dell'interpolazione spaziale permette la rappresentazione del territorio il quale, approssimato ad una superficie, può essere studiato tramite l'applicazione della funzione di “*analisi delle superfici*”. Questa funzione permette di calcolare la pendenza e l'orientazione di un terreno.

L'ultima funzione di una certa rilevanza è l’“*analisi di reti*”, la quale permette di risolvere problemi come la definizione del minimo percorso tra due punti, il percorso di minima spesa, l'allocazione ed il tracciamento di strade.

Il risultato finale di un'applicazione del GIS può consistere in carte tematiche, grafici, report statistici, tavole e listati. La forma più comune è indubbiamente la carta tematica, in quanto essa costituisce la rappresentazione più elegante e completa. Gli elementi costitutivi di una carta sono:

- il quadro di delimitazione;
- i meridiani ed i paralleli interni all'area cartografica;
- il grigliato chilometrico;
- le coordinate geografiche e chilometriche dei vertici della carta;
- la scala di rappresentazione;
- le caratteristiche della proiezione cartografica;
- il tema della carta;
- l'annotazione ed i simbolismi utilizzati.

Negli ultimi anni si sono diffuse altre forme di rappresentazione cartografica, come i cartogrammi, viste tridimensionali e animazioni.

Le tavole ed i listati contengono dati spaziali ed attributi contenuti nel database del GIS rappresentati in formato alfanumerico. Gli stessi dati possono essere rappresentati mediante l'utilizzo di grafici.

Un affinamento della rappresentazione dei dati a video può essere ottenuto tramite l'utilizzo d'immagini fotografiche, testi, grafici, suoni e video opportunamente collegati.

I dati digitali possono essere restituiti su carta o pellicola per mezzo di stampanti o plotter.

2. IL GIS E LE PROBLEMATICHE STRADALI

L'odierna progettazione stradale comprende due processi decisionali fondamentali. Il primo è legato da vincoli costruttivi che condizionano la costruzione di una strada in funzione della sua classe d'appartenenza. Quanto più è elevata l'importanza della strada da realizzare, infatti, quanto più sono restrittivi i vincoli, quale la pendenza massima, la larghezza, il raggio delle curve e via dicendo.

Il secondo processo, invece, si attua in seguito al tracciamento di una serie di possibili percorsi e risponde a vincoli indipendenti dalle norme di realizzazione. Si tratta di vincoli di tipo ambientale, socio-economico, manutentivo e di sicurezza.

Una strada, infatti, costituendo una via di comunicazione e di collegamento tra centri urbani, si sviluppa in un territorio caratterizzato dalla presenza di aree boschive, parchi, fiumi, laghi, i quali, se da un punto di vista paesaggistico possono rendere più gradevole la percorrenza, dall'altro possono presentare degli inconvenienti per la sicurezza al transito a causa di eventi straordinari, quali inondazioni, incendi, frane etc. I disastri accaduti negli ultimi anni a causa delle intense precipitazioni piovose pongono in evidenza la necessità di potenziare le risorse per la prevenzione e l'intervento in tali evenienze.

In questo contesto il GIS si pone come un valido strumento che agevola l'individuazione visiva immediata di dette aree.

A valle delle considerazioni riportate, appare evidente come il GIS possa avere un'applicazione particolare alla progettazione stradale come strumento per la scelta del percorso migliore tra quelli disponibili e per la gestione degli interventi d'emergenza in caso di eventi calamitosi straordinari.

La progettazione stradale necessita di uno strumento per la scelta tra possibili tracciati al fine di ridurre al minimo i pericoli per gli utenti. La gestione degli interventi di emergenza in caso di eventi straordinari, invece, ha bisogno di strumenti che permettano una rapida individuazione delle zone di maggior rischio per gli utenti. Date le esigenze di diversa natura dei settori menzionati, gli strumenti adottati nel GIS assumono una differente finalità pur esplicando la medesima funzione. Nei paragrafi successivi sono esposte le operazioni realizzate col GIS comuni ai due scopi prefissati, mentre in seguito verranno spiegati i differenti procedimenti nei quali tali potenzialità sono utilizzate.

Il GIS, come evidenziato in precedenza, è in grado di gestire mappe tematiche differenti inerenti la stessa area, che sono generalmente costituite da un'immagine del territorio, comune a tutte le mappe utilizzate, su cui sono riportati degli oggetti i quali ne evidenziano determinate caratteristiche. Alcuni esempi sono la rete fluviale, la rete stradale, le aree boschive, i parchi etc. Gli "oggetti" sono creati sotto forma di strati sovrapponibili (layers) e rappresentabili sulla stessa base informatica e con lo stesso

formato. L'utilizzo degli oggetti presenti nelle mappe tematiche da parte del GIS necessita della loro identificazione attraverso degli attributi.

Mediante l'utilizzo delle queries è possibile visualizzare, sullo stesso supporto informatico, gli oggetti provenienti da differenti mappe tematiche distinti in base agli attributi.

Nel caso particolare della progettazione stradale e della gestione d'eventi calamitosi eccezionali è necessario individuare delle aree d'influenza degli eventi attesi. L'alluvione, ad esempio, è un evento relativo all'oggetto "rete fluviale" ed interessa una zona la cui estensione può essere determinata in base ad analisi di tipo statistico sulle precipitazioni, alla conformazione del territorio nei pressi dei corsi d'acqua ed alla presenza di strutture di contenimento delle acque.

Ad ogni tipologia di calamità è, inoltre, necessario assegnare un peso definito mediante analisi della probabilità che esso si manifesti e dei costi che causerebbe nel caso accadesse.

Tutti i processi descritti necessitano di un valido strumento teorico che leghi opportunamente le conoscenze disponibili sul territorio in esame con il processo decisionale.

Si riporta, in seguito, la descrizione dell'analisi multicriteria di supporto ai processi decisionali, per poi esporre il contributo che il GIS può offrire nell'applicazione di tale metodo nel campo della progettazione stradale e della gestione degli interventi nel caso d'eventi eccezionali.

3. ANALISI MULTICRITERI PER IL PROCESSO DECISIONALE

La scelta del miglior tracciato secondo una molteplicità di criteri di confronto implica l'utilizzo di adeguati metodi decisionali, come l'analisi multicriteri.

Tali metodi consistono nella disaggregazione del processo decisionale in tanti piccoli, quindi più semplici, processi decisionali basati sui criteri di confronto adottati per la scelta. In seguito alla valutazione delle possibili scelte, l'analisi multicriteri è in grado di fornire un valore numerico di valutazione delle possibilità e di eseguire, in questo modo, un confronto.

Un processo decisionale adottabile per la scelta del tracciato migliore è l'AHP (Analytic Hierarchy Process). Esso si basa sulla rappresentazione gerarchica di tutti gli elementi del problema, del quale s'individuano le più piccole parti costituenti. Il confronto tra le possibili alternative di scelta avviene mediante confronti a coppia che definiscono la reciproca importanza degli elementi riportati nella gerarchia. I giudizi espressi sono tradotti in valori numerici [6].

L'AHP, in pratica, definisce la priorità tra le alternative passando per la gerarchia dei criteri di giudizio. Tale processo è definito come "assegnazione delle priorità a passi successivi". Il primo passo consiste nell'individuare gli elementi più importanti del problema, per poi passare alla valutazione di detti elementi e giungere, infine, alla valutazione del risultato ottenuto. La struttura del processo è tale per cui ogni passo può essere revisionato sino al raggiungimento di una soluzione soddisfacente.

L'AHP si fonda su tre principi: il principio di *identità e decomposizione*, il principio di *discriminazione e dei giudizi comparativi* ed il principio di *sintesi*.

Il *principio di identità e decomposizione* richiede la strutturazione gerarchica del problema. Nella sua forma più generale, al vertice della gerarchia si deve porre l'obiettivo da perseguire, ai livelli intermedi i criteri ed i sottocriteri in base ai quali analizzare gli elementi successivi, ed all'ultimo livello l'elenco delle alternative. Una

gerarchia è definita completa quando tutti gli elementi di un dato livello costituiscono il criterio di confronto per i livelli successivi in base alle comparazioni in coppia.

Il *principio di discriminazione e dei giudizi comparativi* indica le modalità con le quali stabilire la priorità tra i criteri e valutare ciascuna alternativa rispetto ai criteri scelti. Gli elementi del problema, nell'AHP, sono confrontati a coppie con riferimento ad una proprietà comune. La comparazione a coppie avviene mediante l'utilizzo di matrici quadrate in corrispondenza delle righe e delle colonne nelle quali sono posti gli elementi da confrontare. La casella nella quale si indica il confronto di un elemento con se stesso vale 1. Nel caso in cui un elemento in riga (i) abbia un'importanza maggiore di un altro in colonna (j), il termine di confronto sarà superiore ad 1. Valgono, quindi, le seguenti proprietà per gli elementi contenuti nella matrice:

$$a_{ii} = 1$$
$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

Gli elementi da determinare in una matrice di questo tipo sono pari e di numero pari a $n(n-1)/2$.

Laddove gli elementi siano confrontati in base ad un criterio quantificabile, il livello d'importanza relativa si ottiene mediante il rapporto tra i valori assunti dagli elementi. In caso contrario sarà necessario introdurre una scala di priorità soggettiva. L'AHP è, quindi, in grado di tenere conto sia di fattori oggettivi sia di fattori soggettivi.

Stabilita la scala di valutazione si procede alla definizione della gerarchia all'interno dei vari livelli, a partire da quelli più alti, tenendo presente che gli elementi del livello superiore servono come criterio di valutazione per quelli del livello inferiore.

Nel caso di una struttura del processo a tre livelli come quello descritto in precedenza, prima si costruisce un'unica matrice con la quale definire le priorità dei criteri di giudizio, per poi passare alla valutazione delle alternative possibili rispetto ad ogni criterio.

Il *principio della sintesi delle priorità* indica le modalità con le quali trattare i risultati ottenuti dalla definizione delle priorità nell'ambito dei livelli del processo.

Le comparazioni a coppia permettono di ottenere numerose priorità locali attraverso la composizione di matrici di confronto.

Vi sono differenti modalità di definizione delle priorità, a seconda che si tratti di elementi tangibili, dai quali si ottiene una matrice consistente, o non tangibili, con conseguente ottenimento di una matrice inconsistente.

Una matrice si dice consistente quando:

$$a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$$

I termini della matrice possono essere espressi mediante:

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$$

con:

w_i che rappresenta il valore dell'elemento A_i posto in riga

w_j che rappresenta il valore dell'elemento A_j posto in colonna.

Il vettore priorità, in questo caso, è calcolabile normalizzando una qualsiasi colonna della matrice. Indicando con (x_1, x_2, \dots, x_n) le componenti del vettore, segue che:

$$x_i = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}$$

il che equivale a dire che:

$$x_1 = \frac{w_1}{\sum_{i=1}^n w_i}; \quad x_2 = \frac{w_2}{\sum_{i=1}^n w_i}; \dots \quad x_n = \frac{w_n}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

Nel primo caso la definizione dell'importanza di ciascun elemento avviene in modo piuttosto semplice e lineare.

Nel caso di una matrice inconsistente la determinazione del vettore delle priorità locali risulta più complessa, poiché la comparazione tra elementi non tangibili è generalmente fatta secondo giudizi soggettivi.

Esistono diversi metodi per la determinazione della priorità degli elementi. I principali sono il metodo della media geometrica e quello iterativo di Saaty. Con tali metodi, non solo si classificano gli elementi, ma si assegna un valore quantificatore alla loro priorità [7].

Il metodo della media geometrica consiste nella definizione del vettore caratteristico della matrice, le componenti del quale sono le medie geometriche degli elementi appartenenti a ciascuna riga della matrice.

L'elemento i -esimo del vettore è dato da:

$$y_i = \sqrt[n]{a_{i1} \cdot a_{i2} \cdot a_{i3} \cdot \dots \cdot a_{in}}$$

la componente del vettore priorità è dato da:

$$x_i = \frac{y_i}{\sum_{j=1}^n y_j}$$

I numeri contenuti nella matrice d'origine sono appartenenti alla scala di Relativa Importanza definita prima del processo di decisione.

Il metodo iterativo di Saaty considera il vettore priorità come il principale vettore caratteristico esatto della matrice A , la cui valutazione viene fatta risolvendo, in modo iterativo, il seguente limite:

$$X = \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{A^k \cdot e}{e^T \cdot A^k \cdot e} \text{ dove } e = (1,1,\dots,1)$$

L'iterazione avviene facendo variare l'esponente della matrice A , k , fino a convergenza dei valori ottenuti per il rapporto indicato. Tanto più sarà elevata l'inconsistenza della matrice, tanto più sarà grande il numero delle iterazioni da eseguire.

L'AHP permette di assegnare al processo decisionale un indice di consistenza, attraverso il quale si valuta quanto si è stati incoerenti nella compilazione della matrice. Se l'indice di consistenza supera un determinato limite ci si rende conto di aver fatto degli errori di valutazione grossolani.

Vi sono metodi differenti per la determinazione dell'indice di consistenza C.I. per ciascuna matrice e per l'intera gerarchia. Un metodo consiste nel sommare gli elementi

di ciascuna colonna della matrice, moltiplicare il valore ottenuto per il corrispondente componente del vettore priorità e sommare fra di loro i termini ottenuti: si ricava un valore, detto λ_{\max} , che corrisponde al massimo valore caratteristico della matrice A:

$$\lambda_{\max} = \sum_{j=1}^n \left[\left(\sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \cdot x_j \right]$$

Un altro metodo, indicato da Saaty, per valutare λ_{\max} è il seguente:

$$\lambda_{\max} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} \cdot x_j}{x_i}$$

Si definisce invece indice di Consistenza:

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

dove n è il numero di elementi comparati.

Il valore di C.I. deve essere confrontato con la consistenza di matrici i cui termini sono del tutto casuali secondo la scala da 1 a 9, compresi i valori inversi.

I valori dell'indice di consistenza in questo caso dipendono dall'ordine della matrice, sono definiti come Random Consistency e sono forniti dalla tabella seguente (Tab. 1):

Ordine della matrice	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Indice di consistenza R.I.	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabella 1 - Valori dell'indice di consistenza

Si ottiene un indicatore, detto Rapporto di Consistenza, dato da:

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

Il C.R. non deve superare il 10% per essere accettabile. In caso di superamento di questo limite è necessario rivedere i giudizi dati.

Il passo successivo alla determinazione dei vettori di priorità locale per ciascuna matrice di comparazione è la sintetizzazione di tali vettori per giungere al Vettore Priorità Composito o Globale delle alternative, relativo all'ultimo livello della gerarchia.

Tale operazione consiste nel moltiplicare la priorità locale di ciascun elemento per la priorità del corrispondente criterio al livello superiore, sommando così i risultati ottenuti. Si ottiene, in questo modo, la priorità composta o globale dell'elemento, che sarà usata per la definizione delle priorità locali degli elementi al livello inferiore fino a giungere all'ultimo.

L'operazione descritta, dal secondo livello in poi, avviene costruendo una matrice composta dalle colonne dei vettori priorità locali di un certo livello e moltiplicando tale matrice per il vettore priorità del livello superiore. Si ottiene, in questo modo, un Vettore Priorità Globale delle alternative rispetto a quest'ultimo livello. Si procede in questo modo fino ad arrivare al primo livello, ovvero l'obiettivo o fuoco della gerarchia.

L'AHP, in conclusione, è caratterizzato da quattro assiomi, di seguito riportati:

- il problema deve essere strutturato sotto forma di gerarchia;
- le matrici di comparazione sono costituite secondo un procedimento di confronto a coppia tra gli elementi;
- confrontando due alternative i, j , appartenenti ad A , non si può mai giudicare che $a_{ij} = \infty$;
- tutti i criteri e le alternative presenti nel processo decisionale sono presenti nella gerarchia, per cui ad ognuno di essi è assegnata una priorità comprensibile dall'intuito.

4. APPLICAZIONE DEL GIS ALLA PROGETTAZIONE STRADALE

L'analisi multicriteria fornisce un valido aiuto nella scelta tra differenti alternative possibili, ma presenta un punto debole, nella definizione delle priorità tra i criteri di giudizio, nella soggettività di alcune delle scale gerarchiche utilizzate. L'applicazione di tale metodologia alla progettazione stradale o a qualsiasi opera ingegneristica necessita di un livello di rigidità del processo decisionale piuttosto elevato.

Quale fase del processo decisionale trova, nel GIS, un valido aiuto? Si pensi alla conformazione del territorio. Esso è caratterizzato dalla presenza di aree verdi, aree fluviali, laghi, centri urbani, ovvero una serie di caratteristiche disomogenee fra di loro. La progettazione stradale, spesso, porta il progettista ad effettuare delle scelte basate sull'influenza che dette caratteristiche hanno sulla sicurezza piuttosto che sull'economicità di gestione delle infrastrutture. Tale scelta non sempre può essere effettuata secondo dei criteri ben definiti o secondo dei parametri quantificabili. In questo contesto ben s'inserisce l'analisi multicriteria ed il GIS. La prima fornisce lo schema logico per affrontare il problema, mentre il secondo è in grado di fornire ai parametri dei valori tangibili.

La prima importante funzione che il GIS è in grado di svolgere è la rappresentazione, su di un unico supporto digitale, delle differenti caratteristiche del territorio. Ad esse, è stato detto, è possibile assegnare degli attributi, sotto forma sia di nome sia di database più complessi. I dati immessi possono essere di vario genere, di tipo descrittivo, come le dimensioni lineari o di superficie, di tipo statistico, come la probabilità d'avvenimento di un evento, e possono essere posti in relazione fra di loro in modo da ottenere un indice di pericolosità della zona esaminata.

Il GIS, in poche parole, è uno strumento che permette di confrontare le caratteristiche disomogenee di un territorio secondo dei parametri ben definiti e costituenti, nel processo decisionale, delle matrici consistenti. In questo caso è possibile applicare il metodo d'analisi multicriteri nella sua forma più semplice.

Si consideri il processo decisionale relativo alla scelta del migliore di tre percorsi possibili. Il processo di scelta fa riferimento a tre caratteristiche del territorio, ovvero le aree boschive, le aree fluviali e le zone franose. L'area d'influenza delle aree fluviali è definita dalla prima curva di livello incontrata a partire dalla quota del fiume. La composizione della mappa utilizzata mediante l'utilizzo del GIS è riassunta nello schema di figura 1.

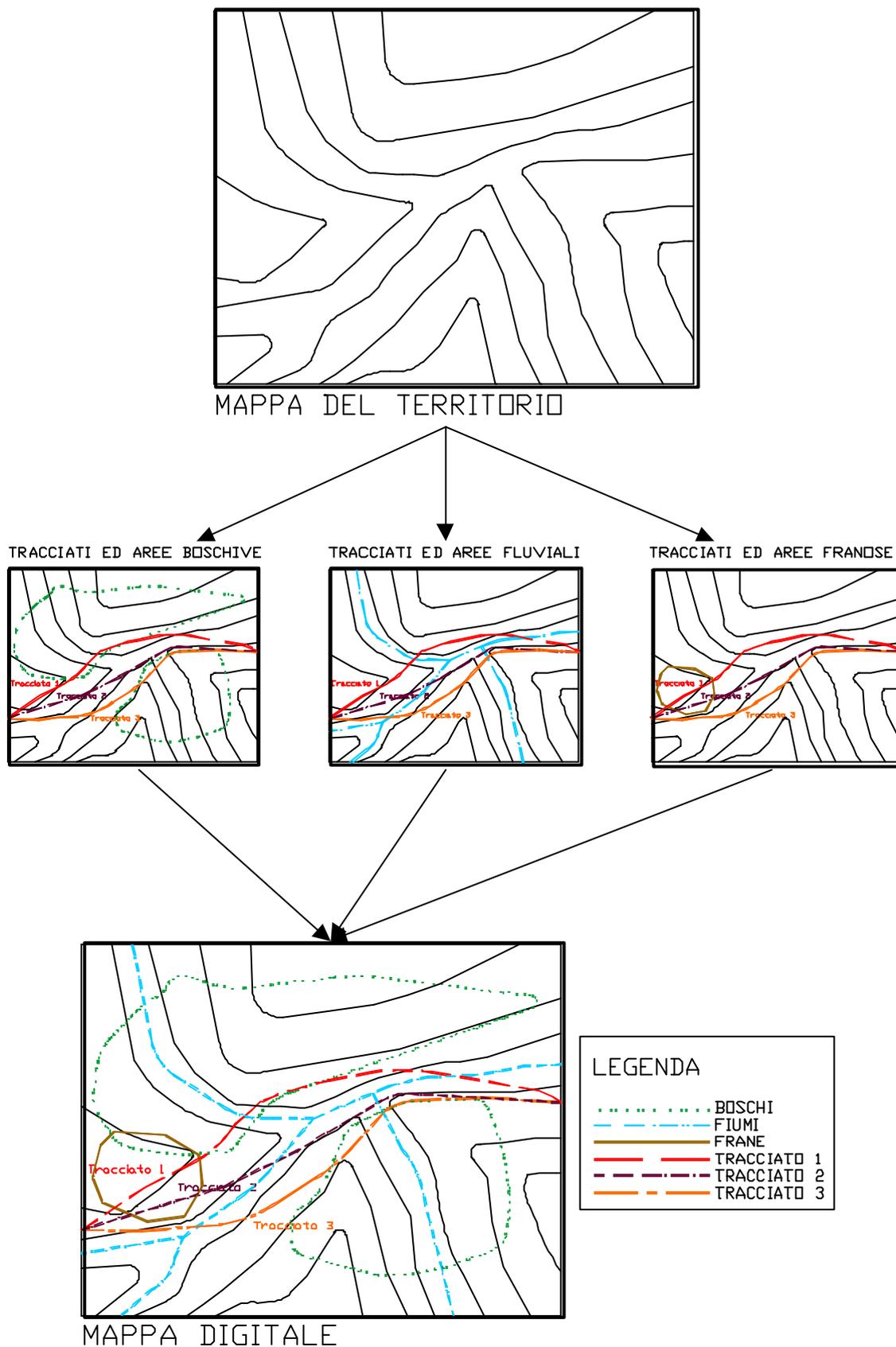


Figura 1 – Schema della composizione delle mappe digitali parziali e globali

Una volta in possesso dei dati di base, è possibile proseguire con il processo decisionale con la definizione della gerarchia a più livelli. Nel caso in esame, data la sua semplicità, è sufficiente una gerarchia a tre livelli.

Il primo livello, fuoco della gerarchia, consiste nell'obiettivo perseguito con la scelta. Nel nostro caso si può formulare come "Scelta del tracciato stradale con il minor grado di pericolosità".

Il secondo livello è costituito dalla moltitudine di parametri di confronto più rilevanti, oppure dalle aree d'influenza dei vari eventi calamitosi. La definizione della gerarchia d'importanza tra i parametri scelti si può riferire alla probabilità d'avvenimento dell'evento più catastrofico, oppure, più propriamente, al tempo di ritorno di tale evento. Individuati gli eventi, A_1 , A_2 , A_3 , a ciascuno di essi si calcola il valore del tempo di ritorno, T_i , dal quale si può ricavare il valore dei pesi $W_i = 1/T_i$ in quanto si considera più pericoloso un evento con tempo di ritorno minore e, quindi, peso maggiore. Si è in presenza di una matrice consistente, motivo per il quale è possibile ricavare i termini del vettore priorità locale per il secondo livello della gerarchia secondo le seguenti relazioni:

$$x_1 = \frac{\frac{1}{T_1}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{T_i}}; \quad x_2 = \frac{\frac{1}{T_2}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{T_i}}; \quad x_3 = \frac{\frac{1}{T_3}}{\sum_{i=1}^3 \frac{1}{T_i}}.$$

Il tempo di ritorno dell'evento costituisce, in questo caso, il parametro secondo il quale si confrontano i criteri di giudizio delle scelte in riferimento all'obiettivo, costituente il livello superiore della gerarchia.

Il terzo livello è costituito dai tracciati alternativi. Questi devono essere confrontati tra loro per ciascun criterio di giudizio. L'estensione globale d'ogni singolo tracciato che ricade all'interno della zona di pericolo A_i può essere considerato come parametro tangibile di confronto. È stato utilizzato un piccolo accorgimento per non incorrere in un errore dal punto di vista matematico. È possibile, infatti, che un tracciato non abbia tratti ricadenti in una particolare zona di rischio, per cui avrebbe un valore w_i da utilizzare per la definizione delle matrici di confronto a coppie pari a 0, il che porterebbe a coefficienti della matrice pari ad infinito. I valori di w_i utilizzati sono definiti, quindi, come $w_i = 10^{d_{A_i,k}}$. Definiti con $b_{A_i,lk}$ i termini della matrice di confronto relativa alla zona A_i , per i tracciati l e k , si ha che:

$$b_{A_i,lk} = \frac{w_{i,k}}{w_{i,l}}$$

in cui $w_{i,k}$ indica il valore della lunghezza della tratta del percorso k che ricade nella zona A_i .

Il valore delle priorità è definito direttamente applicando le formule esposte.

Nel caso pratico proposto si sono adottati i valori espressi in tabella 2,

PARAMETRI DEL SECONDO LIVELLO		
	T	w
Bosco	8	0,125
Fiume	3	0,333
Frana	5	0,200

Tabella 2 – Parametri del secondo livello della gerarchia e relativi coefficienti di confronto

dai quali si sono ricavate le conseguenti componenti del vettore di priorità locale (Tab. 3).

<i>Vettore priorità locale</i>	
x ₁	0,1899
x ₂	0,5063
x ₃	0,3038

Tabella 3 – Componenti del vettore di priorità locale per il secondo livello della gerarchia

L'utilizzo del GIS acquista particolare importanza per facilitare le operazioni descritte.

E' possibile, innanzi tutto, assegnare ai vari criteri di giudizio, rappresentati dagli oggetti caratterizzanti le carte tematiche di riferimento, una serie di dati, sotto forma di database, relativi ai dati storici raccolti ed elaborati statisticamente per ottenere il tempo di ritorno per ciascun evento.

Il passo successivo consiste nella rappresentazione su supporto digitale degli oggetti per eseguire il confronto, secondo quanto riportato in Figura 1, al secondo livello. In precedenza è stato indicato come il processo decisionale all'ultimo livello si attui mediante confronti a coppia relativi ai singoli criteri. Mediante il GIS è possibile definire i valori relativi a ciascun tracciato per criterio. Si deve, pertanto, rappresentare l'oggetto di confronto ed un possibile tracciato sullo stesso supporto informatico. Tale operazione è possibile mediante l'utilizzo delle queries ad oggetto. Si deve, in seguito, evidenziare come, noti i punti d'intersezione del tracciato con i confini delle zone, e possa essere ricavata la lunghezza delle singole tratte per sommarle. Quest'operazione va ripetuta per ciascun criterio di confronto e per tutti i percorsi. I dati ottenuti sono da immettere in un database per eseguire le elaborazioni relative alle matrici di confronto e la definizione dei vettori di priorità locale.

I risultati ottenuti nel corso dell'applicazione pratica proposta sono riportati nelle tabelle successive.

Tracciato	Bosco		Fiume		Frana	
	L [m]	w	L [m]	w	L [m]	w
1	1661	45,8	1631	42,8	1258	18,1
2	0	1,0	2411	257,6	867	7,4
3	2221	166,3	1940	87,1	0	1,0

Tabella 4 - Lunghezze dei tratti di percorso interessati dalle zone a rischio e relativi coefficienti di confronto

Fiume	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3
Tr. 1	1,00	0,17	0,49
Tr. 2	6,03	1,00	2,96
Tr. 3	2,04	0,34	1,00
Σ	9,06264	1,50402	4,44892

<i>Vettore priorità locale</i>	
x ₁	0,1103
x ₂	0,6649
x ₃	0,2248

Tabella 5.1 - Matrice e vettore di priorità locale per le aree fluviali.

Bosco	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3
Tr. 1	1,00	45,81	0,28
Tr. 2	0,02	1,00	0,01
Tr. 3	3,63	166,34	1,00
Σ	4,65261	213,155	1,28143

<i>Vettore priorità locale</i>	
x ₁	0,2149
x ₂	0,0047
x ₃	0,7804

Tabella 5.2 - Matrice e vettore di priorità locale per le aree boschive.

Frana	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3
Tr. 1	1,00	2,46	18,11
Tr. 2	0,41	1,00	7,36
Tr. 3	0,06	0,14	1,00
Σ	1,46165	3,5962	26,48

<i>Vettore priorità locale</i>	
x ₁	0,6842
x ₂	0,2781
x ₃	0,0378

Tabella 5.3 - Matrice e vettore di priorità locale per le aree franose

<i>Vettore priorità globale</i>	
Tracciato 1	0,3045
Tracciato 2	0,4220
Tracciato 3	0,2735

Tabella 6 – Componenti del vettore di priorità globale

Dall'esempio pratico riportato è risultato più soggetto alle conseguenze di eventuali eventi naturali straordinari il tracciato 2.

5. APPLICAZIONE DEL GIS NEGLI INTERVENTI DELLA PROTEZIONE CIVILE

Il procedimento utilizzato per la scelta del miglior percorso dal punto di vista del rischio di percorrenza può essere adottato dalla Protezione Civile per la definizione delle aree con maggiore priorità d'intervento.

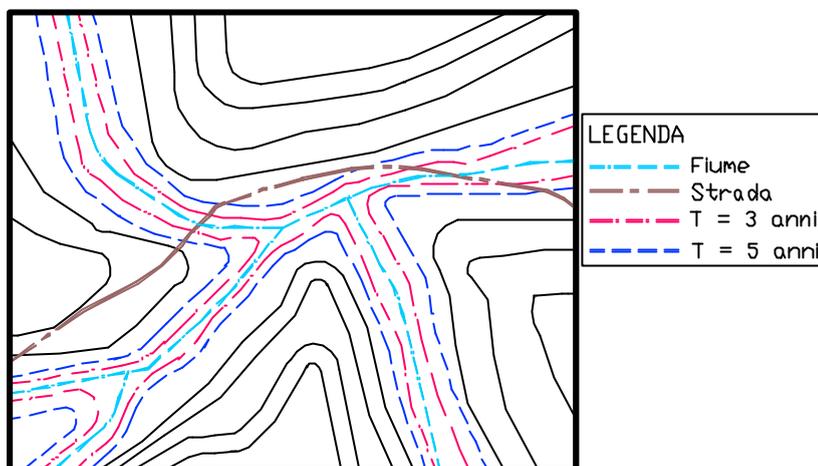
Il verificarsi d'eventi naturali catastrofici può portare a notevoli rischi per la percorrenza degli utenti. La Protezione Civile, in tal caso, deve sapere con un certo anticipo quali strade ed in quali punti bloccare la viabilità, per intervenire con la necessaria tempestività. L'individuazione delle zone critiche avviene rilevando, per ogni tipologia d'evento, le tratte di strada poste all'interno delle zone a rischio.

Definita la tipologia d'evento, mediante l'utilizzo del GIS è possibile visualizzare su di un unico supporto informatico la caratteristica del territorio relativa all'evento ed il tracciato stradale con le query ad oggetto. Il passo successivo consiste nell'elaborazione dei dati statistici relativi all'evento in questione con la definizione d'intervalli di probabilità di accadimento. Gli interventi della Protezione Civile devono essere dotati della sufficiente tempestività al fine di evitare pericoli per le persone, motivo per il quale è opportuno che si evidenzino le zone con maggiore probabilità di essere soggette all'evento. Il risultato ottenuto è una mappa tematica nella quale sono rappresentate le superfici interessate da un determinato evento straordinario, suddivise in aree di probabilità. Su detta mappa si riporta il tracciato della rete stradale esistente.

Si consideri, ad esempio, l'evento "alluvione". La sua causa risiede nelle intense piogge. E' possibile stabilire, in base ad eventi precedenti, una relazione tra l'intensità delle precipitazioni e l'aumento del livello di pelo libero della rete fluviale. Nel caso ci si trovasse in condizioni d'intense precipitazioni, è possibile individuare quali siano le zone a rischio ed a quale valore del tempo di ritorno di un evento ci si sta avvicinando. Definendo sulla mappa delle aree di probabilità in funzione del tempo di ritorno dell'evento, è possibile, noti l'intensità ed il tempo di precipitazione, stabilire in quali zone si ha il maggior pericolo per gli utenti della rete stradale e le tempistiche

d'intervento. E' inoltre possibile individuare quali strade possano essere utilizzate per deviare il traffico senza incorrere in inconvenienti.

In figura 2 si riporta un esempio di una mappa tematica nella quale sono state individuate le aree di "rischio progressivo" in funzione del tempo di ritorno degli eventi alluvionali.



MAPPA DIGITALE RELATIVA ALLE AREE
DI MAGGIOR RISCHIO D'INONDAZIONE

Figura 2 – Mappa digitale relativa alle aree di maggior rischio d'inondazione

La mappa ottenuta con questo procedimento fornisce una visione istantanea e chiara delle tratte della rete rese pericolose per la circolazione.

6. CONCLUSIONI

Il GIS rappresenta un valido supporto per la progettazione e la gestione delle infrastrutture viarie. Nel presente lavoro ne sono state riportate due possibili applicazioni, una nell'ambito del processo decisionale tra differenti tracciati e l'altra relativa all'individuazione delle aree di maggior rischio per eventi straordinari, ad uso della Protezione Civile.

La molteplicità d'operazioni che possono essere eseguite con il GIS ne fanno uno strumento piuttosto versatile per la rapida simulazione delle condizioni nelle quali si verrebbe a trovare un territorio in casi ed evenienze particolari.

Nel caso della progettazione stradale, il GIS è in grado di fornire dei valori tangibili per l'esecuzione di un processo decisionale rigoroso.

Nel caso dell'individuazione delle aree di maggior rischio nel caso d'eventi naturali eccezionali, il GIS permette, oltre che di rappresentare facilmente dette zone, di assegnare ad ogni evento dei parametri statistici mediante i quali ricavare informazioni sulle tempistiche d'intervento.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] **Crippa B.**, *Algoritmi e metodologie statistiche per la gestione degli elementi spazio-temporali dei GIS dinamici*, Tesi di laurea, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Svizzera, 1995.
- [2] **DeMers M. N.**, *Fundamentals of geographic information systems*, J.Wiley & Sons, 1987.
- [3] **Easa S., Chan Y.**, *Urban planning and development applications of GIS*, ASCE, 1999.

- [4] **Heywood I., Cornelius S., Carver S.**, *An introduction to geographical*, Longman, 1998.
- [5] **Nocera R.**, *Il modello concettuale e l'analisi spaziale di dati territoriali per un GIS dedicato a supporto della pianificazione commerciale (Geomarketing) nella città di Reggio Calabria*, Tesi di laurea, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Svizzera, 1999.
- [6] **Vargas L.**, *Reciprocal matrices with random coefficients*, J. Math. Modelling, volume, 1982.
- [7] **Saaty T. L.**, *Axiomatic faudation of the analytic hierarchy process*, Mgmt Sci, volume 32, n° 7, Great Britain, 1986.