

Diss.ETH Nr. 17975

**MODELLI GIS E VISUALIZZAZIONE
DI PROCESSI DINAMICI PER RETI DI TRAFFICO**

Dissertazione presentata al
POLITECNICO FEDERALE DI ZURIGO
per il conseguimento del titolo di
DOTTORE IN SCIENZE

da

CLAUDIA DOLCI

Master in Scienze Geoinformatiche, Università di Wageningen (NL)

nata il 30 settembre 1972

cittadina italiana

Accettata su proposta di

Prof. Dr. Alessandro Carosio, ETH Zürich, Relatore

Prof. Dr. Kay Axhausen, ETH Zürich, Correlatore

Prof. Dr. Luigi Mussio, Politecnico di Milano, Correlatore

2008

Al mio amato Riccardo e alla mia dolce Beatrice,

le ali della mia vita

Indice della tesi

| | |
|--|-----------|
| Introduzione | 1 |
| Zusammenfassung | 5 |
| Abstract | 9 |
| Capitolo primo: IL SETTORE DEI TRASPORTI IN SVIZZERA | |
| Il settore dei trasporti e la situazione del traffico in Svizzera | 2 |
| Premessa | 2 |
| La domanda di trasporto: ieri e oggi a confronto | 2 |
| Scenari di evoluzione | 7 |
| Chi si occupa di traffico in Svizzera? | 8 |
| Inventario dei geodati esistenti riguardanti il settore dei trasporti | 9 |
| Banca dati Swisstopo | 12 |
| Banca dati STRADA-DB (ASTRA) | 13 |
| MicroDrive (MicroGIS SA) | 13 |
| Banca dati TeleAtlas | 13 |
| Banca dati NavTech | 13 |
| Bibliografia | 14 |
| Capitolo secondo: I GIS E LE APPLICAZIONI NEL SETTORE DEI TRASPORTI | |
| Utilizzo dei GIS nel settore dei trasporti | 2 |
| Definizione di GIS | 2 |
| GIS-T | 4 |
| La delimitazione dell'area di studio e la zonizzazione | 7 |
| Il modello dei dati relativo all'offerta di trasporto | 9 |
| Modello arco-nodo | 11 |
| LRS e la segmentazione dinamica | 14 |
| Alcuni esempi di modelli di offerta | 17 |
| La definizione delle componenti della domanda di mobilità | 18 |
| L'analisi dei dati | 20 |
| Interrogazioni | 20 |
| <i>Overlay</i> | 22 |
| <i>Overlay</i> per tabelle di eventi | 22 |
| <i>Spatial Join</i> | 23 |
| <i>Geocoding</i> | 25 |
| Ricerca del percorso minimo (<i>Shortest path and routing</i>) | 26 |
| Matrici origine/destinazione | 27 |
| Connettività della rete | 28 |
| Visualizzazione dell'informazione | 28 |
| Conclusioni | 29 |
| Bibliografia | 30 |

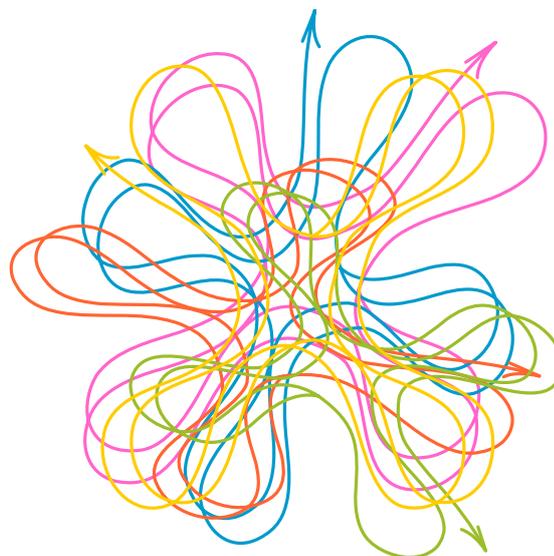
| | |
|---|-----------|
| Capitolo terzo: VISUALIZZAZIONE E ANALISI DELLA MOBILITÀ GIORNALIERA | |
| La modellizzazione trasportistica | 2 |
| La simulazione | 2 |
| La stima della domanda di trasporto, alcuni approcci modellistici | 3 |
| Software di simulazione | 6 |
| Tipi di dati utilizzati | 7 |
| Utilizzo del microsimulatore MATSim-T | 8 |
| Descrizione tecnica | 8 |
| Il sistema di offerta | 10 |
| I dati sulla popolazione e i piani delle attività giornaliere | 11 |
| La tabella eventi | 13 |
| I GIS come strumento di visualizzazione e di analisi della mobilità | 16 |
| Finalità dell'analisi post-simulazione | 16 |
| Costruzione del modello logico | 17 |
| Distribuzione del volume dei flussi di traffico | 18 |
| L'analisi a ragnatela (<i>spider analysis</i>) | 21 |
| Distribuzione geografica delle attività | 22 |
| Confronto con dati reali | 23 |
| Elaborazione del prototipo | 24 |
| Conclusioni | 25 |
| Bibliografia | 26 |
| | |
| Capitolo quarto: AGGIORNAMENTO IN TEMPO REALE DEI FLUSSI DI TRAFFICO | |
| L'infomobilità e il controllo delle rotte | 2 |
| Impatto sui flussi di traffico della rete stradale | 3 |
| Fonti di dati utilizzate per l'applicazione | 6 |
| Rete stradale | 6 |
| Informazione sul traffico e metodologia TMC | 8 |
| Architettura dell'applicazione: alcuni aspetti tecnici | 10 |
| Decodifica del messaggio di Viasuisse | 11 |
| Localizzazione del disagio e aggiornamento della rete | 12 |
| Attualizzazione della rete stradale | 14 |
| <i>Routing</i> e internet | 15 |
| Risultati | 16 |
| Conclusioni | 17 |
| Bibliografia | 18 |

| | |
|---|-----------|
| Capitolo quinto: LE CARTE DEL TEMPO | |
| La relazione spazio-tempo in cartografia | 2 |
| Visualizzare per creare conoscenza | 2 |
| Evoluzione storica | 3 |
| Le carte del tempo | 7 |
| Anamorfosi e cartogrammi | 7 |
| Soluzioni matematiche più recenti | 10 |
| Riflessioni sulle carte del tempo | 11 |
| La soluzione con il metodo dei minimi quadrati | 12 |
| Correzioni aggiuntive | 14 |
| Realizzazione delle carte del tempo | 16 |
| Utilizzo di LTOP | 16 |
| Realizzazione in ArcGIS | 16 |
| Dati storici impiegati | 19 |
| Risultati e commenti | 20 |
| Conclusioni e possibili sviluppi | 21 |
| Bibliografia | 22 |

Conclusioni

Curriculum vitae

Ringraziamenti



introduzione

MODELLI GIS E VISUALIZZAZIONE DI PROCESSI DINAMICI PER RETI DI TRAFFICO

Negli ultimi decenni la mobilità e il traffico sono diventati temi di grande attualità. In Svizzera, come in tutta la Comunità Europea, la capacità della rete stradale è giunta in alcuni punti ai suoi limiti e il rischio di congestione è sempre più tangibile e concreto, andando a ridurre fortemente la sicurezza e le prestazioni delle reti. Diventa pertanto prioritario e indispensabile analizzare il sistema di trasporto, al fine di trovare soluzioni adeguate per la sua pianificazione.

Pianificare significa analizzare la domanda di spostamento e strutturare l'offerta (infrastrutture e servizi) in modo da soddisfare le esigenze degli utenti. Gli interventi possono essere di natura diversa e appare evidente come alla continua domanda di spostamento non si possa rispondere unicamente con la costruzione di nuove infrastrutture. Il sistema dei trasporti necessita di un processo di ottimizzazione che contribuisca a fluidificare il traffico e a garantire una buona accessibilità. Questi risultati possono essere ottenuti oltre che con la costruzione di nuove infrastrutture, anche grazie alla modifica di quelle già esistenti, organizzando e sincronizzando l'offerta dei sistemi di trasporto pubblico o privato, fino alla definizione di tariffe e orari di esecuzione del servizio pubblico.



Ricordiamo che lo spostamento nasce dalla necessità degli individui di svolgere delle attività in luoghi variamente localizzati sul territorio (lavoro, studio, svago, ecc.) che, in genere, hanno locazione diversa dal luogo di origine. La domanda di spostamento si manifesta sotto forma di traffico e può essere formalmente definita come il numero di utenti con determinate caratteristiche che usufruisce del servizio offerto da un sistema di trasporto in un periodo di riferimento prefissato.

Come suggerito dalla definizione stessa, pur forse semplificando parzialmente il fenomeno, la domanda di spostamento e i conseguenti flussi di traffico sono contraddistinti per luogo di origine e di destinazione (caratterizzazione spaziale), per intervallo di tempo di riferimento (caratterizzazione temporale) e per motivi di spostamento, numero e classi di utenti (caratterizzazione socioeconomica).

I diversi aspetti legati all'analisi della domanda di spostamento e dei flussi di traffico hanno suggerito e determinato un approfondito esame delle possibili applicazioni e relativi vantaggi dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) nel settore dei trasporti. A tale proposito, ricordiamo come la tecnologia GIS sia in grado di integrare in un unico ambiente le più comuni operazioni legate all'uso di una banca dati (interrogazioni, analisi statistiche) con i benefici dell'analisi spaziale. Secondo Bartelme (2000), *“i GIS rappresentano una concezione logica in base alla quale il personale responsabile utilizza e organizza le componenti tecniche e metodologiche per gestire, analizzare e diffondere informazioni con riferimento spaziale”*.

Pur essendo la pianificazione dei sistemi di trasporto diventata un compito ormai tradizionale nell'ambito dell'ingegneria dei trasporti, negli ultimi anni la ricerca dedicata all'analisi di problemi legati al traffico ha continuato a svilupparsi in maniera notevole. Spesso però le grandissime quantità di dati prodotte mancano di uno strumento che ne permetta la gestione e la visualizzazione, aspetto che spesso riduce l'utilità di molte ricerche. In questo lavoro di tesi si è affrontato proprio questo argomento, andando a trattare i temi della modellizzazione e della visualizzazione dei dati, ritenendoli elementi preziosi per una corretta analisi e interpretazione dell'informazione.

Sono state analizzate alcune problematiche fondamentali riguardanti i flussi di traffico, in particolar modo l'aspetto dinamico-temporale del fenomeno. In questo contesto, i GIS sono stati proposti e utilizzati come strumento risolutivo, dimostrando ancora una volta la loro efficacia nell'analisi numerica, nella visualizzazione e nella capacità di combinare e di beneficiare di entrambi gli aspetti. Si è inoltre sviluppata nel corso del lavoro, la curiosità di conoscere di più e meglio gli strumenti utilizzati, sia dal punto di vista tecnico che delle possibili applicazioni.

Il lavoro di tesi è strutturato in cinque capitoli. I primi due sono principalmente descrittivi, mentre i restanti tre capitoli riportano alcuni esempi pratici, dove i GIS sono riusciti a portare il loro contributo per l'analisi e la visualizzazione dei dati riguardanti il traffico.

Per la parte applicativa della tesi è stato scelto il contesto svizzero. I motivi sono stati in parte suggeriti dalla collaborazione con l'Istituto di Pianificazione dei Trasporti del



Politecnico di Zurigo (IVT) e quindi dalla disponibilità dei dati da loro offerta. Un altro aspetto che ha favorito e suggerito la scelta è stato dettato dal fatto che il territorio svizzero con le sue infrastrutture e la sua orografia fornisce una rilevante rappresentatività del fenomeno traffico, oltre a un'ampia varietà di contesti (urbano, periurbano e interurbano). Queste caratteristiche fanno sì che le applicazioni sviluppate possano essere adottate anche per altre realtà geografiche.

Il primo capitolo presenta una panoramica sulla situazione attuale del traffico in Svizzera, delineandone le caratteristiche principali e identificandone le aree a maggiore concentrazione, allo scopo di poter inquadrare e contestualizzare le applicazioni sviluppate durante il lavoro.

Il secondo capitolo si propone di descrivere le caratteristiche e le componenti principali dei GIS con riferimento al settore dei trasporti, dalla modellizzazione dei dati alla descrizione delle funzioni di analisi, concentrandosi in particolar modo sulle tematiche trattate nei capitoli successivi.

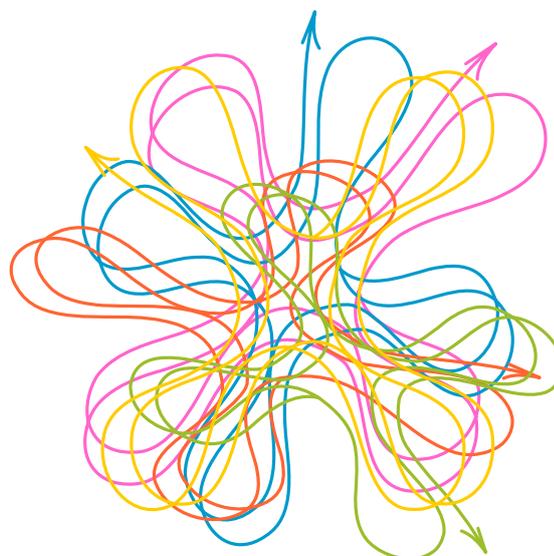
Nei successivi capitoli applicativi sono state opportunamente scelte tre tematiche atte a dimostrare il potenziale impiego dei GIS nel settore dei trasporti.

Nel terzo capitolo si sono approfonditi gli aspetti della modellizzazione dei dati e della visualizzazione delle informazioni riguardanti il traffico, illustrando alcuni metodi messi a punto per la visualizzazione statica e dinamica di dati riguardanti la mobilità giornaliera.

Nel quarto capitolo è proposta una panoramica dei servizi di infomobilità e si descrive un approccio di *routing* dinamico studiato per l'aggiornamento dei dati di traffico in tempo reale per la realtà svizzera.

Infine, il quinto capitolo presenta un'applicazione che consente la realizzazione delle cosiddette carte del tempo, discutendo la costruzione di una serie di carte prodotte per la Svizzera che documentano il "restringimento" del paese dal 1950 ad oggi. Si descrivono i dati utilizzati ed il modello matematico impiegato per il *rescaling* necessario.





Zusammenfassung

GIS MODELLIERUNG UND DARSTELLUNG VON DYNAMISCHEN PROZESSEN IN VERKEHRSNETZEN

In den letzten Jahrzehnten haben die Themen der Mobilität und des Verkehrs an Aktualität zugenommen. In der Schweiz, wie in ganz Europa, ist die Kapazität der Strassennetze an einigen Orten an ihrer Limite angekommen und dabei wurde das Risiko von Verstopfungen immer greifbarer und konkreter, so dass die Leistungen und die Sicherheit darunter leiden. Um angepasste Lösungen für die Planung der überfüllten Strassennetze zu finden, wird die Analyse der Transportsysteme unentbehrlich und eine prioritäre Aufgabe.

Planen bedeutet die Frage der Bewegungen zu analysieren und die Angebote (Infrastruktur und Dienstleistung) so zu strukturieren, dass sie den Anforderungen der Nutzer gerecht werden. Das Vorgehen kann verschiedenartig sein, doch ist es klar, dass die Lösung nicht nur auf dem Bau neuer Infrastruktur basiert. Transporte brauchen einen Optimierungsprozess, um einen Beitrag an einen flüssigeren Verkehr zu leisten und um eine gute Erreichbarkeit zu garantieren. Diese Resultate können nicht nur durch den Bau neuer Infrastrukturen erreicht werden, sondern auch dank den Änderungen der bereits Bestehenden, durch die Organisation und Synchronisation der Angebote des privaten und

■
■
■
■
■
öffentlichen Verkehrs, sowie auch durch die Festlegung der Tarife und der Fahrpläne des öffentlichen Verkehrs.

Die Bewegungen der einzelnen Individuen entwickeln sich aus der Notwendigkeit ihre Aktivitäten an anderen Orten auszuführen (Arbeit, Studium, Freizeit, usw.) als der Herkunftsort in der Regel liegt. Die Frage der Bewegungen offenbart sich somit in Form des Verkehrs und kann formal als Anzahl Verkehrsteilnehmer mit bestimmten Charakteristiken definiert werden, welche den vom Verkehrssystem angebotenen Service in einer vordefinierten Zeitspanne benutzen.

Wie die Definition aussagt, mit vielleicht teilweise vereinfachten Darstellungen, sind die Frage der Bewegungen und die daraus resultierenden Verkehrsflüsse charakterisiert durch den Herkunftsort und den Zielort (räumliche Charakteristik) durch die vorgegebenen Zeitintervalle (zeitliche Charakteristik) und durch die Gründe der Bewegungen, sowie durch die Anzahl und Klassen der Nutzer (sozioökonomische Charakteristik).

Die verschiedenen auf die Analyse bezogenen Aspekte der Frage der Bewegungen und der Verkehrsflüsse haben eine vertiefte Prüfung der möglichen Applikationen und den daraus folgenden Vorteilen von Geoinformationssystemen (GIS) im Transportsektor aufgezeigt. In diesem Zusammenhang erinnern wir uns, dass die GIS-Technologie fähig ist, einfache Prozeduren, welche an den Gebrauch einer Datenbank gebunden sind (Abfragen, statistische Analysen), mit den Stärken der räumlichen Analyse, in eine einzige Umgebung zu integrieren. Nach Bartelme (2000) verkörpern die Geoinformationssysteme ein logisches Konzept nach welchem das verantwortliche Personal die technischen und methodischen Komponenten anwendet und organisiert, um die räumlichen Informationen zu verwalten, zu analysieren und zu verbreiten.

Die Planung der Transportsysteme ist eine bereits traditionelle Aufgabe der Verkehrsingenieure, trotzdem haben die Forschungsaktivitäten im Bereich der Problemanalysen im Verkehr in den letzten Jahren bemerkenswert zugenommen. Jedoch fehlt für entstehende grosse Datenmengen oft ein Instrument das die Verwaltung und Visualisierung ermöglicht, ein Aspekt der die Forschung behindert. In dieser Dissertation wurde genau dieses Argument angegangen, die Themen der Modellierung und der Visualisierung der Daten wurden behandelt, weil man sie als wichtige Elemente für eine korrekte Analyse und Interpretation der Informationen betrachtet.

Es wurden einige grundlegende Problematiken welche die Verkehrsflüsse betreffen analysiert, vor allem der dynamisch-zeitlichen Aspekt des Phänomens. In diesem Zusammenhang wurden Geoinformationssysteme als Lösung vorgeschlagen und gebraucht. Somit wurde erneut ihre Effizienz, bei der numerischen Analyse, bei der Visualisierung und bei der Fähigkeit verschiedene Aspekte zu kombinieren, demonstriert.

Die Dissertation ist in fünf Kapitel strukturiert. Die ersten beiden sind vor allem beschreibend, während die folgenden drei Kapitel einige praktische Beispiele schildern, wo die Geoinformationssysteme einen Beitrag zur Analyse und Visualisierung der Verkehrsdaten leisten konnten.



Für den praktischen Teil der Dissertation wurde die Schweiz als Gebiet ausgewählt. Die Gründe dafür basieren auf der Zusammenarbeit mit dem Institut für Verkehrstechnik an der ETH Zürich (IVT) und aus der Möglichkeit ihre Daten zu nutzen. Ein anderer Aspekt der diese Wahl unterstützt ist durch die Eigenschaften der Schweiz (urbaner, periurbaner und interurbaner Kontext) mit ihrer Infrastruktur und ihrem Relief gegeben, welche für das „Phänomens Verkehr“ repräsentativ sind. Diese Charakteristiken machen, dass die entwickelten Verfahren auch in anderen geografischen Gebieten anwendbar sind.

Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die aktuelle Verkehrssituation in der Schweiz, beschreibt die wichtigsten Charakteristiken und zeigt die Zonen der höchsten Verkehrskonzentration auf, mit dem Zweck die während dieser Arbeit zu entwickelnden Anwendungen einzugrenzen und in einen Zusammenhang zu bringen.

Das zweite Kapitel beschreibt die Charakteristiken und die wichtigsten Komponenten der Geoinformationssysteme, von der Modellierung der Daten bis zur Funktion der Analyse, mit Bezug zum Verkehrsbereich und mit speziellem Augenmerk auf die Thematiken der folgenden Kapitel.

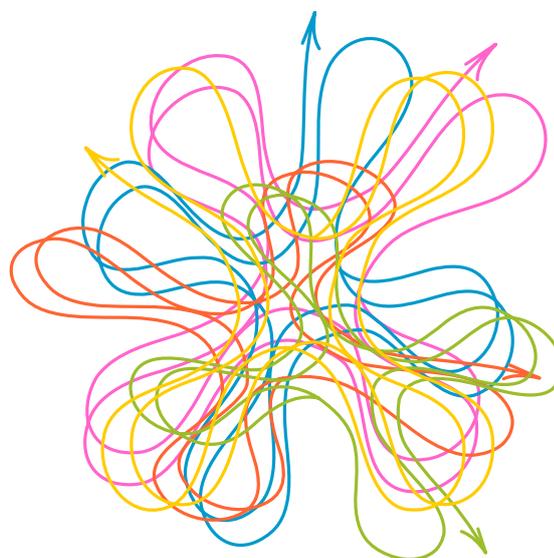
In den nachfolgenden Kapiteln wurden drei passende Themen gewählt, um das Potenzial des GIS im Verkehrsbereich aufzuzeigen.

Im dritten Kapitel wurden die Aspekte der Modellierung und Visualisierung der Verkehrsinformationen vertieft. Dabei wurden einige für die dynamische und statische Visualisierung entwickelte Methoden beschrieben, welche die tägliche Mobilität darstellen.

Im vierten Kapitel wird ein Überblick über die Verkehrsinformationsangebote gegeben und ein Ansatz über das dynamische „routing“ beschrieben, welches für die Aktualisierung in Echtzeit der Schweizer Daten entwickelt wurde.

Schlussendlich wird im fünften Kapitel ein Verfahren präsentiert, welches die Realisation der sogenannten Zeitkarten ermöglicht. Dabei wird eine Kartenserie für die Schweiz hergestellt, welche das „Zusammenrücken“ des Landes von 1950 bis heute darstellt. Auch werden die dafür gebrauchten Daten und das mathematische Modell für das nötige „rescaling“ beschrieben.





abstract

GIS MODELLING AND VISUALIZATION FOR DYNAMIC PROCESSES IN TRAFFIC NETWORKS

Over the last decades, mobility and traffic have become themes of great concern. In Switzerland, as throughout the European Community, the road capacity has reached in some points its limits. The risk of congestion is increasingly tangible and concrete, seriously affecting the security and performance of the road networks. It is therefore crucial to analyze the transport system in order to find appropriate solutions for its planning.

Planning means analyzing the demand of displacement and consequently structuring the offer (infrastructure and services) to meet the users' needs. The interventions may be different in nature and it might emerge, as demand continues to rise, that the construction of new infrastructure is not the only answer. The transport system needs an optimization process that contributes to fluidify traffic and ensures good accessibility. These results can be obtained, alongside the construction of new infrastructure, thanks to the improvement of existing ones, by organizing and synchronizing the offer of public and private transport systems, and/or through the definition of tariffs and timetables to be implemented in the public service.

It is important to recall that travelling stems from the need of individuals to carry out activities in places located differently in the territory (work, study, entertainment, etc.),

-
-
-
-
-

and situated other than in the place of origin. The need of displacement occurs in the form of traffic and can be formally defined as the number of users, with certain characteristics, utilizing the service offered by a transport system in a prefixed referenced period of time.

As suggested by the definition itself, while simplifying partially the phenomenon, the demand for displacement and the subsequent traffic flows are characterized by the place of origin and destination (spatial peculiarity), by time interval reference (temporal peculiarity), displacement reasons and by the number and classes of users (socio-economic characterization).

The various aspects related to the demand of displacement and traffic flows have suggested and determined a thorough analysis of potential applications and related benefits of Geographic Information Systems (GIS) in the sector of transport. In this context, we recall how GIS technology is able to combine in a single environment, the most common operations related to the use of a database (questions, statistical analysis) with the benefits of spatial analysis. According to Bartelme (2000), *“GIS are a logical concept based on which the responsible staff uses and organizes the technical and methodological components to manage, analyse and disseminate information with spatial reference”*.

Although planning transport systems is a traditional task related to transport engineering, in recent years many research issues related to traffic have constantly to develop at a rapid pace. However, the enormous amount of data produced and the lack of an instrument which allows the management and the visualization, often reduces the usefulness of many studies. In this thesis work this topic was addressed, by dealing with issues as modelling and visualization of data, and by considering them valuable elements for a proper analysis and interpretation of the information.

Some key issues concerning traffic flows were analyzed, focusing on the temporal-dynamic aspect of the phenomenon. In this context, GIS have been proposed and used as a problem-solving tool, demonstrating once again their effectiveness in numerical analysis, in visualization and their ability to combine and to benefit from both aspects. During the work, the interest to better understand the used tools was further developed, both from a technical point of view and through their use in potential applications.

The thesis work is divided into five chapters. The first two are mainly descriptive, while the remaining three chapters show some practical examples where GIS have been able to bring their contribution to the analysis and visualization of traffic flow data.

For the application part of the thesis the Swiss context was chosen. The reasons were partly due to the collaboration with the Institute of Transport Planning of the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (IVT) and partly to the data availability offered. Another aspect that has encouraged and suggested this option was the fact that the Swiss territory, with its infrastructure and its orography, provides a significant representation of the traffic phenomenon, as well as a wide variety of contexts (urban, sub-urban and inter-



urban). These features mean that the applications developed in this frame can be adopted in other geographical contexts.

The first chapter presents an overview of the current traffic situation in Switzerland, defining its main characteristics and identifying the areas of greatest concentration in order to frame and contextualize the applications developed in this work.

The second chapter describes the characteristics and main components of a GIS referencing to the transports sector, as data modelling and the description of data analysis functions, focusing on the theme explored in the remaining chapters.

In the following application-focused chapters three issues, likely to demonstrate the potential use of GIS in the transport sector, have been chosen.

Chapter three takes a closer look to the data modelling and data visualization aspects of information concerning traffic flow, illustrating some methods developed to visualize static and dynamic data related to daily mobility.

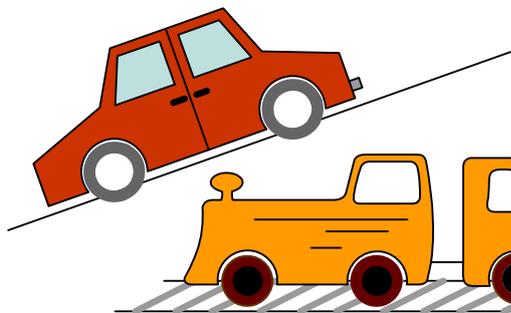
Chapter four carries out an overview on infomobility services, describing a dynamic routing approach designed to update traffic data in real time for the Swiss reality.

Finally, chapter five presents an application developed to create so-called time maps, discussing the construction of a series of maps produced for Switzerland which testimony/document the “shrinkage” of the country from 1950 to today. The data and the mathematical model used for the rescaling are described therein.



*capitolo*primo

IL SETTORE DEI TRASPORTI IN SVIZZERA



Questo capitolo offre una panoramica sulla situazione attuale del traffico in Svizzera, delineandone le caratteristiche principali e identificandone le aree a maggiore concentrazione.

Sono inoltre descritti i dati disponibili su territorio nazionale riguardanti le reti di trasporto, analizzando principalmente la rete stradale.



Il settore dei trasporti e la situazione del traffico in Svizzera

Premessa

Il termine **trasporto**¹ indica il movimento di persone e di merci da un luogo a un altro. I **sistemi di trasporto** sono sistemi complessi, costituiti da un insieme di elementi che concorrono a fornire opportunità di trasporto per soddisfare la domanda di spostamento di persone e merci espressa da un territorio (Cascetta, 2001). In questo lavoro di tesi si è esaminato unicamente il trasporto di persone, non considerando quello delle merci e le problematiche a esso connesse.

In generale, si può asserire che un sistema di trasporto è composto di due sottosistemi: il sistema della domanda e quello dell'offerta.

Il **sistema della domanda** è costituito dagli utenti del servizio (persone e/o merci) e dalle caratteristiche degli spostamenti che essi compiono (orario, destinazione, modalità, percorso, numero spostamenti). Il **sistema di offerta** è costituito dalle componenti sia fisiche che organizzative che consentono lo spostamento (infrastrutture e servizi). I due sottosistemi sono strettamente interrelati, in quanto le persone si muovono (domanda) per raggiungere una meta precisa, un luogo sia esso di lavoro di studio o di consumo, e si muovono con uno scopo preciso, determinato dalla distribuzione delle attività sul territorio. La motivazione dello spostamento incide sul percorso da seguire, sul tempo per effettuarlo e, quindi, sulle modalità di trasporto disponibili (offerta).

È evidente, come le diverse componenti del sistema interagiscano strettamente tra loro; la ripartizione modale dei flussi di domanda influenza e determina la riposta del sistema di offerta e viceversa.

Scopo di questo capitolo è quello di offrire una panoramica del sistema di trasporto in Svizzera, fornendo indicazioni sulla domanda e sull'offerta, per poter inquadrare e contestualizzare le applicazioni sviluppate in questo lavoro di tesi.

La domanda di trasporto: ieri e oggi a confronto

Proprio per la sua posizione geografica, la Svizzera è da sempre un crocevia importante, una via di passaggio strategicamente centrale che collega diverse regioni europee, permettendo il transito lungo l'asse est-ovest e quello nord-sud attraverso i passi alpini.

Negli ultimi decenni la Svizzera ha conosciuto un forte aumento della mobilità e del traffico. Tale crescita è attribuibile a una combinazione di fattori economici, sociali e territoriali, tra i quali l'aumento del reddito disponibile, lo sviluppo tecnologico,

¹ Origine: il termine trasporto dal latino “*trans*” (attraverso) e “*portare*”.

l'incremento del tasso di motorizzazione, l'internazionalizzazione e le ridotte barriere al commercio internazionale (Figura 1.1).

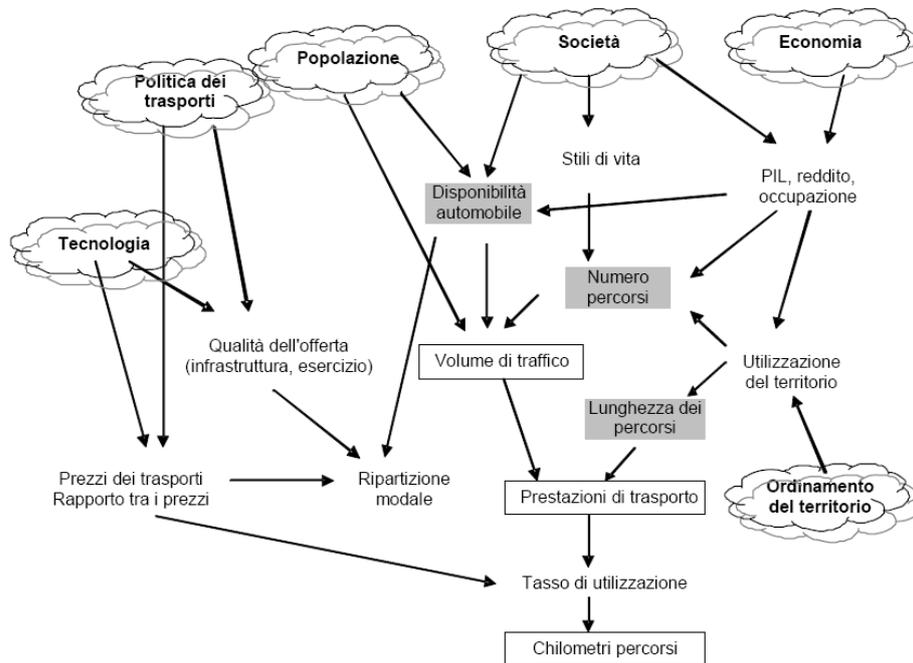


Figura 1.1: Meccanismi di interazione nell'evoluzione del traffico viaggiatori (ARE, 2006)

Sul territorio svizzero si contano 48 agglomerati urbani collegati da un efficiente sistema di trasporto. Zurigo, Ginevra e Basilea rappresentano i centri di maggiore rilievo internazionale, seguiti da Berna, Losanna, Winterthur, San Gallo e Lugano. Questa fitta rete di trasporti è completata infine da centri d'importanza regionale e centri turistici di media e piccola grandezza (Figura 1.2).

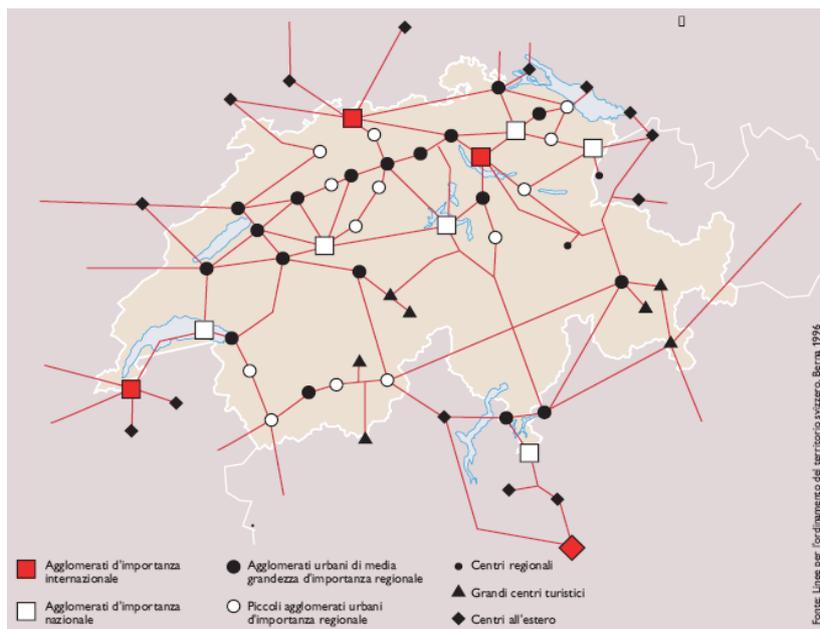


Figura 1.2: Linee per l'ordinamento del territorio Svizzero (UFPT, 1996)



Secondo uno studio condotto dall'Ufficio Federale di Statistica, un terzo delle superfici d'insediamento è destinato ai trasporti (Tabella 1.1). Nonostante i tentativi di riequilibrare e distribuire la domanda di trasporto tra le diverse modalità, il quadro attuale dei volumi di traffico conferma l'assoluta prevalenza del trasporto su strada.

| Quota delle superfici di trasporto sulle superfici d'insediamento | 32% | 1992/97 |
|---|-----------|---------|
| Strade nazionali | 1'756 km | 2005 |
| di cui autostrade | 1'358 km | 2005 |
| Strade cantonali | 18'094 km | 2005 |
| Strade comunali | 51'446 km | 1984 |
| Lunghezza della rete ferroviaria | 5'024 km | 2004 |

Tabella 1.1: L'infrastruttura dei trasporti (UST, 2007)

La maggiore densità di traffico² stradale si registra nelle città e negli agglomerati urbani dell'altipiano, sull'asse est-ovest, come pure nella Svizzera romanda, nella Svizzera centrale e nel Ticino meridionale (Figura 1.3).

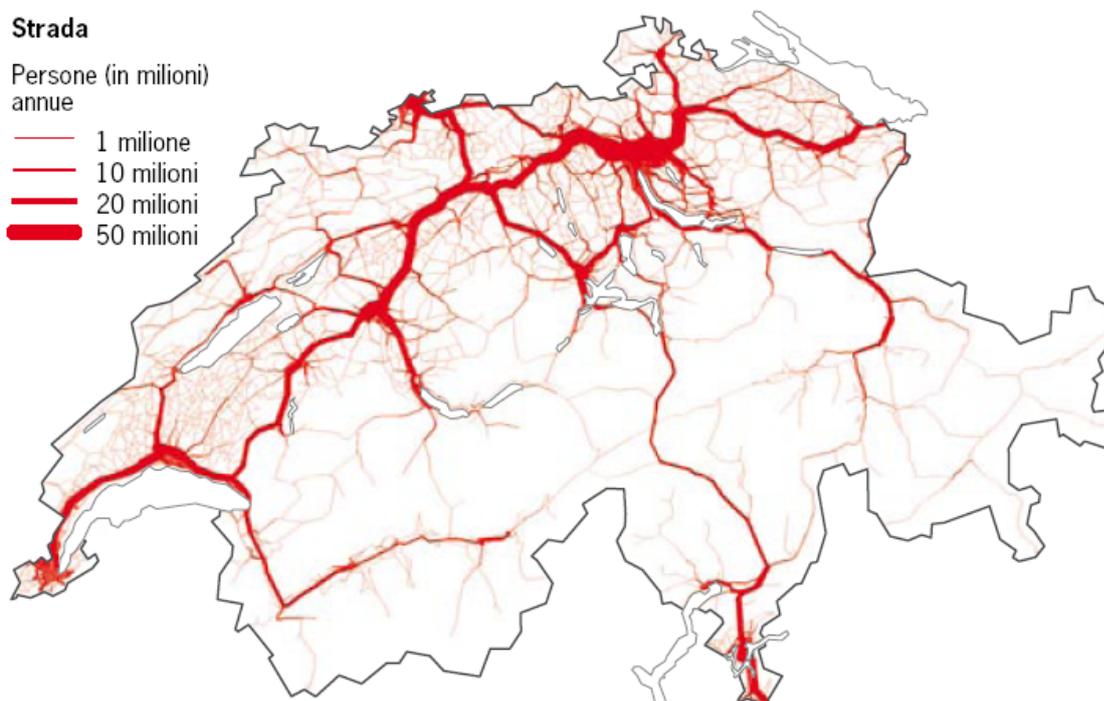


Figura 1.3: Correnti di traffico stradale viaggiatori nel 2000 (Fonti: INFOPLAN-ARE, Geostat-UST, swisstopo)

Per quanto riguarda il traffico ferroviario (Figura 1.4), anch'esso si concentra negli agglomerati dell'altipiano, sull'asse est-ovest e nell'arco lemanico, mentre è nettamente inferiore sull'asse nord-sud.

² Il carico del traffico ferroviario viaggiatori e del traffico stradale viaggiatori del 2000, a cui si fa riferimento nelle Figure 1.3 e 1.4, è stato calcolato grazie al modello nazionale bimodale del traffico viaggiatori su strada e su ferrovia sviluppato dall'ARE in collaborazione con il Politecnico federale di Zurigo, l'Ufficio federale dei trasporti (UFT) e l'Ufficio federale delle strade (USTRA).

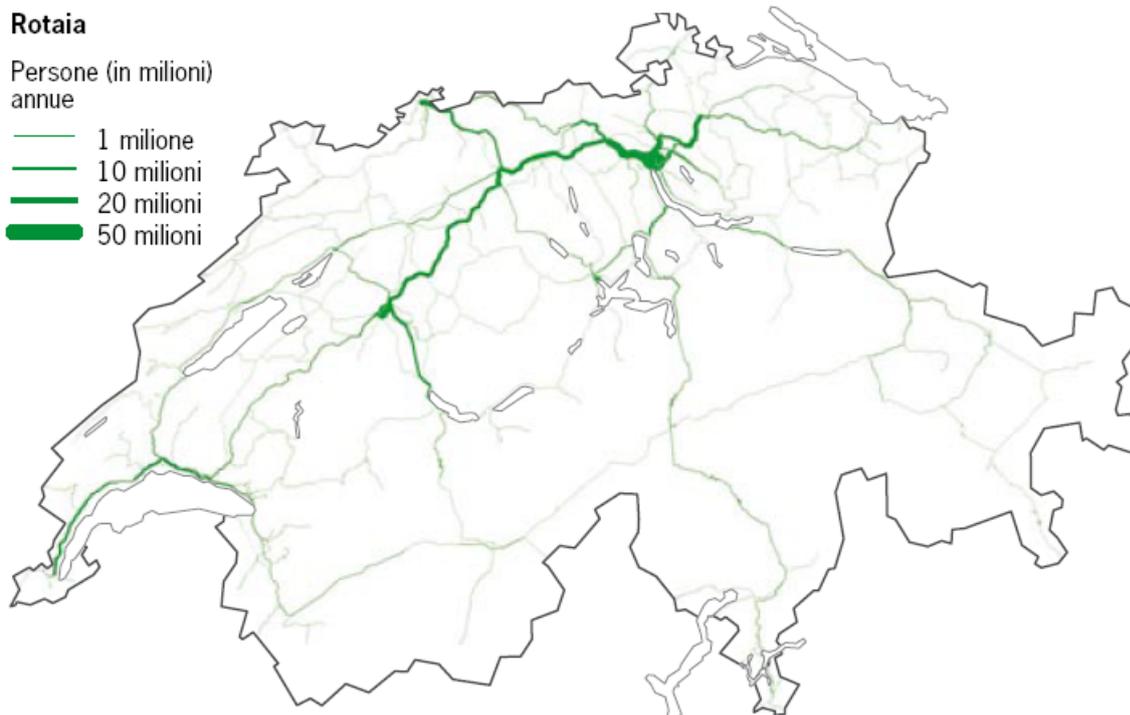


Figura 1.4: Correnti di traffico ferroviario viaggiatori nel 2000 (Fonti: INFOPLAN-ARE, Geostat-UST, swisstopo)

La domanda di trasporto oltre a un carattere spaziale, è caratterizzata anche da una dimensione temporale. La domanda di trasporto è, infatti, variabile nel tempo e la dinamica temporale può essere studiata su orizzonti temporali diversi. L'unità di tempo scelta dipende dallo scopo dell'analisi.

Se il periodo analizzato si limita a intervalli di poche ore fino a un massimo di 24 ore, l'unità di misura della domanda è di norma utenti/tempo. Nello specifico, il trasporto stradale individuale si misura in veicoli/ora, mentre quello ferroviario e stradale collettivo in passeggeri/ora.

Per contro, se si analizzano variazioni di lungo periodo, spesso si possono notare cambiamenti sostanziali del livello e della struttura della domanda stessa, dovuti principalmente ai cambiamenti strutturali nei parametri socio-economici e territoriali della realtà esaminata. L'unità di misura utilizzata in questo caso è il numero dei passeggeri moltiplicato per la lunghezza del viaggio espressa in km (passeggeri-km).

Tornando al caso della Svizzera, il grafico di Figura 1.5 mostra la variazione della domanda di trasporto riguardante le persone dal 1960 al 2000 e la relativa ripartizione modale del traffico. Si può notare, come negli ultimi 40 anni il traffico stradale privato sia aumentato di più del 30% (ASTRA, 2002). Nonostante le crescenti esigenze di mobilità, il trasporto pubblico ha perso costantemente quote di traffico a vantaggio del trasporto su strada, seppur abbia comunque incrementato le proprie prestazioni di trasporto. Fra il 1960 e il 1980, la quota dei trasporti pubblici nel traffico di persone complessivo (traffico motorizzato privato e trasporti pubblici) è passata dal 35 al 17%, raggiungendo negli anni

Ottanta il suo livello più basso. Da allora, ha fatto segnare una leggera ripresa, portandosi a circa il 20%.

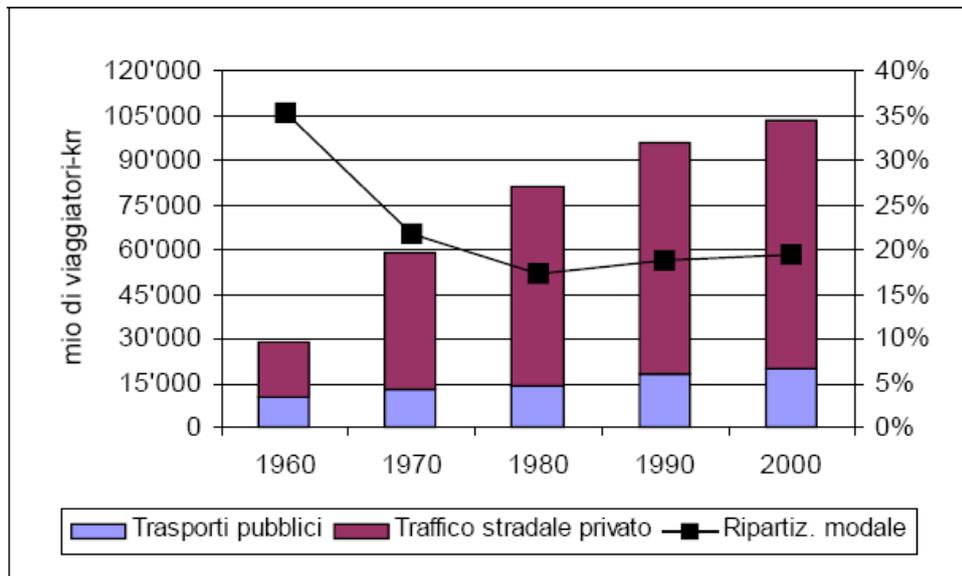


Figura 1.5: Ripartizione modale del traffico viaggiatori 1960-2000 (senza traffico aereo) (Fonte: Litra, ASTRA, 2002)

La distribuzione delle famiglie e delle attività sul territorio costituisce il fondamento della domanda di trasporto che deriva dalla necessità di utilizzare le diverse funzioni urbane in luoghi diversi. La continua crescita economica ha favorito la concentrazione di attività residenziali e produttive nelle zone attorno agli agglomerati che dispongono di buoni collegamenti con le maggiori aree urbane. Questo ha causato, insieme alla crescita del reddito, un incremento significativo della motorizzazione, aumentando il conflitto tra trasporto pubblico e privato, come illustrato nello schema proposto da Jaccard e Perret (Figura 1.6).



Figura 1.6: Interazioni e conflitti trasporto pubblico e privato (versione adattata da Jaccard e Perret, 1995)

Scenari di evoluzione

Dagli studi più recenti (*“Prospettive sull’evoluzione del traffico viaggiatori in Svizzera all’orizzonte 2030”, ARE 2006*) risulta che il volume di traffico continuerà ad aumentare anche nei prossimi 20 anni. Per l’elaborazione di tali prospettive sono stati concepiti diversi scenari, facendo variare i parametri socioeconomici e di politica dei trasporti.

| | Traffico Motorizzato Privato | Trasporto Pubblico | Traffico Lento [pedonale e ciclistico] | Totale |
|------------------------|------------------------------|--------------------|--|--------|
| Scenario di base | 19.5% | 45.2% | 13.9% | 23.7% |
| Scenario alternativo 1 | 18.7% | 77.9% | 18.1% | 28.9% |
| Scenario alternativo 2 | 18.7% | 21.7% | 13.1% | 19.0% |
| Scenario alternativo 3 | 3.3% | 61.0% | 39.1% | 14.9% |

Tabella 1.2: Crescita prestazioni di trasporto fra il 2000 e il 2030 (in % viaggiatori-km) (ARE, 2006)

Lo **scenario di base** si fonda sull’ipotesi che i principali sviluppi verificatisi nell’ultimo decennio proseguano linearmente.

Lo **scenario alternativo 1** « Rete urbana e crescita » si basa su una crescita economica nettamente superiore alla tendenza attuale, con una politica dei trasporti e di ordinamento del territorio di forte incentivazione, volta a realizzare una rete tra gli agglomerati.

Per contro, lo **scenario alternativo 2** «Dispersione e stagnazione» parte dal presupposto che la crescita economica risulti inferiore alla media e nel contempo non vi siano margini di manovra per la politica dei trasporti e di ordinamento del territorio.

Infine, lo **scenario alternativo 3** «Compensazione regionale e rarefazione delle risorse» è caratterizzato da un forte rialzo dei prezzi dell’energia a lungo termine e da una politica dei trasporti che cerca di giocare d’anticipo con l’introduzione di nuove tasse di incentivazione nel settore del trasporto su strada.

Come mostrato in Tabella 1.2, si pronosticano aumenti del traffico viaggiatori pubblico e privato tra il 15 e il 29%. Saranno soprattutto i trasporti pubblici a subire un aumento superiore alla media, compreso fra il 22 e il 78 per cento. Per contro, il traffico motorizzato privato aumenterà nel medesimo periodo in modo meno marcato. Considerando però la quota del traffico individuale motorizzato nella ripartizione modale, l’automobile continua a mantenere la sua posizione privilegiata (livello di prestazioni fornite quadruplo rispetto a quello dei trasporti pubblici).

Per quanto riguarda il trasporto ferroviario, l’aumento è previsto principalmente sui corridoi principali, ossia sui tragitti Zurigo-Berna, Zurigo-Basilea-Berna, Losanna-Ginevra, Zurigo-Zugo-Lucerna e Zurigo-Winterthur-San Gallo. Si attende una diminuzione per alcune regioni di montagna, del Giura e dell’Altipiano svizzero.



Chi si occupa di traffico in Svizzera?

Nei paragrafi precedenti è stato sottolineato l'aumento della mobilità e del traffico registrato negli ultimi decenni e la tendenza futura di tali fenomeni. Sulla base di tali prospettive e degli effetti che si prevede ne possano derivare, è necessaria una corretta pianificazione. Pianificare significa analizzare la domanda di spostamento e strutturare l'offerta dei servizi in modo da soddisfare le esigenze degli utenti, in altre parole, decidere la realizzazione di interventi concreti sul sistema di trasporto. Gli interventi possono essere di natura diversa, come la costruzione di nuove infrastrutture, la modifica delle esistenti, l'organizzazione dell'offerta dei sistemi di trasporto pubblico o privato, fino alla definizione delle tariffe e degli orari di esecuzione del servizio pubblico.

Ma chi si occupa concretamente di questi problemi? Chi è incaricato alla raccolta di dati, all'elaborazione di statistiche e degli scenari di evoluzione e alla coordinazione degli interventi previsti?

Secondo l'articolo 13 della legge federale del 22 giugno 1979 sulla pianificazione del territorio [LPT; RS 700], «la Confederazione elabora i fondamenti per poter adempiere i suoi compiti d'incidenza territoriale; essa definisce le concezioni e i piani settoriali necessari e li coordina tra loro. Essa collabora con i Cantoni e comunica loro per tempo le sue concezioni, i suoi piani settoriali e i suoi progetti edilizi».

Esistono in Svizzera diverse istituzioni e associazioni che si occupano di studi riguardanti il traffico e la mobilità. Prendendo in considerazione soprattutto le figure coinvolte in attività di ricerca e gestione di banche dati, si possono identificare tre principali categorie: federali, cantonali e private.

In ambito federale il Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC) è direttamente responsabile di tutte le problematiche legate ai trasporti e all'ambiente. Al suo interno troviamo diversi uffici con compiti specifici, tra i quali ricordiamo:

- L'Ufficio federale dei trasporti (UFT). Su mandato del Consiglio federale (misura n. 2.07.1 del "Programma di attuazione 2000–2003"), l'UFT elabora attualmente un piano settoriale ferrovia/trasporti pubblici.
- L'Ufficio federale delle strade (USTRA). Su mandato del Consiglio federale (misura n. 2.08.1 del "Programma di attuazione 2000–2003"), l'USTRA sta attualmente redigendo un piano settoriale delle strade che conterrà indicazioni sul completamento, sugli adeguamenti specifici e sul migliore sfruttamento della rete stradale superiore.
- L'Ufficio federale dello sviluppo territoriale (ARE) che si occupa di sviluppo territoriale, trasporti, sviluppo sostenibile e Convezione delle Alpi.

Un ruolo di forte stimolo e supporto alla ricerca è sicuramente svolto dai Politecnici federali, spesso chiamati come partner in molti progetti. Sempre a livello federale, un altro gruppo che opera nel settore è l'Ufficio federale di statistica (UFS).

Anche a livello privato, troviamo diverse associazioni importanti. Qui di seguito ne riportiamo le principali.

- L'Associazione Svizzera dei Trasporti Stradali (ASTAG).
- Il Servizio di Informazione per i Trasporti Pubblici (LITRA).
- L'Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS).
- Il Touring Club Svizzero (TCS) e l'Associazione Traffico e Ambiente (ATA).

A livello di impresa si ricordano, infine, le Ferrovie Federali Svizzere (FFS), la Ferrovia Retica e la BLS.

Inventario dei geodati esistenti riguardanti il settore dei trasporti

La complessità della tematica traffico fa sì che la sua analisi e gli studi atti alla sua pianificazione richiedano un alto numero di dati da utilizzare ed elaborare. Si tratta principalmente di informazioni riguardanti il territorio, il sistema dell'offerta (infrastrutture e servizi), e dati relativi alla domanda di mobilità (informazioni generali sul traffico, dati demografici, indagini comportamentali, conteggi statistici).

Ormai tutte le aziende e gli enti che amministrano grandi quantità di dati ricorrono all'uso di sistemi informativi e banche dati informatiche per la loro gestione. Questo consente di mettere a disposizione di un'utenza variegata dati di natura eterogenea che possono essere utilizzati e variamente combinati a seconda delle esigenze.

Per quanto riguarda i geodati (dati a riferimento spaziale), si impiegano sempre più spesso i GIS come strumento di supporto per la gestione e l'analisi. I GIS non sono di per sé una tecnologia nuova, tuttavia resta il fatto che solo di recente il progresso nella *performance* di hardware e software e l'abbattimento dei costi hanno reso possibile una vera diffusione di questi sistemi. La **Legge Federale sulla geoinformazione** (LGI, 2005), entrata in vigore il 1° luglio 2008, si è posta lo scopo di regolare l'utilizzazione di dati georeferenziati e delle nuove tecnologie e di regolare le procedure legate alla geoinformazione (il rilevamento dei dati, la modellizzazione e lo scambio dei geodati). La suddetta legge auspica la creazione di un'infrastruttura nazionale di geodati (INGD) che garantisca un accesso all'informazione più semplice e rapido. Mediante la sua realizzazione, si intende fare in modo che i geodati relativi al territorio svizzero, in gran parte già esistenti e gestiti in maniera decentralizzata, siano facilmente accessibili a tutti gli interessati e siano messi a disposizione per un'ampia utilizzazione, in forma duratura e aggiornata, nella qualità necessaria e a costi adeguati.

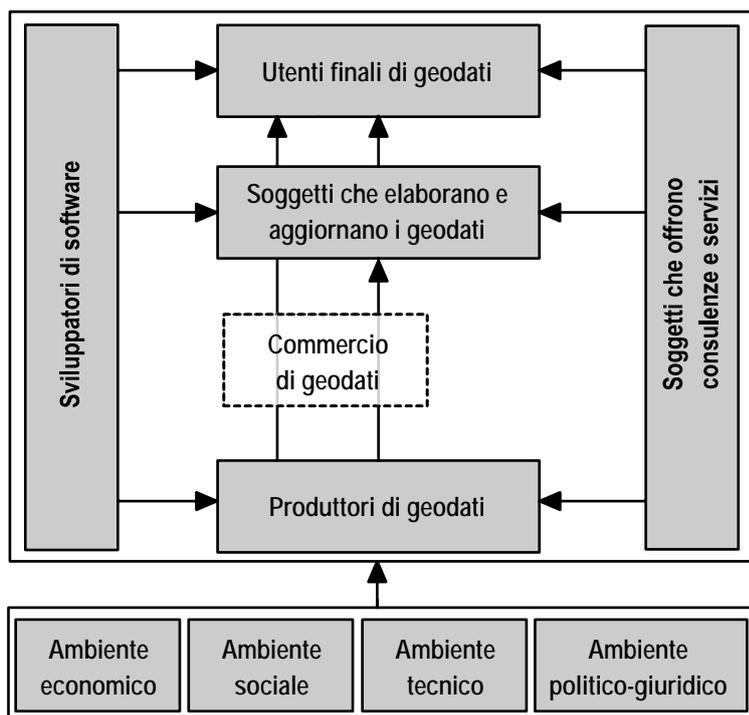


Figura 1.7: Schema riguardante la struttura del mercato dei geodati (KOGIS)/ INFRAS, 2002)

In Figura 1.7 è schematizzata la struttura del mercato relativo ai geodati, dove sono messe in evidenza le figure che vi partecipano, quali gli utenti, i produttori, gli sviluppatori di software e le figure che prestano servizi e consulenze.

Per quanto riguarda gli utilizzatori finali, si possono identificare cinque principali settori di applicazione: cartografia e misurazione (1), pianificazione (2), navigazione e logistica (3), marketing (4) e sistemi informativi (5). In Tabella 1.3 sono raggruppate le classi di utilizzatori di geodati, divisi per i settori di applicazione.

| Utilizzatori di geodati | Settori di applicazione |
|--|---|
| Amministrazione pubblica | cartografia e misurazione, pianificazione |
| Formazione e ricerca | pianificazione |
| Uffici di pianificazione | cartografia e misurazione, pianificazione |
| Trasporti, telecomunicazioni, rifornimento e smaltimento | logistica, marketing, pianificazione |
| Geoservizi e industria | pianificazione, logistica, marketing, sistemi informativi |
| Persone private e organizzazioni no-profit | navigazione, marketing, sistemi informativi |

Tabella 1.3: Classi di utilizzatori di geodati (KOGIS)/ INFRAS, 2002)

È importante notare come la Legge Federale sulla geoinformazione non incarica una singola istituzione della produzione di geodati, ma essa si propone come strumento di coordinazione e di raccolta di geodati, secondo determinati parametri di standardizzazione e procedure di uniformità. A tale proposito, ricordiamo che in Svizzera esistono diversi produttori di dati, anche se il produttore principale è rappresentato dal settore pubblico.

Se si considera poi il settore dei geodati, e in particolare dei geodati di base e di riferimento³, esso riveste quasi una posizione monopolistica.

Nella fattispecie, l'Ufficio Federale di Topografia (Swisstopo) oltre che a rivestire un ruolo di alta sorveglianza nella produzione di geodati e nella determinazione dei punti fissi della misurazione ufficiale, fornisce le carte topografiche e i dati vettoriali digitali di tutto il territorio svizzero fino alla scala 1:25'000. Esso produce inoltre foto aeree, ortofoto, immagini satellitari, modelli digitali del terreno (DHM25, RIMINI e DTM-AV) e di superficie (DOM).

L'altro organo rilevante nella produzione del settore pubblico è rappresentato dagli Uffici del Catasto, che partecipano alla produzione di geodati fornendo dati riguardanti la misurazione catastale e i piani generali (punti fissi, divisioni particellari, toponomastica, divisioni amministrative, canalizzazioni, ecc.).

Parallelamente a questi uffici, altre importanti fonti di dati sono rappresentate dai cantoni, dall'Ufficio federale di statistica (UFS) e dall'Ufficio federale dello sviluppo territoriale (ARE).

| Produttore di dati | Punti centrali | Esempi di geodati |
|---|--|--|
| Geodati di base e di riferimento | | |
| Ufficio Federale di Topografia | Carte topografiche digitali, foto aeree, ortofoto, immagini satellitari e modelli digitali del terreno | Carte digitali scala 1:25'000 fino 1:1Mio.; dati vettoriali scala 1:25'000 e 1:200'000; carta nazionale 1:1'000'000; modelli digitali del terreno (dhm25, RIMINI); punti fissi |
| Uffici del Catasto | Dati riguardanti la misurazione catastale, piani generali | Punti fissi; divisioni particellari; toponomastica; divisioni amministrative; canalizzazioni |
| Geodati tematici | | |
| UFS | | Statistica della superficie; Censimenti degli edifici e della popolazione; censimenti industria e servizi |
| ARE | | Reti stradali e ferroviarie; reti di distribuzione di servizi |
| Cantoni | | Piani direttori cantonali e piani di zona |

Tabella 1.4: Produttori nel settore pubblico di geodati inerenti al settore dei trasporti e traffico

Anche il settore privato è fortemente coinvolto nel mercato dei geodati, ma solo poche aziende producono realmente nuovi dati, e principalmente geodati complementari. Al contrario di quello pubblico, il settore privato si occupa in maggior misura di sviluppi di software, applicazioni e aggiornamenti o ottimizzazioni di banche dati. Se prendiamo in considerazione il settore dei trasporti, il fine sarà quello di poter integrare in maniera organica le informazioni relative al territorio e alle infrastrutture, nonché quello di produrre e mantenere costantemente aggiornate le banche dati relative a strade e ferrovie. In Tabella 1.5, sono riportate alcune delle principali ditte private che si occupano specificatamente di traffico e di reti stradali.

³ I geodati di base sono geodati fondati su un atto normativo federale, cantonale o comunale. I dati di riferimento sono un sottoinsieme di geodati di base che servono da base geometrica per ulteriori geodati. Essi comprendono essenzialmente dati della misurazione nazionale (compresi i dati delle carte nazionali) e della misurazione ufficiale, come pure dati fotografici, quali ortofoto e immagini aeree e satellitari.



| Produttore di dati | | | | | Esempi di geodati | |
|-------------------------------------|------------|-----------|--------------|--------------------------|-------------------|---|
| Geodati di base e di riferimento | | | | | | |
| | Produzione | Commercio | Elaborazione | Sviluppatori di software | Consulenza | |
| Tele Atlas (Schweiz) AG, Neuenhof | x | | | | | Reti stradali con diversi attributi (MultiNet) |
| GeoPOST, Bern | x | | | | | Indirizzi georeferenziati di tutti gli edifici |
| Geodati tematici | | | | | | |
| Hallwag Kümmerly&Frey AG, Schönbühl | x | | x | | | Carte turistiche e stradali (scala > 1:300'000) |
| MicroGIS SA, St. Sulpice | x | x | x | | x | MicroPost; MicroDrive |
| PTV Swiss AG, Bern | | | x | x | x | Navigazione e logistica |

Tabella 1.5 Alcuni produttori specializzati nel settore dei trasporti (versione adattata (KOGIS)/ INFRAS, 2002)

Qui di seguito, si riporta una breve descrizione delle principali banche dati utilizzate in Svizzera riguardanti le **reti di trasporto**, tralasciando le numerose altre banche dati relative al territorio (copertura del suolo, superfici e reti idrografiche, dati geologici, ecc.).

Banca dati Swisstopo

Come abbiamo già avuto modo di vedere, l'Ufficio Federale di Topografia produce la maggior parte dei geodati di base e di riferimento per il territorio svizzero. Per quanto riguarda le reti di trasporto, sono offerti dati vettoriali in scala 1:25'000 e 1:200'000. I geodati sono forniti in formato INTERLIS 1, ESRI *Shapefile* e ESRI ArcInfo (files .e00) e in formato AutoCAD (files .dxf), a dipendenza delle esigenze dell'utente.

STR25 – Questo *layer* si basa sulla cartografia della carta nazionale 1:25'000. Le strade in formato digitale formano una vera e propria rete viaria formata da archi e nodi, permettendo l'analisi delle reti principali. Ogni arco appartenente alle strade nazionali contiene l'attributo "Strada_id". Questo attributo corrisponde all'attributo "BaseID" della banca dati Strada-DB dell'ASTRA.

UVK25 – Questo *layer* include una lista supplementare di oggetti (per esempio ski-lift, traghetto, gru a cavo), non appartenenti né alla rete stradale e nemmeno a quella ferroviaria.

TRANSPORTATION – Questo *layer* si basa sulla cartografia della carta nazionale 1:200'000. In questo *layer* sono contenute tutte le categorie appartenenti alla rete di trasporto, quali strada, ferrovia, aeroporti, traghetti, ecc.

Banca dati Strada-DB (ASTRA)

Strada-DB (*Daten-Banken für STRAssen-DAten*) è una banca dati fornita dall'ASTRA, largamente utilizzata per il monitoraggio e la gestione delle pavimentazioni stradali cantonali.

MicroDrive (MicroGIS SA)

La banca dati MicroDrive contiene la rete stradale di tutto il territorio svizzero in scala 1:200'000 (20'000 archi e 15'000 nodi). Questo prodotto offre una banca dati precisa e aggiornata, spesso utilizzata come rete di base per diverse applicazioni e ricerche (ad es. Progetto COST 340).

Banca dati TeleAtlas

Il prodotto MultiNet contiene i grafi di tutte le strade urbane (scala nominale 1:2'000 / 1:5'000) ed extra-urbane (scala nominale 1:25'000), nodi stradali e punti di interesse, ecc. I geodati sono forniti con i formati più diffusi e sono ampiamente utilizzati per la pianificazione degli itinerari e/o la localizzazione di oggetti statici e in movimento.

Banca dati NavTech

La banca dati NavTech rappresenta la rete stradale a livello urbano ed extraurbano. Si tratta di una banca data perlopiù utilizzata per applicazioni in tempo reale e/o per i sistemi di navigazione assistita. Essa contiene, infatti, oltre agli attributi classici (classificazione strade, nome strada, numero strada, numeri civici), anche attributi fondamentali alla navigazione (barriere, sensi unici, limiti di velocità, restrizioni di manovra, segnali stradali ecc.) e numerosi punti di interesse.



Bibliografia

ARE (2006) Prospettive del traffico viaggiatori in Svizzera fino al 2030, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) e Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), BBL, Vertrieb Publikationen, Bern.

ASTRA (2002) Piano settoriale delle strade 2002 - Parte concettuale (parti I – IV e allegati), Bozza per la consultazione, Berne: Bundesamt für Strassen.

Cascetta, E. (2001) Transportation Systems Engineering: Theory and Methods, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Koordination der Geoinformation und geografischen Informationssysteme (KOGIS) / INFRAS (2002): Analyse Geodatenmarkt Schweiz. Schlussbericht. http://www.kogis.ch/docs/Tarifierung/Marktanalyse_Schlussbericht_d.pdf.

LGI (2005) Legge Federale sulla Geoinformazione.

Jaccard, P.A. e F.I., Perret (1995) Reconcilier le transport et la ville: quelle stratégie?, VDF, Zurich.

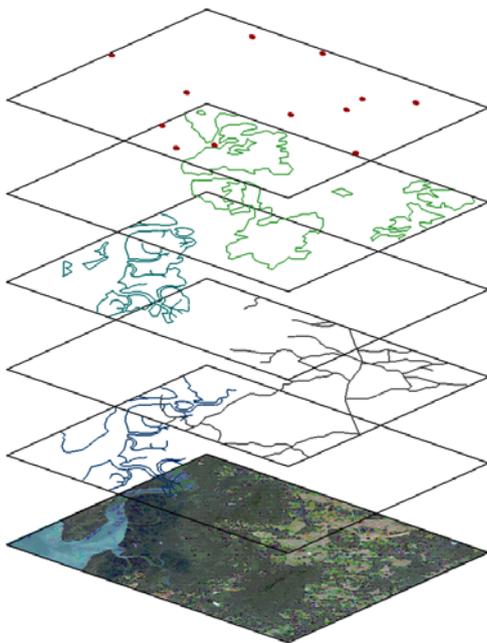
RS 700 Legge federale sulla pianificazione del territorio (LPT) del 22 giugno 1979 (Stato 13 giugno 2006).

Ufficio federale della formazione professionale e della tecnologia, UFPT (1996) Linee guida per l'ordinamento del territorio svizzero, Berna, UFPT.

Ufficio Federale di Statistica (2007) Mobilità e trasporti: Prontuario statistico 2007, Neuchâtel.

*capitolo*secondo

I GIS E LE APPLICAZIONI NEL SETTORE DEI TRASPORTI



Questo capitolo si propone di descrivere le caratteristiche e le componenti principali dei Sistemi Informativi Geografici (GIS) con riferimento al settore dei trasporti, dalla modellizzazione dei dati alla descrizione delle funzioni di analisi come strumenti di supporto decisionale.

Utilizzo dei GIS nel settore dei trasporti

Definizione di GIS

I Sistemi Informativi Geografici (GIS) sono strumenti in grado di gestire grandi quantità di dati e di offrire validi mezzi di analisi per la pianificazione e la gestione del territorio.

I GIS vanno ben oltre alla realizzazione di immagini cartografiche; spesso ne viene ridotto lo scopo, confondendone e limitandone la loro reale utilità.

In letteratura si possono trovare diverse definizioni, spesso associate agli scopi e alle funzionalità di questi sistemi. Qui di seguito se ne riportano alcune.

1. I GIS sono un sistema che può mantenere e usare dati che descrivono luoghi sulla superficie terrestre (Rhind, 1989).
2. I GIS sono costituiti da una serie di strumenti software per acquisire, memorizzare, estrarre, trasformare e visualizzare dati spaziali dal mondo reale (Burrough, 1986).
3. I GIS sono un sistema supportato da calcolatore che consiste di hardware e software, dati e applicazioni. Attraverso questi sistemi, i dati spaziali possono essere rilevati e restituiti in maniera digitale, memorizzati e riorganizzati, modellizzati e analizzati e anche presentati in forma alfanumerica e grafica (Bill, 1999).
4. I GIS rappresentano una concezione logica in base alla quale il personale responsabile utilizza e organizza le componenti tecniche e metodologiche per gestire, analizzare e diffondere informazioni con riferimento spaziale (Bartelme, 2000).

Sintetizzandole, possiamo definire i GIS come un sistema informativo computerizzato che permette l'acquisizione, la registrazione, l'analisi e la visualizzazione di informazioni derivanti da dati geografici (georeferenziati).

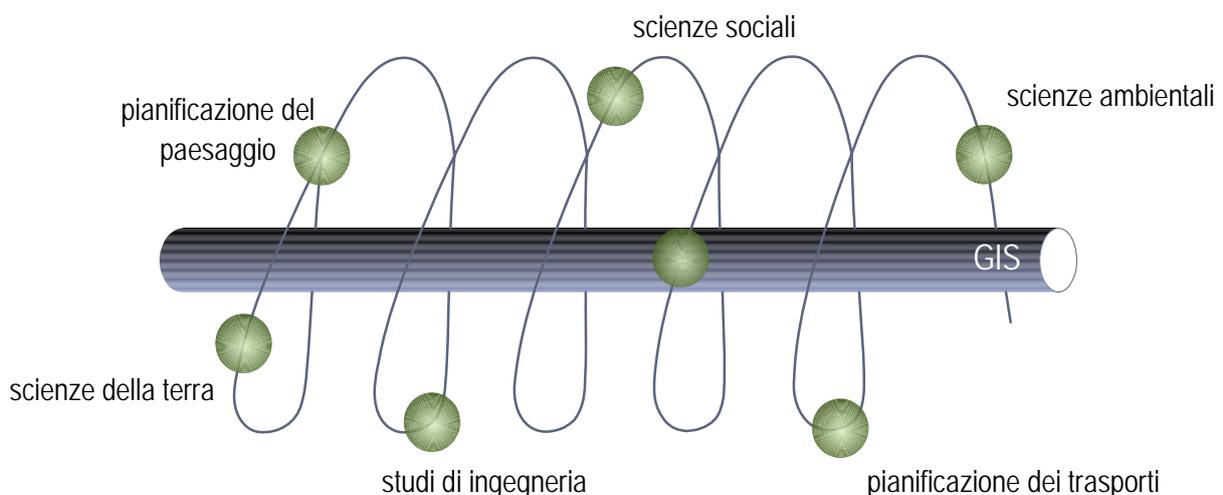


Figura 2.1: GIS come componente di studi interdisciplinari (versione adattata Pointet et al., 2004)

La varietà delle definizioni è legata sicuramente al numero delle diverse componenti strutturali, ma anche all'eterogeneità delle discipline che ne fanno sempre più uso. I GIS hanno, infatti, la capacità di collegare svariati settori che si occupano di gestione del territorio (scienze naturali e ambientali, scienze sociali, beni culturali, ecc.) e rappresentano sempre più spesso un elemento importante in molti studi multidisciplinari (Figura 2.1).

Qui di seguito sono elencate le principali caratteristiche che contraddistinguono i GIS:

- La capacità dei GIS di attribuire a ogni oggetto le sue coordinate geografiche spaziali, ossia georeferenziare i dati.
- La possibilità di associare informazioni alfanumeriche di vario tipo (informazione tematica) all'informazione geometrica dell'oggetto (nodi o punti, segmenti o linee, aree o poligoni). La geometria di un oggetto si suddivide in una componente metrica, che ne descrive la forma, la dimensione e la posizione geografica e una componente topologica, che descrive le relazioni spaziali tra gli oggetti (Figura 2.2).
- La possibilità di ottenere nuove informazioni a partire da dati già esistenti, aggregandoli oppure elaborandoli. Le funzioni di analisi spaziale permettono di mettere in relazione dati diversi tra loro, in modo da ottenere nuovi livelli di informazione¹.

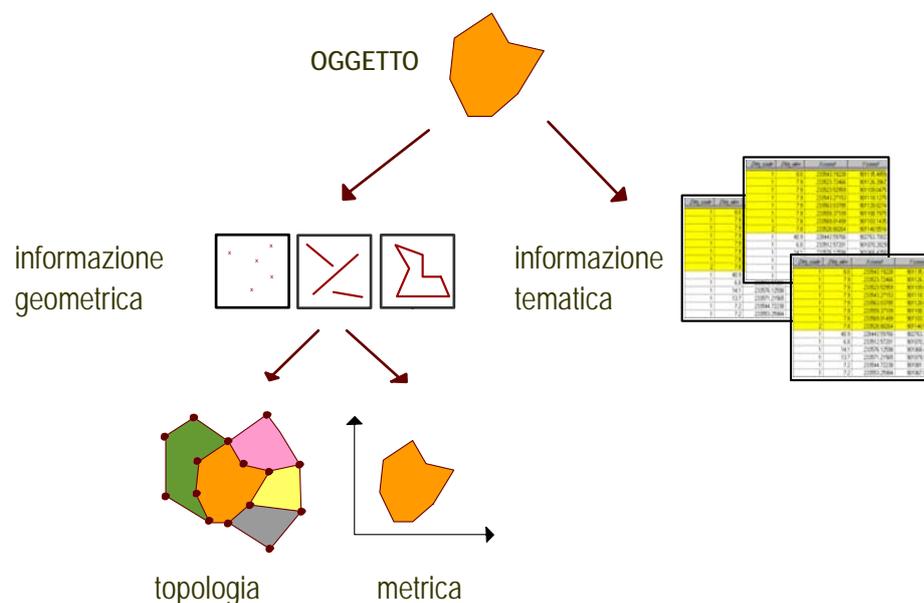


Figura 2.2: GIS come componente di studi interdisciplinari (versione adattata da Nocera, 1999)

Riassumendo, possiamo dire che la tecnologia GIS integra in un unico ambiente le più comuni operazioni legate all'uso di una banca dati (interrogazioni, analisi statistiche) con i benefici dell'analisi spaziale.

¹ In realtà, alcuni metodi di analisi spaziale venivano già applicati prima della nascita dei GIS e i primi studi sono sicuramente antecedenti all'avvento del computer.

■
■
■
■
■

Proprio l'integrazione tra informazione tematica e geometria distingue i GIS dagli altri sistemi di informazione e fa di essi un potente strumento per la gestione del territorio. Si ricorda, che fino all'introduzione dei GIS, la migliore fonte di informazione era la sola documentazione cartacea: le mappe da una parte e gli archivi contenenti le informazioni aggiuntive dall'altra. Oggi, grazie ai GIS, è possibile disporre di una rappresentazione grafica dell'informazione e consultare contemporaneamente la banca dati associata.

GIS-T

L'impiego dei GIS è diventata pratica sempre più diffusa anche nel settore dei trasporti, tanto da essere considerato uno tra i più importanti campi di applicazione (Waters, 1999). Nel settore dei trasporti esiste, infatti, l'esigenza di informazioni aggiornate e strutturate per la creazione e la gestione delle reti.

Agli inizi degli anni Novanta si è introdotto il termine inglese di "GIS-T", che sta propriamente a indicare l'uso dei GIS nel settore dei trasporti. Attualmente, i GIS-T costituiscono un **importante strumento informativo in grado di integrare le conoscenze acquisite nel campo della modellistica e della simulazione del traffico con le possibilità di gestione delle informazioni offerte dai sistemi di gestione relazionali dei dati**² (Bosetti, Maroni e Rinaldi, 2003). Tra le possibili alternative di architettura, il modello relazionale dei dati risulta essere ancora la soluzione più diffusa, anche se è forse opportuno specificare, che il modello relazionale non è prerogativa dei GIS-T, ma della maggior parte delle applicazioni GIS in generale³.

L'obiettivo principale dei GIS-T è quello di gestire e pianificare i sistemi e le reti di trasporto; qui di seguito se ne riportano, a titolo di esempio, alcune importanti applicazioni pratiche:

- l'analisi e la valutazione delle interazioni tra il sistema di trasporto e il territorio urbano (pianificazione territoriale);
- gli studi di impatto ambientale delle infrastrutture di trasporto e l'analisi dei costi sociali (traffico e ambiente);
- l'analisi dell'incidentalità e i piani di sicurezza stradale (sicurezza);
- i piani di protezione civile e di evacuazione (gestione emergenze);
- la dislocazione dei servizi (analisi di fattibilità);

² In un DBMS relazionale, i dati sono concettualmente memorizzati in tabelle e le informazioni sono strutturate in records e colonne. A ciascun elemento geometrico è associato un record nella banca dati che contiene tutti gli attributi dell'oggetto rappresentato.

³ I vantaggi dell'approccio relazionale e la disponibilità di software da parte di grandi case produttrici come Oracle, Ingres e DB2 hanno contribuito a una rapida adozione di questo modello per i DBMS nell'ambito dei GIS (Healey, 1991).

- i modelli di simulazione per lo studio della distribuzione dei flussi di traffico (simulazioni);
- i sistemi di navigazione assistita e i servizi di informazione aggiornata sullo stato del traffico (gestione del traffico e studi strategici).

Dueker e Ton (2000) hanno messo a punto una classificazione delle possibili applicazioni dei GIS-T, separando la pianificazione dall'operatività e la gestione dei servizi da quella del traffico di veicoli (Tabella 2.1).

Le attività di pianificazione, sempre secondo gli stessi autori, richiedono un grado di dettaglio relativamente basso, non avendo bisogno di aggiornamenti e previsioni regolari dell'informazione. Al contrario, per le operatività si necessita di dati in tempo reale e con un alto livello di accuratezza.

| | GESTIONE DEI SERVIZI | GESTIONE DEL TRAFFICO |
|-----------------------------|---|----------------------------------|
| PIANIFICAZIONE | | |
| Sistemi | Pianificazione dei trasporti | Logistica distributiva |
| Progetti | Analisi di impatto ambientale | Pianificazione dei servizi |
| OPERATIVITÀ | | |
| Programmazione | Analisi del traffico e della sicurezza stradale | Programmazione |
| Applicazioni in tempo reale | ITS (<i>Intelligent Transport Systems</i>) | Sistemi di navigazione assistita |

Tabella 2.1: Applicazioni dei GIS-T (da Dueker e Ton, 2000)

In letteratura, si possono evidenziare due diversi concetti di GIS-T. Da un lato, il settore dei trasporti è visto come soggetto sviluppatore di funzionalità GIS, mentre dall'altro, i GIS sono considerati uno strumento utilizzabile, tra i vari settori, anche in quello dei trasporti (Dueker e Ton, 2000).

In commercio, troviamo moduli software studiati specificatamente per la gestione del traffico (**software di simulazione del sistema di trasporto**⁴), dove si è cercato di migliorare alcuni aspetti propri dei GIS, quali la grafica e l'*editing* dei grafi stradali⁵. Allo tempo stesso, troviamo **software GIS** che presentano moduli specializzati per l'analisi e la modellistica delle reti di trasporto, rimanendo però strumenti adatti a un più ampio numero di applicazioni (Tabella 2.2).

Esistono inoltre, software che pur appartenendo principalmente a una delle due categorie contemplano la possibilità di svolgere anche funzioni dell'altra categoria. Di recente realizzazione, troviamo infine software che sono contemporaneamente GIS e software di simulazione. Ad esempio, il software di simulazione VISUM prodotto dalla PTV Vision, è in grado di interfacciarsi sia con ArcGIS che con MapInfo attraverso l'interfaccia *Shape-*

⁴ I principi della simulazione e i principali approcci utilizzati sono discussi nel terzo capitolo.

⁵ Tradizionalmente i software di simulazione operano su dati alfanumerici restituendo come output ancora dati alfanumerici.



Converter, un modulo che consente di convertire *shapefiles* in formati leggibili da VISUM.

| Software GIS | Modulo specializzato |
|--|---|
| ArcGIS (www.esri.com) | <i>Network Analyst</i> <i>Tracking Analyst</i> <i>Utility Network</i> |
| MapInfo (www.mapinfo.com) | <i>Routing J Server</i> |
| Geomedia (Intergraph) | <i>Transportation Analyst</i> |
| AutoCAD (www.autodesk.com) | <i>AutoCAD Map</i> |
| TransCAD, TransModeler (www.caliper.com) | |
| Software di simulazione | |
| Getram/ AIMSUN (www.tss-bcn.com) | |
| Visum, Vissim, Sitraffic (PTV Vision) | |
| Transims (www.ccs.lanl.gov/transims) | |
| MATSim (www.matsim.org, IVT, ETH Zurigo) | |

Tabella 2.2: Alcuni software GIS e di gestione del traffico

La gestione di un sistema di trasporto è caratterizzata da una serie di fasi fondamentali, schematizzate in Tabella 2.3. È possibile notare come per le prime fasi, dalla delimitazione dell'area di studio alla costruzione del modello dei dati, i GIS si rivelano essere lo strumento più idoneo alla loro realizzazione, mentre per le fasi propriamente di pianificazione i software di simulazione offrono ancora gli strumenti più appropriati.

| | Software GIS | Software di simulazione |
|---|--------------|-------------------------|
| La delimitazione dell'area di studio | ☺ | - |
| La suddivisione dell'area in zone di traffico (zonizzazione) | ☺ | - |
| La selezione delle infrastrutture e/o dei servizi di trasporto rilevanti per il problema in esame | ☺ | - |
| La costruzione del modello matematico dell'offerta di trasporto (rete) | ☺ | ☺ |
| La definizione delle componenti della domanda di mobilità | ☹ | ☺ |
| La definizione del modello di interazione domanda/offerta (modelli di assegnazione) | ☹ | ☺ |

Tabella 2.3: Considerazioni sui software riguardo alle fasi fondamentali della gestione del sistema di trasporto

La delimitazione dell'area di studio e la zonizzazione

Come evidenziato in Tabella 2.3, la gestione del sistema di trasporto non può prescindere dalla definizione del contesto geografico in cui lo spostamento avviene e dalla definizione delle zone tra cui esso si realizza.

Il contesto geografico usualmente è definito come area di studio che, a sua volta, può essere definita come quella porzione di territorio all'interno della quale si ritiene che si esauriscano la maggior parte degli effetti provocati da possibili interventi sul sistema dell'offerta di trasporto. La dimensione dell'area dipende da considerazioni qualitative, dalle finalità dello studio e dalle caratteristiche del territorio. Essa può quindi corrispondere a un'intera nazione o essere limitata a una singola area urbana. All'interno dell'area di studio possono idealmente iniziare e finire in qualunque punto tutti gli spostamenti (relazioni origine-destinazione) e il confine è di solito detto 'cordone' (Cascetta, 2001). Ciò che si trova al di fuori del cordone è l'ambiente esterno e di esso interessano esclusivamente le interconnessioni con l'area di studio. Per consentire la modellizzazione del sistema di trasporto, occorre discretizzare il territorio suddividendo l'area di studio in zone di traffico, zone fra le quali si svolgono gli spostamenti (Figura 2.3) (Cascetta, 2001). La cosiddetta zonizzazione è funzione del livello di dettaglio che si adotta per la modellizzazione del sistema di offerta e la successiva analisi del sistema.

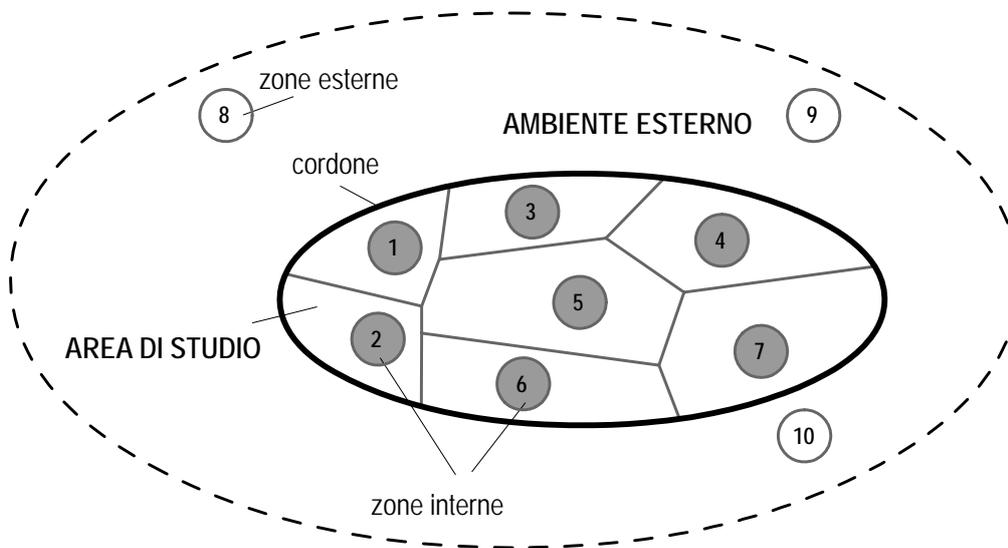


Figura 2.3: Delimitazione dell'area di studio (versione adattata Cascetta, 2001)

Per l'individuazione dei confini delle zone di traffico si possono usare diversi criteri. Si possono adottare separatori fisici (corsi d'acqua, spartiacque, ferrovie) oppure l'aggregazione può seguire criteri di omogeneità di utilizzo del territorio o di unità territoriali amministrative. Quest'ultimo criterio si rivela spesso molto utile per analisi statistiche e disponibilità di informazioni.

Si può far uso anche di un diverso dettaglio di zonizzazione per parti diverse dell'area di studio, in funzione della diversa precisione con cui si vuole analizzare il sistema (Cascetta, 2001).



Nel caso della Svizzera, spesso si adotta la zonizzazione in comuni, migliorata in prossimità dei grandi centri urbani con una ripartizione a livello di distretto cittadino (*Kreis*) e considerando zone a sé le aree aeroportuali (Figura 2.4).

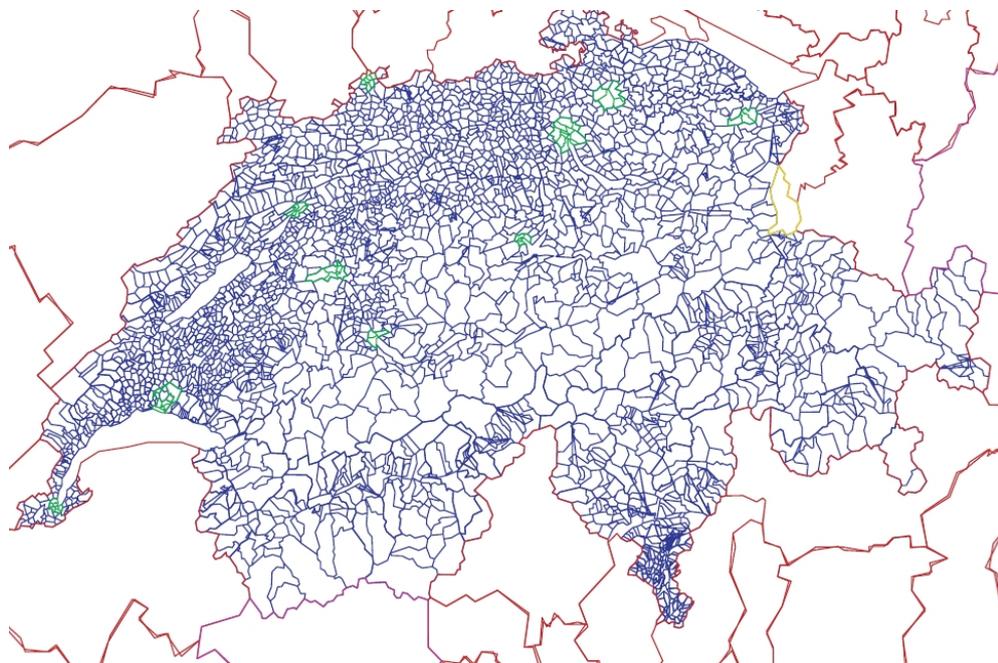


Figura 2.4: Zonizzazione in comuni (ARE, 2006)

In Figura 2.5, è riportata la ripartizione del territorio svizzero in NUTS (unità territoriali per la statistica) introdotta dall'agenzia europea Eurostat, nata al fine di fornire una ripartizione unica e uniforme del territorio europeo per le indagini statistiche.

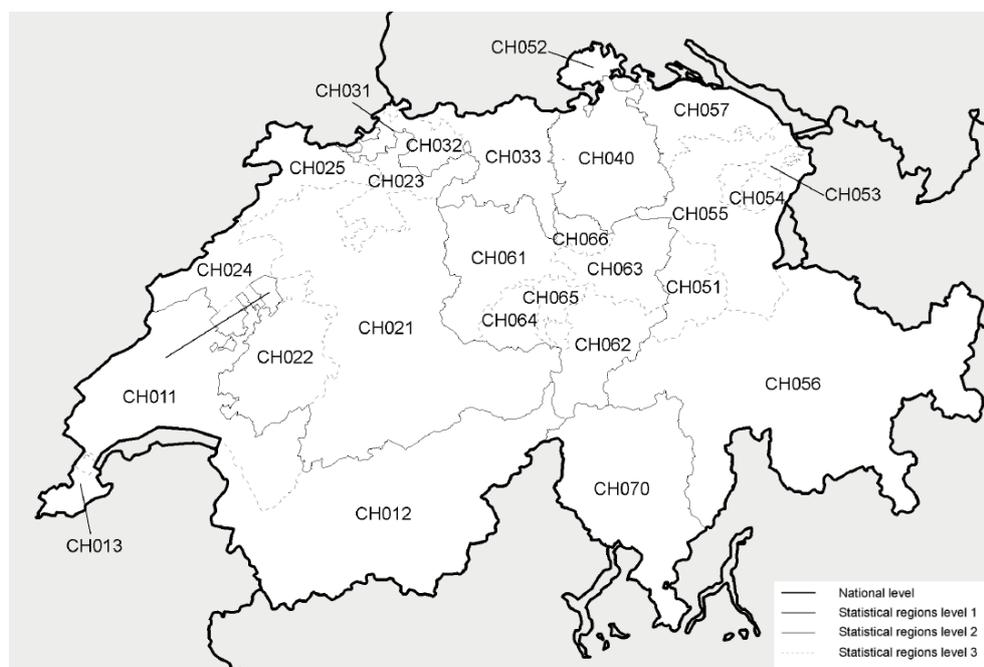


Figura 2.5: Zonizzazione in NUTS (unità territoriali per la statistica) (European Commission, 2008)

Il modello dei dati relativo all'offerta di trasporto

I GIS, indipendentemente dal settore di impiego, devono essere intesi principalmente come mezzo in grado di fornire un modello che descrive e astrae il mondo reale (Burrough, 1986). Essi offrono una semplificazione della **realtà** che è formulata in funzione della problematica, delle informazioni disponibili e delle elaborazioni che saranno effettuate (Date, 1995).

In una prima fase della modellizzazione, si separano le informazioni rilevanti da quelle superflue, scegliendo successivamente solo gli elementi più significativi. La scelta degli elementi da considerare è strettamente collegata alle finalità per le quali si costruisce il modello.

Nel caso specifico del sistema di trasporto, si tratterà di definire un modello che simuli il funzionamento del sistema di offerta costituito dalle componenti fisiche e organizzative finalizzate alla produzione dei servizi di trasporto in una determinata area. Si dovrà operare una selezione delle infrastrutture e dei servizi presenti nell'area di studio che svolgono una funzione rilevante di collegamento fra le diverse zone in cui è suddivisa l'area (**rete di base**). Solitamente, nel caso delle reti stradali, non tutte le infrastrutture svolgono una funzione di collegamento rilevante. Ad esempio, per analisi su scala nazionale molte delle strade interne alle singole città non sono prese in considerazione nel modello. Al contrario, per una rete su scala maggiore o per reti di servizi aerei o ferroviari si considerano, di norma, tutte le infrastrutture e i servizi. In base alla scala di lavoro, si dovrà inoltre scegliere un livello di dettaglio tale da permettere una conoscenza precisa e adeguata delle caratteristiche geometriche e funzionali dei diversi elementi. La rete di base dipende dalle finalità per le quali si costruisce il modello, dalla zonizzazione e dalle modalità di trasporto considerate, in altre parole se si considera un sistema mono- o multi-modale.

I dati sono dapprima descritti con linguaggio naturale in un **modello spaziale** e, successivamente, tradotti in un **modello concettuale**. Questa tappa della modellizzazione è completamente indipendente dal sistema informatico e avviene grazie a formalismi che descrivono la struttura dei dati (geometria, topologia, attributi e relazioni tra le diverse entità) in maniera univoca e consistente (ad esempio: ERM⁶, UML⁷ e Interlis⁸).

Successivamente, per integrare i dati in un GIS bisogna tradurre i risultati del modello concettuale in un **modello logico**. Il modello logico dei dati dipende dal tipo di software GIS utilizzato ed è rappresentato con un linguaggio di definizione dei dati proprio del

⁶ L'ERM (*Entity Relationship Model*) è una tecnica di rappresentazione grafica ampiamente utilizzata per rappresentare le diverse strutture dei dati.

⁷ UML (*Unified Modeling Language*, "linguaggio di modellazione unificato") è un linguaggio di modellizzazione e specifica basato sul paradigma *object-oriented*.

⁸ Interlis è un linguaggio di descrizione dei geodati. Esso permette l'elaborazione del modello e l'integrazione di geodati rendendo possibile lo scambio di dati fra sistemi di geoinformazione differenti. Interlis dal 1998 è divenuto una norma ufficiale svizzera prescritta per legge per lo scambio dei dati all'interno della misurazione ufficiale.



sistema scelto. Infine, il **modello fisico** descrive in dettaglio la memorizzazione dei dati all'interno del sistema informatico e definisce le modalità di accesso alle informazioni (Date, 1995).

In letteratura (Bill, 1999) (Reinhardt *et al.*, 2004), si fa spesso riferimento a questi cinque **livelli di astrazione**, chiamati anche livelli di generalizzazione o semplificazione: la realtà con i successivi quattro livelli, spaziale (o informale), concettuale, logico e fisico (Figura 2.6).

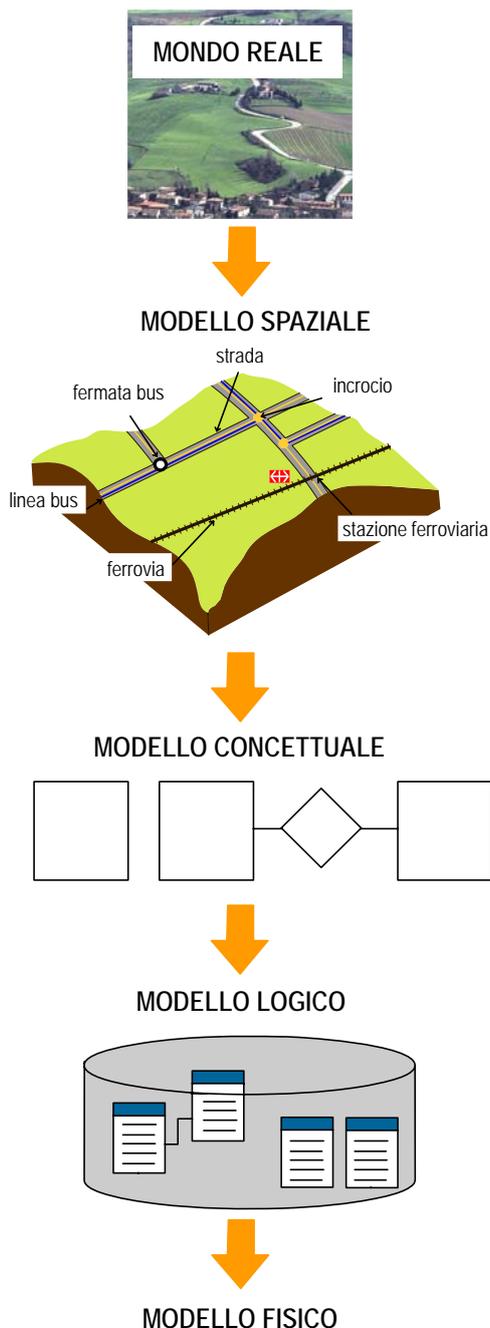


Figura 2.6: Livelli di astrazione per l'implementazione dei dati in ambiente GIS

Come facilmente deducibile dalla molteplicità delle possibili applicazioni dei GIS-T, è necessaria un'ampia varietà di informazioni. Per la gestione delle reti di base, esistono diversi approcci di modellizzazione e diversi studi sono stati fatti per ottenere soluzioni soddisfacenti.

Qui di seguito, sono presentati alcuni approcci utilizzati per la costruzione del modello concettuale dell'offerta (rete di base) impiegati nel settore dei trasporti: il modello arco-nodo, i sistemi di referenziazione lineare (LRS) e, infine, la segmentazione dinamica.

Modello arco-nodo

L'approccio classico adottato per rappresentare e gestire una rete è quello basato su un sistema di elementi topologicamente connessi tra loro tramite la struttura arco-nodo.

Simbolicamente un grafo G può essere indicato con $G = (V, L)$ dove $V = \{1, 2, 3, 4\}$ è l'insieme dei vertici e $L = \{\{1,2\}, \{2,3\}, \{1,4\}, \{4,3\}\}$ è l'insieme dei lati che collegano tali vertici. Si parla di "grafo pesato" o più semplicemente di "rete" se a ogni lato restano associati uno o più attributi numerici⁹ (Balakrishnan, 1997). Nel caso di una rete si parla più propriamente di nodi e archi, $G = (N, A)$. La rappresentazione tipica, e anche la più immediata, è quella grafica, dove ogni punto rappresenta un nodo e gli archi sono individuati dai segmenti tra le coppie di nodi (Figura 2.7).



Figura 2.7: Esempio di grafo stradale (elaborazione grafica di un particolare della Rete IVT, ETH Zurigo)

I grafi utilizzati per le reti di trasporto sono di norma orientati, ovvero gli archi hanno un verso di percorrenza. Ad esempio, un tratto di strada a senso unico è rappresentato da un solo arco, secondo il verso di percorrenza; una strada a doppio senso di marcia è rappresentata da due archi, caratterizzati ciascuno dal proprio senso di marcia. Ogni arco è

⁹ Un tipico esempio di peso associato a una rete è rappresentato dal tempo di percorrenza e/o altre caratteristiche riguardanti il trasferimento dal nodo iniziale a quello finale.



costituito da una coppia di coordinate d’inizio (nodo iniziale) e una coppia di coordinate finali (nodo finale). Nel caso di archi orientati, nella rappresentazione grafica, spesso è presente anche una freccia che indica il verso di orientamento.

Nel grafo caratteristico di una rete di trasporto, i **nodi** corrispondono a realtà fisiche territoriali; essi sono situati in corrispondenza delle intersezioni tra gli archi, ma possono essere localizzati anche in corrispondenza di variazioni significative delle caratteristiche geometriche e/o funzionali di un arco o in corrispondenza di punti strategici, quali aeroporti o stazioni. Gli **archi** rappresentano i collegamenti tra i diversi nodi e hanno caratteristiche geometriche, funzionali e prestazionali omogenee. Il grafo può essere realizzato con diversi gradi di accuratezza e precisione. Il numero di nodi dipende dal grado di dettaglio geometrico (generalizzazione) che si vuole raggiungere, dalla complessità dell’oggetto da rappresentare e chiaramente dei fini dell’analisi.

Il modello dei dati più tipicamente utilizzato per supportare la struttura arco-nodo è quello di tipo relazionale (Goodchild, 1998). In Figura 2.8, è illustrato un esempio di rappresentazione di un grafo e di fianco sono riportate le tabelle che caratterizzano il suddetto modello.

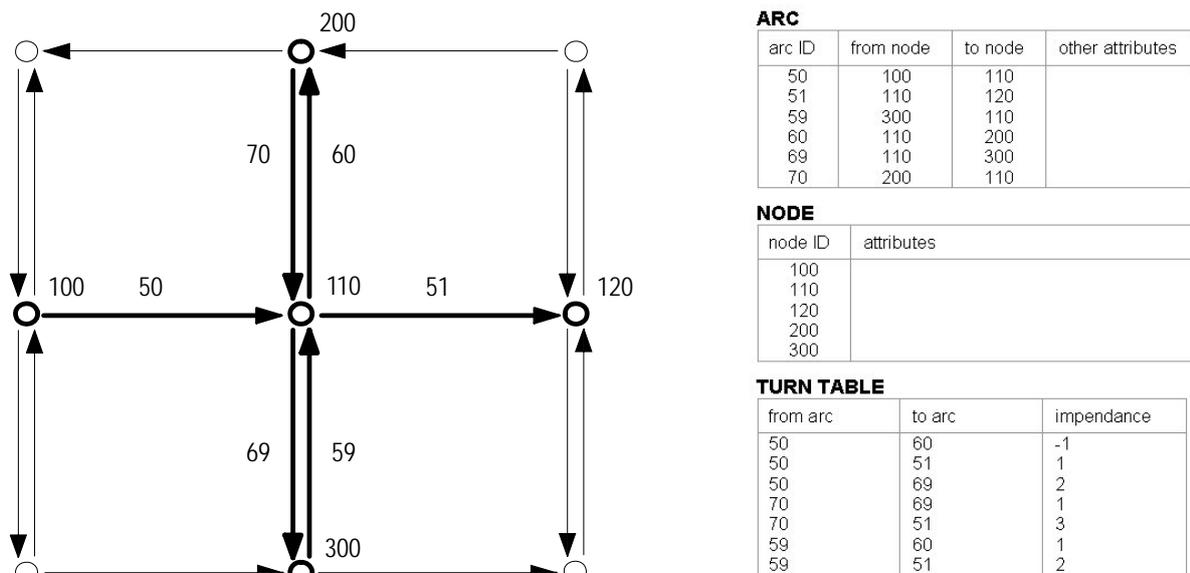


Figura 2.8: Modello relazionale dei dati per la struttura arco-nodo (versione adattata da Miller e Shaw, 2001)

Come si può notare, ogni arco della rete è identificato da una chiave primaria (*arc ID*) e da una coppia di coordinate che ne determinano la direzione (*from node; to node*). Normalmente, vi sono associate informazioni tematiche aggiuntive che permettono un’analisi del traffico più dettagliata, quali, ad esempio, la larghezza dell’arco, il tempo di percorrenza, la capacità, il numero di corsie, ecc. I nodi sono identificati a loro volta da una chiave primaria (*node ID*) e, a seconda delle necessità, da altri attributi (Miller e Shaw, 2001). Si ricorda che le intersezioni sono date dalla confluenza di più archi; per tale motivo, esse rivestono spesso un ruolo importante nel sistema di trasporto, in quanto possono rappresentare punti di conflitto e luoghi di congestione e/o incidenti.

Il modello arco-nodo risulta sicuramente molto utilizzato, pur presentando alcuni limiti.

Un primo limite riguarda la necessità di inserire un nodo a ogni intersezione, a garanzia della consistenza topologica della rete. Questo può creare problemi relativi all'eventuale presenza di incroci non reali fra gli archi (si pensi a sopra passi o sottopassaggi). Una soluzione si può raggiungere rinunciando in parte alla consistenza topologica (non è possibile discriminare tra svolte consentite e non) oppure aumentando il grado di dettaglio in prossimità di un'intersezione (Figura 2.9) e aggiungendo al modello una *turn-table*. Questa tabella definisce, per ogni coppia di archi collegati tramite un nodo, se sia possibile o meno il passaggio del flusso. Nel primo caso, si rischia di violare l'integrità dei dati, mentre la seconda soluzione risulta essere una modalità spesso inefficiente e complessa da realizzare (Miller e Shaw, 2001).

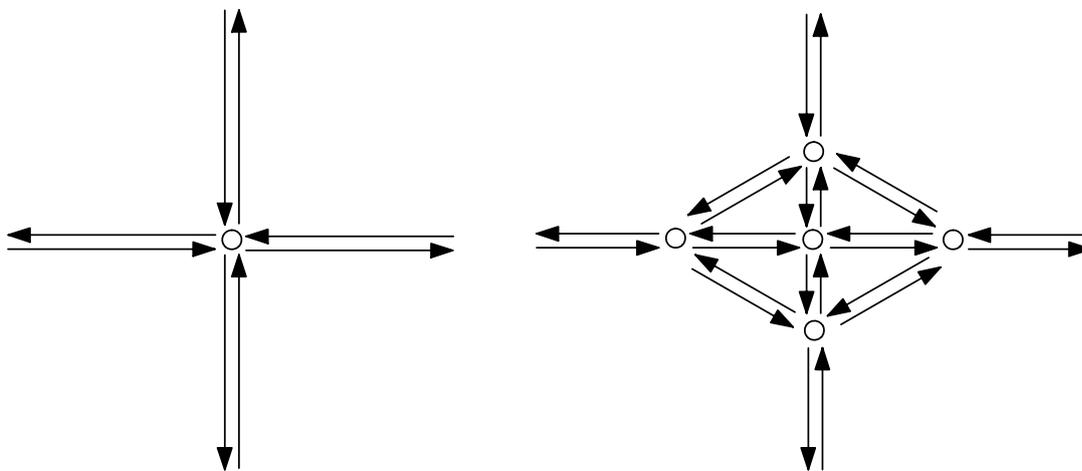


Figura 2.9: Intersezione con diverso grado di dettaglio (versione adattata da Miller e Shaw, 2001)

Un secondo problema, è dato dall'esigenza, dettata dal modello, di avere archi omogenei, contraddistinti cioè da caratteristiche uniformi (Goodchild, 1998). Questo vincolo riduce chiaramente le potenzialità del modello, basti pensare come esempio allo stato della pavimentazione stradale. La qualità del manto stradale può presentare un elevato grado di disuniformità lungo uno stesso segmento stradale, oltre che rappresentare un elemento che può variare di molto le sue caratteristiche nel tempo (Figura 2.10).

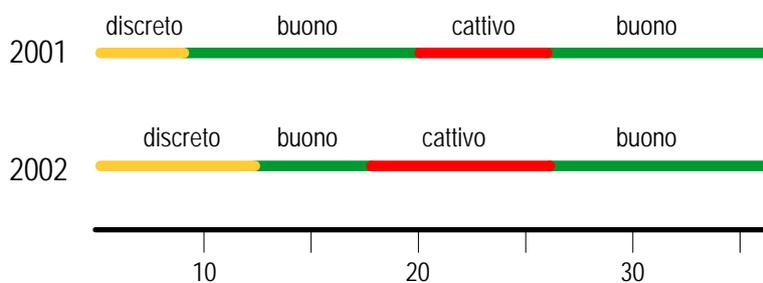


Figura 2.10: Cambiamenti della qualità della pavimentazione stradale nel tempo (ESRI, 2004)

Il terzo problema riguarda la difficoltà del modello topologico lineare standard di gestire relazioni m-m tra le diverse entità del modello (Miller e Shaw, 2001).



Come vedremo nel paragrafo successivo, la soluzione ai sopracitati problemi può essere offerta dai sistemi di referenziazione lineare e dalla segmentazione dinamica.

LRS e la segmentazione dinamica

I **sistemi di referenziazione lineare** (LRS) permettono di rappresentare e gestire in maniera estremamente efficace informazioni associabili a elementi geografici lineari, quali lo stato della pavimentazione, la frequenza degli incidenti, i limiti di velocità, ecc. (Miller e Shaw, 2001). Questo è reso possibile, in quanto, i LRS consentono di localizzare un evento tramite la sua distanza (progressiva metrica) da un punto fisso lungo un arco (Figura 2.11).

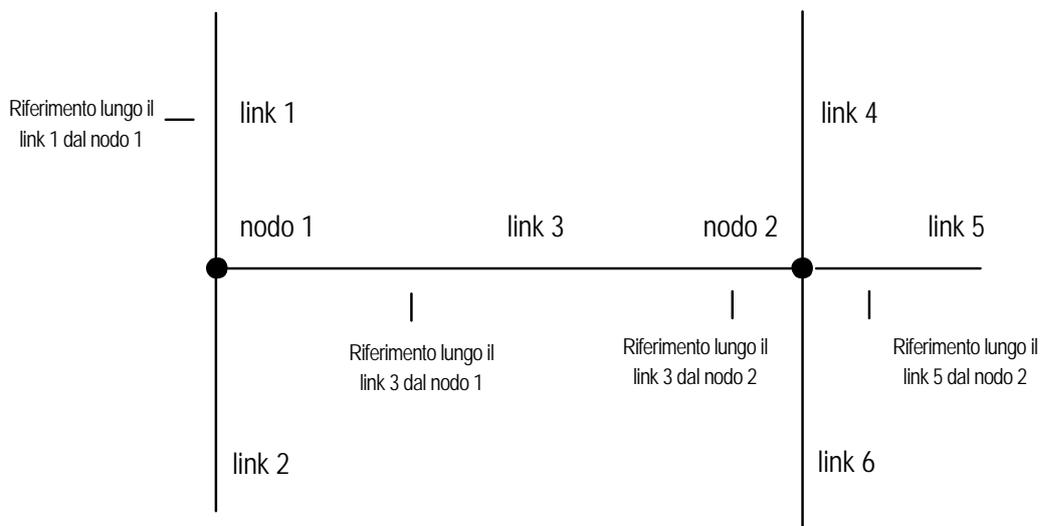


Figura 2.11: LRS con il modello arco-nodo (versione adattata da Nyerges, 1990)

Un'importante estensione del modello topologico lineare è rappresentato dallo schema della **segmentazione dinamica**. Alla base di questa funzionalità si trova il concetto di **route**, elemento lineare complesso di lunghezza variabile al quale si può associare l'informazione tematica. La **route** è composta da uno o più archi, permettendo in questo modo una relazione 1-m e m-m. Mediante la segmentazione dinamica si è in grado di sovrapporre alla struttura topologica arco-nodo (fisica) una nuova topologia, definita in maniera logica, senza modificare i dati presenti nella banca dati.

Come evidenziato in Figura 2.12, ogni **route** può essere un elemento continuo, contenere segmenti vuoti, diramazioni o addirittura ripetersi su certi tratti (Miller e Shaw, 2001).

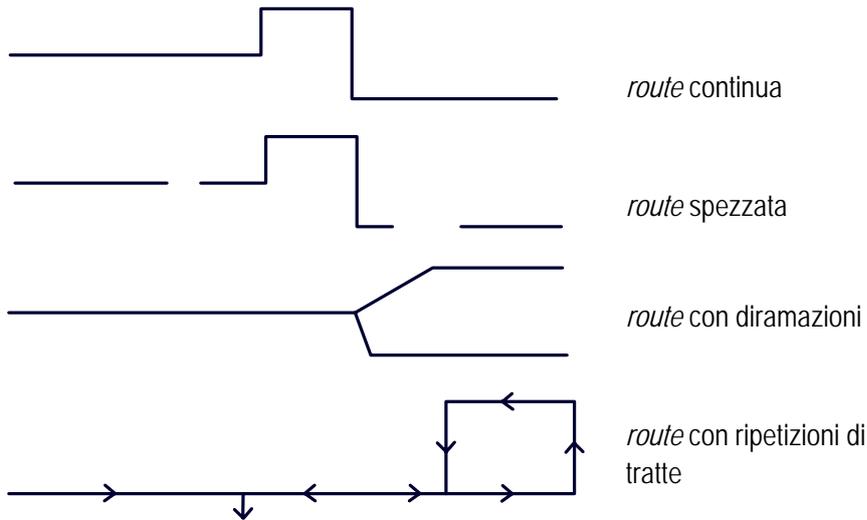


Figura 2.12: Tipologie di *routes* (versione adattata da Miller e Shaw, 2001)

La carta dei mezzi pubblici della città di Zurigo, riportata in Figura 2.13, mostra un esempio pratico, dove le tratte tra le fermate possono essere modellizzate come archi, le fermate come i nodi del modello e le linee tranviarie come *routes*.

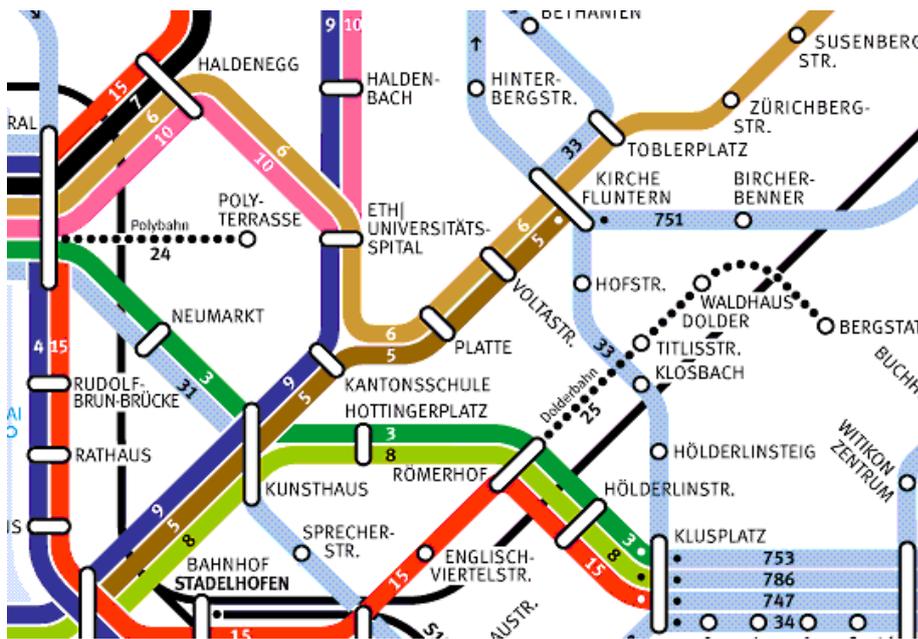


Figura 2.13: Dettaglio della carta dei mezzi pubblici di Zurigo (Fonte: <http://www.zvv.ch>)

Lo schema della segmentazione dinamica permette inoltre di posizionare degli eventi lungo ogni *route*. Gli eventi sono informazioni tematiche riguardanti la rete che possono comprendere sia fenomeni sporadici, quali ad esempio incidenti stradali, rallentamenti o cali di visibilità, sia informazioni tendenzialmente permanenti, quali alcune caratteristiche geometriche delle tratte interessate.



Essi sono caratterizzati minimo da due attributi, una chiave identificativa per la *route* e la sua distanza progressiva sulla *route* e sono posizionati lungo gli archi grazie ai riferimenti lineari.

L'esempio di Figura 2.14 mostra come i dati relativi a un reticolo stradale siano associabili anche solo a tratti della medesima *route*. Potendo interessare solo parti di un arco, il posizionamento di un evento non richiede di cambiare la struttura fisica dell'arco (spezzare fisicamente l'arco).

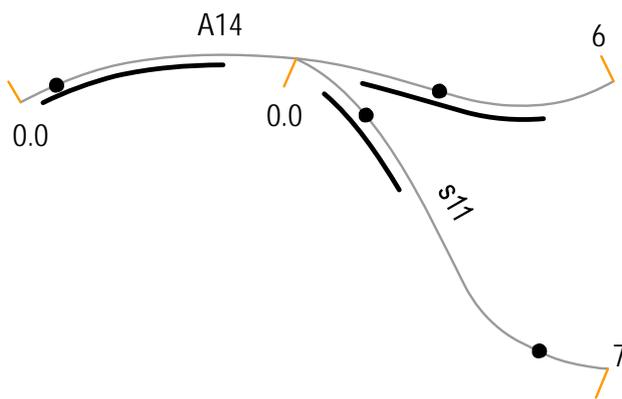


Figura 2.14: Esempio di *route* con eventi puntiformi e lineari associati

Di regola, si possono distinguere tre diverse tipologie di eventi: puntiformi, lineari e continui (Figura 2.15) (Miller e Shaw, 2001).

Incidenti (eventi puntiformi)

| Route ID | Riferimento lineare (km) | Intervento Polizia |
|----------|--------------------------|--------------------|
| A14 | 0.8 | si |
| A14 | 4.2 | no |
| s11 | 1.5 | no |
| s11 | 6.3 | si |
| ... | ... | ... |

Lavori in corso (eventi lineari)

| Route ID | From (km) | To (km) | Descrizione |
|----------|-----------|---------|-----------------------------|
| A14 | 0.4 | 2 | lavori di pavimentazione |
| A14 | 3.8 | 5 | rallentamenti |
| s11 | 0.4 | 2.5 | segnaletica in allestimento |
| ... | ... | ... | ... |

Limiti di velocità (eventi continui)

| Route ID | Riferimento lineare (km) | Limite velocità (km/h) |
|----------|--------------------------|------------------------|
| A14 | 1.2 | 100 |
| A14 | 3.5 | 120 |
| s11 | 1 | 70 |
| s11 | 5.3 | 50 |
| ... | ... | ... |

Figura 2.15: Esempi di tabelle di eventi

Gli eventi puntiformi si riferiscono a un punto specifico lungo una *route*. Eventi puntiformi possono essere, ad esempio, gli incidenti stradali o le fermate dei mezzi pubblici. Gli eventi lineari riguardano invece eventi discontinui lungo una *route*; per tale motivo nella tabella sono presenti due riferimenti lineari, quello di inizio e quello di fine evento. Tra gli eventi lineari possiamo ricordare le tratte interessate da lavori in corso oppure tariffe di parcheggio differenziate lungo la stessa strada. Gli eventi continui sono invece, come suggerito dal nome stesso, eventi che riguardano l'intera *route*. In questo caso, nella tabella è sufficiente riportare il riferimento lineare in prossimità del cambiamento. Esempi di eventi continui sono i limiti di velocità e lo stato della pavimentazione.

Alcuni esempi di modelli di offerta

Come abbiamo già avuto modo di osservare, esistono diverse applicazioni dei GIS-T che richiedono un grado di dettaglio dell'informazione spesso molto diverso. Questo chiaramente implica la necessità di un modello dei dati adeguato e consono al sistema da analizzare.

Riportiamo qui di seguito alcune considerazioni che si possono fare a riguardo (Friedrich, 2004):

- per analisi semplici relative al traffico stradale privato può essere sufficiente un modello arco-nodo, eventualmente completato da *turn-tables* per modellizzare le manovre in prossimità delle intersezioni;
- per analisi multimodali saranno da modellizzare oltre agli elementi base, anche elementi addizionali quali le fermate, i collegamenti tra le diverse modalità di trasporto e i relativi orari;
- per analisi di traffico dinamiche nel modello si deve considerare la componente temporale che, a seconda del tipo di analisi, potrà esprimere tempi di viaggio, frequenza dei servizi, ciclicità di alcuni fenomeni legati al traffico, ecc.
- per le operatività si necessita di aggiornamenti e previsioni regolari delle informazioni e il grado di dettaglio dell'informazione sarà di conseguenza maggiore, basti pensare ai sistemi di navigazione o alle simulazioni microscopiche del traffico (capitolo terzo). Il modello dei dati richiesto risulterà inevitabilmente più complesso.

Recentemente, si stanno cercando di proporre modelli che offrano degli standard in grado di creare una struttura dei dati unitaria, integrabile a diverse realtà e soprattutto modelli con un livello dell'informazione scalabile in base al grado di dettaglio desiderato per l'analisi. Per poter realizzare questo obiettivo è necessario un lavoro di cooperazione tra gli addetti ai lavori che permetta di integrare modelli diversi per adattarli ad ambiti il più possibile eterogenei. È importante inoltre che la creazione del modello non sia mirata alla

■
■
■
■
■

sola gestione, ma anche alla programmazione, alla valutazione del livello di qualità del servizio, alla integrabilità con altri dati territoriali di equivalente valore.

Negli ultimi anni, sono stati sviluppati alcuni modelli di offerta a livello europeo. Per la modellizzazione dell'offerta per il trasporto privato, possiamo ricordare lo standard europeo *Geographic Data File* (GDF), preparato dal lavoro del Comitato Tecnico del CEN (*Comité Européen de Normalisation*). Questo standard è nato dall'esigenza di codificare e normalizzare l'informazione di base necessaria allo sviluppo dei sistemi navigazione satellitare. Lo standard è oggi usato da diverse fonti informative, e in particolare dalla banca dati Multinet di Tele Atlas, utilizzata nel corso del presente lavoro (vedi capitolo quarto).

Per il trasporto pubblico possiamo invece indicare il modello europeo TRANSMODEL. Questo standard prescrive le caratteristiche di sistemi informativi relativi all'insieme di tutte le informazioni riguardanti la programmazione del servizio di un sistema di trasporto pubblico. Alcuni elementi sono stati adottati dal modello GDF e integrati nel modello per il trasporto pubblico.

Sempre importante dal punto di vista degli standard, anche se di minore diffusione, è il modello tedesco per trasporto pubblico (ÖPNV-Datenmodell).

La definizione delle componenti della domanda di mobilità

Alla realizzazione del modello topologico di rete e alla realizzazione quindi del modello di offerta spesso segue la definizione delle componenti della domanda. Il sistema della domanda deriva dalla necessità di svolgere differenti attività in luoghi diversi ed è costituito dagli utenti (persone e/o merci) e dalle caratteristiche degli spostamenti che essi compiono (numero spostamenti, orario dello spostamento, destinazione, modo, percorso) (Cascetta, 2001). I flussi di domanda possono essere schematizzati in matrici origine-destinazione. Tali matrici sono caratterizzate dal numero di righe e di colonne pari al numero di zone fra le quali possono avvenire gli spostamenti, e il generico elemento della matrice rappresenta il numero di spostamenti fra l'origine O e la destinazione D , accompagnato spesso da alcune altre caratteristiche, quali il motivo, il modo e il percorso.

Queste matrici permettono di stimare il numero medio di spostamenti emessi da ciascuna zona di traffico, la relativa distribuzione tra le possibili zone di destinazione (mappa della mobilità) e la ripartizione spazio-temporale degli spostamenti. Tale schematizzazione aiuta a comprendere gli equilibri esistenti e le dinamiche future al variare delle condizioni di contorno. In Figura 2.16 è riportata la matrice origine-destinazione relativa all'esempio già illustrato per la fase zonizzazione, dove sono riportati i tipi di spostamenti possibili tra le diverse zone di traffico.

| | | Zone di destinazione | | | | | | | | | | |
|-----------------|---|----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|--------------------------------|--|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Zone di origine | 1 | X | | | | | | | | | | Spostamenti di scambio interno-esterno |
| | 2 | | X | | | | | | | | | |
| | 3 | | | X | | | | | | | | |
| | 4 | | | | X | | | | | | | |
| | 5 | | | | | X | | | | | | |
| | 6 | | | | | | X | | | | | |
| | 7 | | | | | | | X | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | | Spostamenti di attraversamento | |
| 9 | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | |

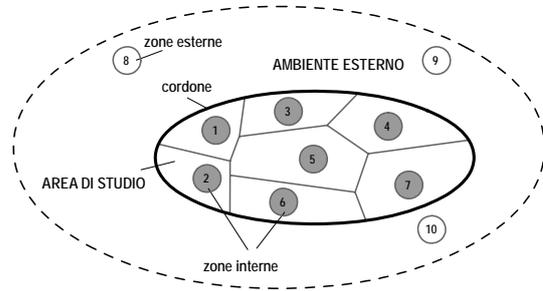


Figura 2.16: Tipi di spostamento in una matrice origine destinazione

Le matrici origine-destinazione consentono inoltre la stima del livello di congestione in specifiche sezioni della rete e, mediante opportune funzioni (dette di *performance*), anche la stima di alcune caratteristiche dello spostamento, quali il tempo di viaggio, il tempo di attesa in prossimità dei nodi e di studiare i fenomeni di formazione delle code.

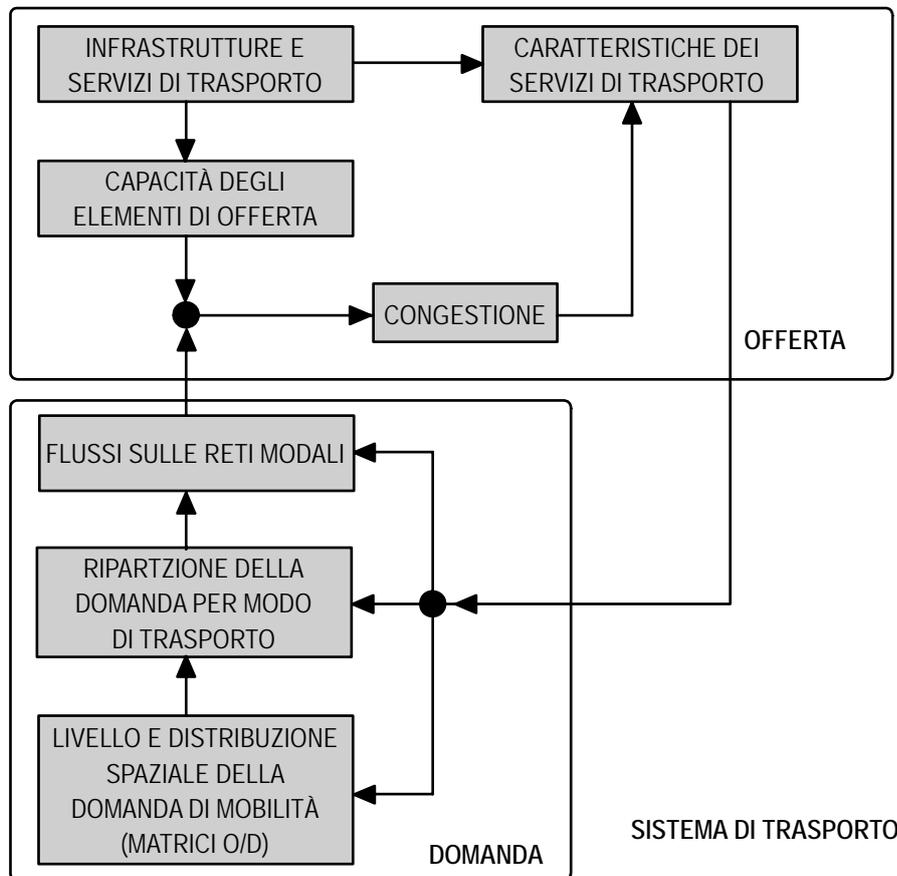


Figura 2.17: Relazioni attraverso le componenti del sistema di trasporto (versione adattata Cascetta, 2001)



In Figura 2.17 è riportato una possibile schematizzazione del sistema di trasporto scomposto nelle sue due componenti principali: il sistema dell'offerta e quello della domanda.

Le problematiche legate alla simulazione dei flussi di traffico e alla definizione delle variabili in essa coinvolte, tra cui il sistema delle attività, le scelte di percorso e l'iterazione tra domanda e offerta, verranno trattate nel dettaglio nel prossimo capitolo. Come già evidenziato in precedenza (Tabella 2.3), per questa fase i GIS non risultano essere lo strumento più idoneo, o quantomeno quello privilegiato.

L'analisi dei dati

Una volta ottenuto il modello di offerta, alle reti è possibile applicare oltre alle funzioni di analisi classiche offerte dai GIS (**funzionalità di base**) anche **funzioni specifiche per le reti**. L'uso dei GIS nel settore dei trasporti ha, infatti, favorito lo sviluppo di nuovi modelli e nuovi metodi di analisi. Gli algoritmi per la determinazione del percorso minimo, la verifica della connettività, i modelli di interazione spaziale domanda/offerta (assegnazione) e i metodi per la localizzazione delle infrastrutture e dei servizi rappresentano qualche esempio delle funzionalità di rete più comuni (Miller e Shaw, 2001).

Il numero dei possibili metodi di analisi è illimitato, soprattutto, quando si utilizzano metodi di calcolo complessi. Qui di seguito, sono descritte le funzionalità GIS più caratteristiche, partendo da alcune funzionalità di base e concludendo con quelle più specifiche per le reti¹⁰.

Interrogazioni

La suddivisione delle informazioni geografiche in tematica e geometria (topologia e metrica) caratterizza le possibili interrogazioni disponibili.

1. Nel caso in cui il modello dei dati contenga gli attributi necessari, si possono realizzare le relative **interrogazioni tematiche**. Di regola, si dispone di un linguaggio d'interrogazione formale che permette di formulare vere e proprie interrogazioni, comunemente chiamate *queries*. Molti GIS relazionali usano un linguaggio di tipo SQL (*Structured Query Language*). Un tipico esempio di interrogazione tematica è "trovare tutti i segmenti stradali con un volume di traffico giornaliero maggiore ai 30 veicoli e con una velocità consentita maggiore di 50 km/h".

¹⁰ Si ricorda che i dati geografici sono strutturati secondo gli schemi della cartografia numerica, ovvero in formato raster o in formato vettoriale. Nel testo sono prese in considerazione solo le analisi sui dati vettoriali, essendo il formato più utilizzato per la tematica trattata.

Come evidenziato in Figura 2.18, grazie agli operatori booleani (AND, OR, NOT e XOR) si può rendere l'interrogazione più efficace combinando più criteri di ricerca.

```
SELECT * FROM Strade
WHERE volume_traffico > 30 AND velocità > 50
```

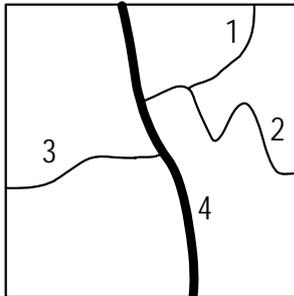


Tabella Strade

| Strada-ID | velocità | volume_traffico |
|-----------|----------|-----------------|
| 1 | 30 | 10 |
| 2 | 30 | 5 |
| 3 | 50 | 30 |
| 4 | 70 | 30 |

Figura 2.18: Esempio di interrogazione tematica

Anche le caratteristiche geometriche possono essere utilizzate per la selezione di oggetti geografici, impiegando criteri di ricerca sia metrici che topologici. Le analisi richiedono in questo caso le forme d'interrogazione tipiche di una banca dati, completate da algoritmi geometrici e topologici.

2. Tra le **interrogazioni di posizione** si hanno, oltre alla semplice localizzazione di un oggetto o alla misura di una distanza, anche le cosiddette analisi di "buffering", che consistono nella creazione di una zona di rispetto attorno agli elementi presi in considerazione. Attraverso questa funzione si possono, ad esempio, determinare le fasce di rispetto localizzate in un intorno di 100 metri sul lato destro di una tratta ferroviaria.
3. Le **interrogazioni topologiche** si riferiscono alle relazioni spaziali tra gli oggetti¹¹. In Tabella 2.4 sono riportati i principali operatori topologici utilizzati da alcuni software GIS in commercio, in grado di verificare le mutue relazioni, quali la connessione, l'inclusione e l'adiacenza.

| | Oracle Spatial (Oracle) | Geomedia (Intergraph) | ArcGIS (ESRI) |
|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Disjoint | <i>disjoint</i> | - | <i>are within a distance of</i> |
| Meet | <i>touch</i> | <i>meet</i> | - |
| Overlap | <i>overlap by intersect</i> | <i>overlap</i> | <i>intersect</i> |
| Contains | <i>contains</i> | <i>entirely contains</i> | <i>completely contains</i> |
| Inside | <i>inside</i> | <i>are entirely contained by</i> | <i>have their center in</i> |
| Covers | <i>covers</i> | <i>contain</i> | <i>contains the center of</i> |
| Coverered by | <i>overered by</i> | <i>are contained by</i> | <i>are completely within</i> |
| Equal | <i>equal</i> | <i>are spatially equal</i> | - |

Tabella 2.4: Operatori topologici (Dolci e Salvini, 2006)

¹¹ Per una documentazione completa sulle possibili relazioni spaziali tra gli oggetti si rimanda il lettore alla consultazione della letteratura specifica (Egenhofer et al., 1993 e Pozzoli, 2006).

Overlay

La funzione di *overlay* è una procedura di analisi spaziale che consente di sovrapporre e intersecare diversi tematismi (*layers*), andando a creare un nuovo livello informativo che conterrà le informazioni di entrambi i *layers* (nuovo tematismo di sintesi). Si tratta di un'operazione che permette di integrare le informazioni sia spaziali che tematiche dei tematismi sovrapposti.

In Figura 2.19 sono riportate le più comuni operazioni di *overlay*, dove il denominatore comune è dato dal fatto che almeno uno dei tematismi considerati sia di tipo poligonale.

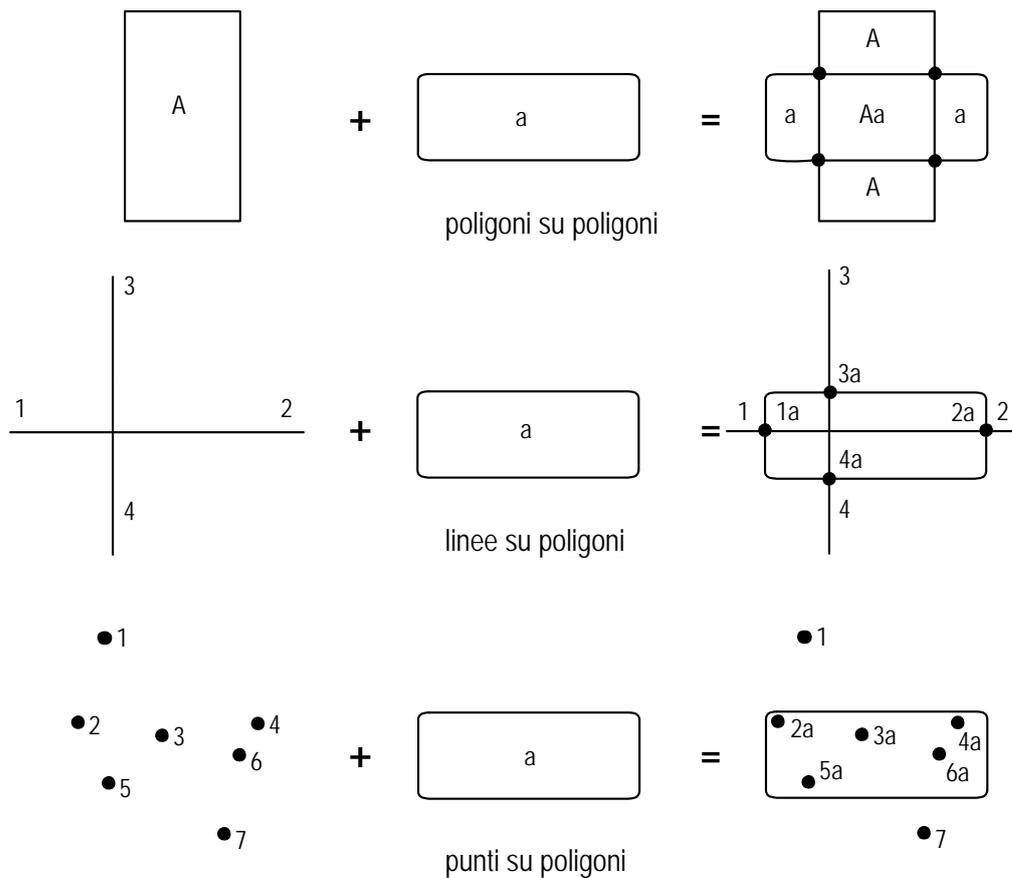


Figura 2.19: *Overlays* topologici (versione adattata da Miller e Shaw, 2001)

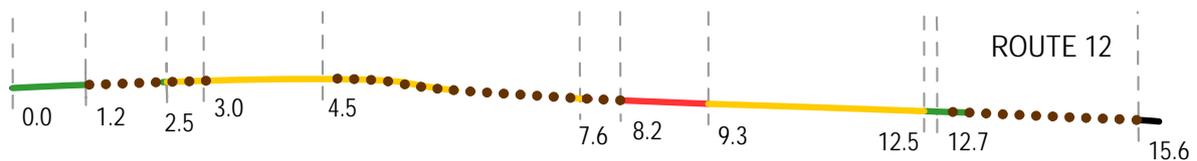
Overlay per tabelle di eventi

Nelle applicazioni più propriamente appartenenti all'ambito GIS-T, per localizzare più eventi lungo una rete si ricorre alle cosiddette intersezioni di segmentazione dinamica per gli eventi. Queste operazioni di analisi sono in grado di combinare, grazie agli operatori booleani, due o più tabelle di eventi. La tabella di eventi risultante può contenere l'unione o l'intersezione delle tabelle di eventi di entrata.

Nel caso di unione, i diversi eventi sono sovrapposti e nuovi eventi sono scritti in prossimità dell'unione tra gli eventi, mentre nel caso di intersezione sono riscritti solo gli eventi coincidenti (Figura 2.20).

| ROUTE ID | Da | A | Pavimentazione |
|----------|------|------|----------------|
| 12 | 1.2 | 3.0 | 07/2007 |
| 12 | 4.5 | 8.2 | 05/2003 |
| 12 | 12.7 | 15.6 | 03/2006 |

| ROUTE ID | Da | A | Stato Pavimentazione |
|----------|------|------|----------------------|
| 12 | 0.0 | 2.5 | Buono |
| 12 | 2.5 | 7.6 | Discreto |
| 12 | 7.6 | 9.3 | Cattivo |
| 12 | 9.3 | 12.5 | Discreto |
| 12 | 12.5 | 15.6 | Buono |



| ROUTE ID | Da | A | Pavimentazione | Stato Pavimentazione |
|----------|------|------|----------------|----------------------|
| 12 | 0.0 | 1.2 | - | Buono |
| 12 | 1.2 | 2.5 | 07/2007 | Buono |
| 12 | 2.5 | 3.0 | 07/2007 | Discreto |
| 12 | 3.0 | 4.5 | - | Discreto |
| 12 | 4.5 | 7.6 | 05/2003 | Discreto |
| 12 | 7.6 | 8.2 | 05/2003 | Cattivo |
| 12 | 8.2 | 9.3 | - | Cattivo |
| 12 | 9.3 | 12.5 | - | Discreto |
| 12 | 12.5 | 12.7 | - | Buono |
| 12 | 12.7 | 15.6 | 03/2006 | Buono |

Figura 2.20: *Overlay* di segmentazione dinamica, opzione unione (versione adattata da Miller e Shaw, 2001)

Spatial Join

Lo *spatial join* rappresenta un'altra importante possibilità di analisi. Con una tradizionale operazione di *join* tra tabelle, usando un campo comune, i *records* di una tabella possono essere uniti a quelli di un'altra tabella. Con lo *spatial join*, gli attributi di un tematismo sono relazionati a quelli di un altro tematismo basandosi, non sul campo comune, ma sulla posizione spaziale.

Come evidenziato in Tabella 2.5, in base alla geometria degli oggetti che partecipano all'analisi si hanno relazioni spaziali e risultati diversi.

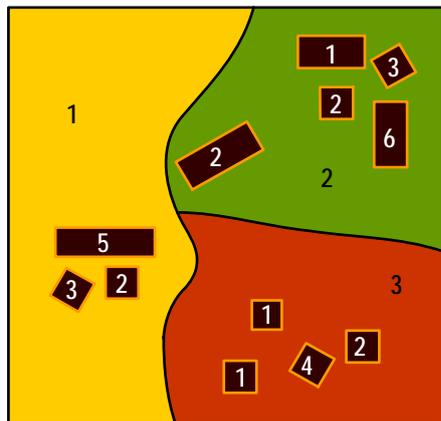


Nel caso in cui il tematismo sorgente sia un poligono, l'operazione di *spatial join* è in grado di associare alla tabella del tematismo di destinazione i valori degli attributi del tematismo sorgente (contenuto). Gli attributi possono aggregati in base alle operazioni matematiche più comuni (somma, minimo, massimo, deviazione standard, media, mediana, ecc.).

| Destinazione \ Sorgente | Punto | Linea | Poligono |
|-------------------------|-----------|-------------|-----------|
| Punto | Vicinanza | Vicinanza | Contenuto |
| Linea | Vicinanza | Parte di .. | Contenuto |
| Poligono | - | - | Contenuto |

Tabella 2.5: Schema riassuntivo delle relazioni spaziali coinvolte nello *spatial join*

In Figura 2.21, è riportato un esempio di *spatial join*, dove al tematismo poligonale di destinazione (quartieri) sono associate le informazioni tematiche del tematismo poligonale sorgente (edifici). Nel caso specifico, si calcola il numero di abitanti per quartiere, sommando il numero di persone per edificio (valore riportato in figura su ogni edificio).



tematismo SORGENTE: edifici
tematismo DESTINAZIONE: quartieri

tematismo RISULTATO

| Shape | ID | Quartiere | Nr. Persone |
|---------|----|-----------|-------------|
| Polygon | 1 | giallo | 10 |
| Polygon | 2 | verde | 14 |
| Polygon | 3 | rosso | 8 |

Figura 2.21: Esempio di *spatial join*

Per le relazioni punto-punto, punto-linea e linea-punto, la funzione di *spatial join* mette invece in relazione gli oggetti più vicini e ne calcola la distanza minima (vicinanza). Come chiaramente evidenziato in Figura 2.22, trattandosi di distanza euclidea e non di percorso, tale funzione risulta spesso inadeguata per applicazioni GIS-T (Miller e Shaw, 2001) non potendo dare vere e proprie soluzioni per studi di logistica (trovare gli ospedali più vicini al luogo di un incidente).

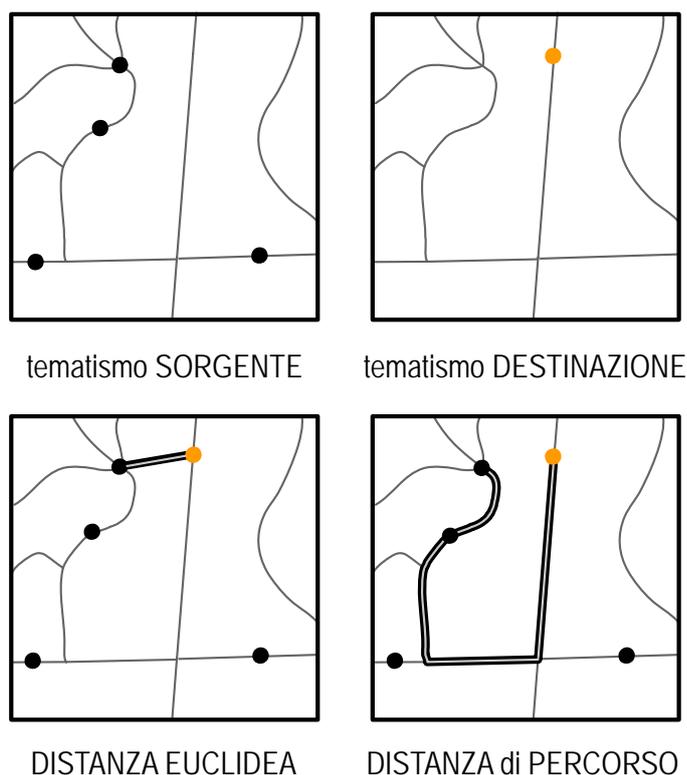


Figura 2.22: Vicinanza punto-punto calcolata dallo *spatial join*

Geocoding

Spesso, i dati disponibili per le analisi legate al traffico sono acquisiti attraverso censimenti o formulari e fanno riferimento all'indirizzo postale. Il termine inglese *geocoding* o *address matching* indica una funzionalità GIS che consente di localizzare gli oggetti utilizzando un loro riferimento spaziale implicito, dato da un indirizzo, un codice postale, una sezione di censimento o una denominazione stradale. Un servizio di geocodifica definisce il processo relativo alla conversione del riferimento spaziale implicito in coordinate geografiche.

Molti software GIS offrono questa procedura come strumento standard. Di norma, gli indirizzi che non trovano una locazione geografica sono scritti in un file separato e l'utente dovrà successivamente completare l'operazione manualmente. Grazie a questo procedimento, si sono potute sviluppare applicazioni, molto diffuse sul Web, che permettono di visualizzare un punto su una mappa a partire da un indirizzo postale¹².

La posta svizzera ha recentemente completato la banca dati degli edifici (più di un milione e mezzo di oggetti), dove ogni edificio contiene nel suo modello dei dati anche la coppia di coordinate geografiche (Figura 2.23).

¹² Alcuni esempi sono: il GIS-Browser del Cantone Zurigo (<http://www.gis.zh.ch/gb4/bluevari/gb.asp>) o i siti ViaMichelin.com e MapQuest.com

| ADR_GEOPOST_ID | STR_GEOPOST_ID | ONRP | STR_NAME | HNR | HNR_N | HNR_A | GEBAEUDE_BEZ | LAGE_BEZ | PLZ | PLZ_6 | ORT_27 | KANTON | ADR_STATUS | RECHTS_KOO | HOCH_KOORD | BFS_GDE_NR | GBDE_STATUS |
|----------------|----------------|------|------------------|-----|-------|-------|--------------|----------|------|--------|------------|--------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1655002 | | 4947 | | | | | Turrigerhof | | 8606 | 860602 | Greifensee | ZH | D | 694753 | 246127 | 194 | D |
| 2568445 | 1341063 | 4947 | Wildsbergstrasse | 36 | 36 | | | | 8606 | 860602 | Greifensee | ZH | D | 694604 | 245978 | 194 | D |
| 2544734 | 1341063 | 4947 | Wildsbergstrasse | 37A | 37A | A | | | 8606 | 860602 | Greifensee | ZH | D | 694671 | 245987 | 194 | D |
| 2544735 | 1341063 | 4947 | Wildsbergstrasse | 37B | 37B | B | | | 8606 | 860602 | Greifensee | ZH | D | 694682 | 246009 | 194 | D |

Figura 2.23: Modello GeoPost dei dati (www.geopost.ch)

Ricerca del percorso minimo (*Shortest path and routing*)

La ricerca dello *shortest path* è sicuramente la funzionalità di rete più conosciuta e utilizzata per le applicazioni nel settore dei trasporti.

Un percorso è dato da una sequenza di nodi (non necessariamente tutti distinti) e dalla sequenza di archi che li collega. Ogni percorso è univocamente associato a una e una sola coppia origine-destinazione, mentre la stessa coppia può essere collegata da più percorsi.

Data una rete $G = (N, A)$, due nodi $n, m \in N$ si dicono connessi se esiste un percorso con estremi n e m . Ricordiamo che si parla di rete se a ogni arco sono associati uno o più attributi numerici. In questo caso quindi, la ricerca dello *shortest path* permette di trovare **il percorso di peso minimo tra i due nodi**. Il peso assegnato agli archi può essere semplicemente determinato dalla lunghezza degli archi; in questo caso il problema si riduce a quello delle distanze minime e il percorso è calcolato in funzione della lunghezza geometrica dei singoli archi.

Se però alla rete è associata un'informazione tematica aggiuntiva, l'analisi del traffico potrà essere fatta in maniera più sofisticata e il percorso migliore potrà essere calcolato in funzione dell'informazione aggiuntiva. Spesso i pesi sono definiti da attributi, quali il tempo di viaggio o altri fattori di scorrevolezza della rete.

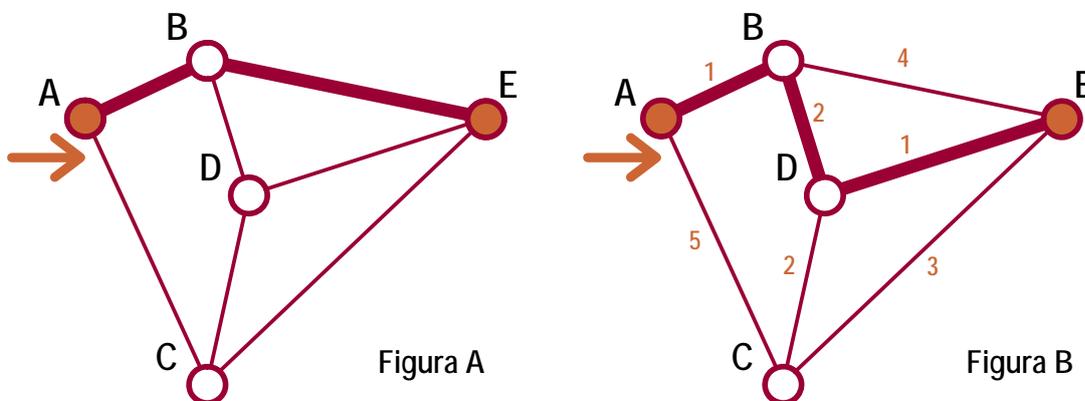


Figura 2.24: Ricerca del percorso migliore da A a E

Se consideriamo l'esempio in Figura 2.24, dove A è il nodo di partenza ed E quello di destinazione, risulta evidente che la soluzione è data dal percorso ABE se si considera la distanza minima (Figura A), ma dal percorso ABDE se si considerano i pesi assegnati alla rete in esame (Figura B).

Esistono diverse possibilità per implementare tale funzione in ambiente GIS. Tra gli algoritmi più conosciuti possiamo ricordare l'algoritmo di Dijkstra e quello di Bellman.

L'applicazione più diffusa della funzionalità di ricerca del percorso minimo è quella legata alla pianificazione di un viaggio (la tematica è trattata più nel dettaglio nel capitolo quarto). Tali applicazioni trovano ampia diffusione in Internet e sono in grado di determinare, date un'origine e una destinazione, il percorso migliore. Inoltre, a seconda della complessità del modello, tali funzioni possono fornire opzioni aggiuntive in base al parametro che l'utente vuole ottimizzare (tempi, costi e soste).

Matrici origine/destinazione

Le matrici origine/destinazione sono uno degli strumenti più efficaci per l'analisi dell'interscambio di viaggiatori tra determinate aree d'interesse, permettendo di apprezzare tutti i tipi di movimenti, cioè quelli in uscita, in entrata e quelli che restano nella stessa area di origine. Trattandosi di rappresentare linee di collegamento tra punti di origine e di destinazione, risulta evidente che, anche in questo caso, i GIS possono rivelarsi strumenti validi. Fino a poco tempo fa, la raffigurazione delle cosiddette "linee di desiderio" era resa possibile da applicazioni programmate da utilizzatori singoli. Solo di recente, alcuni software GIS hanno introdotto la possibilità di creare matrici O/D (Figura 2.25). L'estensione *Network Analyst* di ArcGIS offre, ad esempio, questa possibilità (*cost matrix solver*).

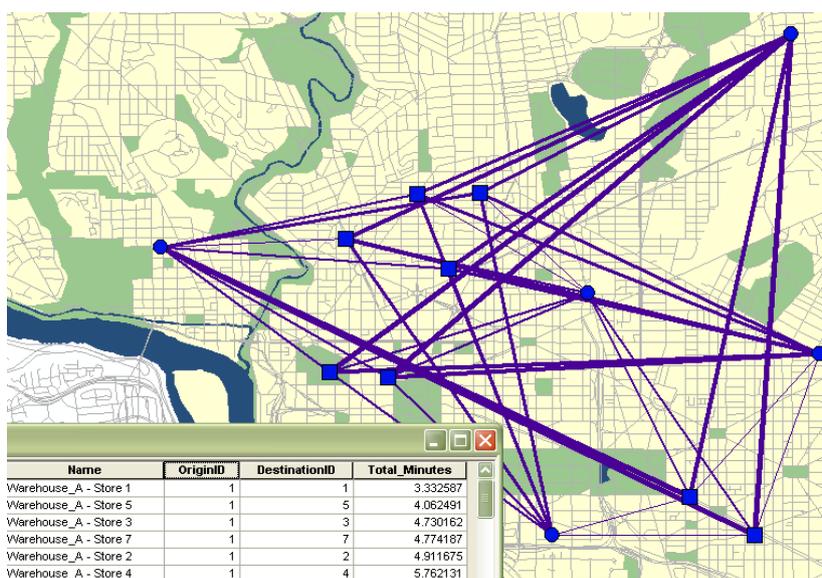


Figura 2.25: Esempio di matrice O/D in ArcGIS (particolare tratto dai dati demo della ESRI)



Connettività della rete

Come abbiamo già avuto modo di vedere, data una rete $G = (N, A)$ due nodi $(n, m \in N)$ si dicono connessi se esiste un percorso con estremi n e m . Se tale percorso non esiste, n e m sono detti “sconnessi”.

La connettività descrive quindi il grado di connessione tra i nodi di una rete e si misura attraverso il numero di legami esistenti. Facendo ricorso alla teoria dei grafi, la connettività la si può facilmente descrivere grazie alle matrici di adiacenze.

La matrice di adiacenze è basata su una matrice quadrata $n \times n$. Il generico elemento (i, j) della matrice sarà pari a 1 se l'arco (i, j) del grafo esiste, sarà pari a 0 se l'arco (i, j) non esiste. In questo modo si possono memorizzare grafi sia orientati sia non orientati (Figura 2.26).

Le funzioni per la verifica della connettività servono a identificare se e quali porzioni di una rete sono connesse. Tali funzioni vengono utilizzate per trovare percorsi alternativi, per identificare tutti i segmenti stradali connessi a un determinato nodo stradale o edificio o per trovare i servizi più prossimi a uno o più punti di una città.

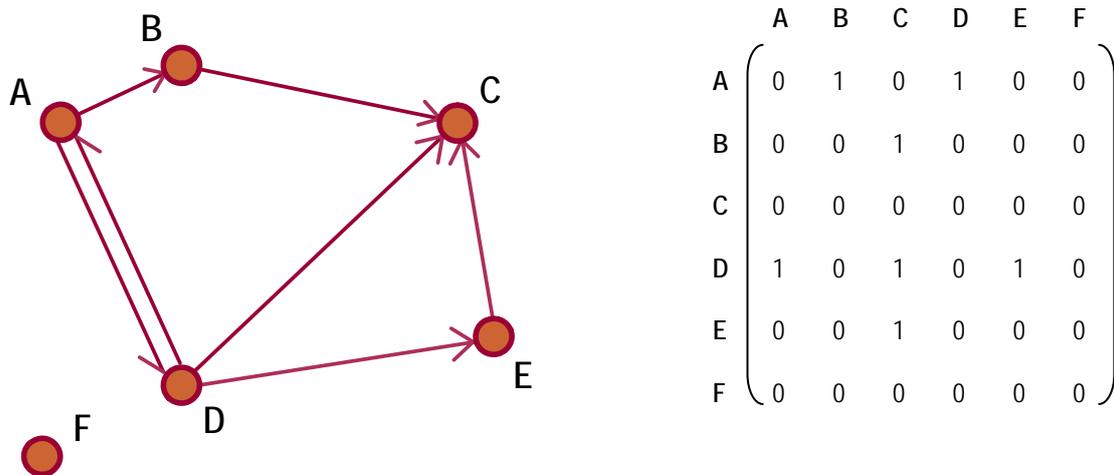


Figura 2.26: Esempio di matrice di adiacenza riferita all'esempio illustrato

Visualizzazione dell'informazione

Anche se, come più volte ricordato, l'utilizzo dei GIS non può essere limitato alla sola realizzazione e visualizzazione di immagini cartografiche, rimane comunque indiscusso il loro ruolo nella visualizzazione di dati aventi distribuzione spaziale. I GIS hanno notevolmente ampliato la facilità e la potenza di visualizzazione cartografica e di presentazione dei dati geografici. Con la loro introduzione, infatti, si sono resi disponibili



strumenti computerizzati, che hanno reso più facili l'analisi spaziale dell'informazione e la successiva la generazione di mappe.

I GIS permettono di visualizzare l'informazione geografica secondo varie modalità. Grazie alla combinazione tra tematica e grafica i GIS permettono di comunicare in modo diretto e veloce l'informazione contenuta nelle banche dati. Nel corso del presente lavoro si è dato largo spazio al tema dell'analisi e della visualizzazione dei dati, considerando centrale il ruolo comunicativo che possono svolgere questi sistemi.

Conclusioni

A conclusione di questo capitolo, ricordiamo come i GIS applicati al settore dei trasporti abbiano portato alla messa a punto di particolari metodi di analisi e modelli, andando a integrare le classiche funzionalità GIS. Questi strumenti riescono, infatti, ad accompagnare la modellizzazione dei dati, le fasi di raccolta, le operazioni di analisi e la visualizzazione dell'informazione.

Nei prossimi tre capitoli, le tematiche scelte mettono in luce il possibile contributo dei GIS, delineando i diversi aspetti trattati e i possibili punti di sviluppo.



Bibliografia

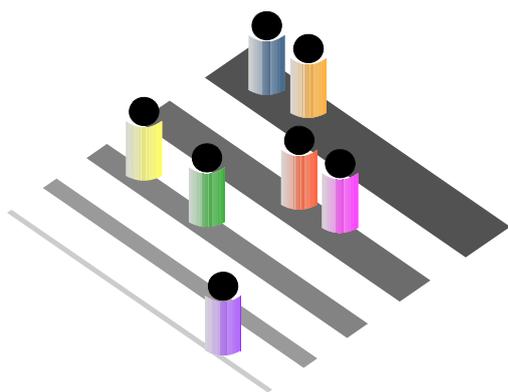
- ARE (2006) Erstellung des nationalen Personenverkehrsmodells für den öffentlichen und privaten Verkehr – Modellbeschreibung, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE) e Eidg. Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), BBL, Vertrieb Publikationen, Bern.
- Balakrishnan, V. K. (1997) Graph Theory, McGraw-Hill; 1 edition.
- Bartelme, N. (2000) Geoinformatik - Modelle, Strukturen, Funktionen. 3. Aufl., Heidelberg.
- Bill R. (1999) Grundlagen der Geoinformationssysteme, Band 1: Hardware, Software, Daten, Heidelberg, Germany, Herbert Wichmann Verlag.
- Bosetti, S., D. Maroni e M. Rinaldi (2003) I Sistemi Informativi Geografici per i Trasporti, Quaderno n. 6, Ricerche e Trasporti, Collana Editoriale TRT Trasporti e Territorio Srl, Milano.
- Burrough, P.A. (1986) Principles of geographical information systems for land resource assessment, Clarendon Press, Oxford, U.K.
- Cascetta, E. (2001) Transportation Systems Engineering: Theory and Method, Kluwer Academic Publishers.
- Date, C.J. (1995) An Introduction to Database Systems, 6th ed. Reading, MA: Addison-Wesley.
- Dolci C. e D. Salvini (2006) GITTA Spatial Analysis Module, Räumliche Abfragen (Spatial Queries) <http://www.gitta.info/SpatialQueries/de/html/index.html>.
- Dueker, K. e T. Ton (2000) Geographical information systems for transport. In Hensher D. e K. Button (2000) Handbook of Transport Modeling, Volume 1 (253-269). Oxford: Pergamon Press.
- Egenhofer, M. J. e J. Sharma (1993) Topological Relations between regions in R^2 and Z^2 , Advances in Spatial Databases - Lecture Notes in Computer Science, No. 692, Springer-Verlag, 1993.
- ESRI (2004) ArcGIS 9 Linear Referencing in ArcGIS, ESRI, Redlands USA, 2004.
- European Commission (2008) Statistical regions for the EFTA countries and the candidate countries, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Friedrich, M. (2004) Prospects of Transportation Modelling, CD-ROM, Proceedings of 2nd International Symposium Networks for Mobility, Stuttgart.
- Goodchild, M.F. (1998) Geographic information systems and disaggregate transportation modeling. Geographical Systems 5(1-2): 19-44.

- Healey, R.G. (1991) Database management systems. In: Maguire, D.J., M.F. Goodchild e D.W. Rhind, eds. *Geographical Information Systems: Principles and Applications. Volume 1: Principles*. Harlow: Longman, 251-67.
- Miller, H.J. e S.L. Shaw (2001) *Geographic Information Systems for Transportation: Principles and Applications*. New York, Oxford University Press.
- Nocera, R. (1999) 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, IGP Bericht 284, ETH Zürich.
- Nyerges, T.L. (1990) Locational Referencing and Highway Segmentation in a Geographic Information System, *ITE Journal* 60 (3): 27-31.
- Pointet, A., C. Perafan, R. Caloz, C. Dolci e S. Geiger (2004) *CLAN Cultural Land Use Analysis Methodology*, IADB Press, Washington D.C.
- Pozzoli, A. (2006) GIS estensibili e basi di dati spazio-temporali. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini*, N.3, 2006.
- Reinhardt, W., G. Joos, H. Kuhlmann, E. Müller-Hermes, B. Schmitt, S. Seeberger, e V. Walter (2004) *Raumbezogene Informationssysteme*. Heidelberg, Herbert Wichmann Verlag.
- Rhind, D.W. (1989) Why GIS?, *ARC News*.
- Waters, N.M. (1999) Transportation GIS: GIS-T. In P.A. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire, and D.W. Rhind, editors, *Geographical information systems: Principles, techniques, management and applications*. New York: Wiley, 827-844.



capitoloterzo

VISUALIZZAZIONE E ANALISI DELLA MOBILITÀ GIORNALIERA



A oggi esistono numerosi modelli per la simulazione del traffico sulle reti che permettono previsioni sempre più accurate.

Spesso però le grandissime quantità di dati prodotte mancano di uno strumento che ne possa permettere la gestione e la visualizzazione, elementi preziosi per l'analisi e l'interpretazione dell'informazione. Questo aspetto riduce notevolmente l'utilità di molte previsioni, elemento che ha ispirato questa parte del lavoro.

In questo capitolo sono illustrati alcuni metodi di visualizzazione statica e dinamica di dati tabulari generati da simulazioni riguardanti la mobilità giornaliera su territorio svizzero, utilizzando tecniche GIS.



La modellizzazione trasportistica

La ricerca nel settore dei trasporti è stata negli ultimi decenni ampia e approfondita, facendoci assistere a un continuo aumento delle tecnologie e dei software atti a migliorare l'analisi dei sistemi di trasporto e dei fenomeni a essi legati. Tra questi, la simulazione è diventata un mezzo indispensabile per l'ottimizzazione dei sistemi complessi, consentendo di analizzarne dinamicamente il loro comportamento. Diverse teorie sono state formulate al fine di descrivere l'ambito operativo e il sistema di offerta, l'utenza con le sue esigenze (sistema di domanda) e, infine, le scelte effettuate dagli utenti (algoritmi di scelta e assegnazione).

Per poter prendere confidenza con una terminologia non propriamente appartenente alla tematica GIS, qui di seguito è offerta una breve panoramica sui metodi di simulazione più comunemente utilizzati nel settore dei trasporti. Sarà poi descritto il simulatore adottato in questo lavoro e, per concludere, saranno presentati i risultati delle applicazioni GIS sviluppate per l'analisi e la visualizzazione dei dati prodotti dal simulatore.

La simulazione

La **simulazione** è la tecnica di imitare il comportamento di alcune situazioni o sistemi (fisici, meccanici, ecc.) tramite un modello. Attualmente, la simulazione fornisce un potente mezzo per la comprensione e lo studio di molte realtà scientifiche e di molti loro aspetti; essa permette previsioni e analisi di sistemi complessi, di capire il loro comportamento e di sottoporli ad azioni che nella realtà sarebbero difficilmente riproducibili. Il fine di questo approccio è quello di specificare un insieme di relazioni che permettano di interpretare, alla luce delle variabili ritenute rilevanti (input), gli output di un fenomeno, fornendo così le informazioni necessarie per l'analisi e la valutazione delle alternative di pianificazione (Putman e Chan, 2001).

Per molti anni è stato problematico studiare il comportamento dei sistemi complessi, in quanto i modelli usati per descriverli erano così articolati che le simulazioni utilizzate comportavano tempi di calcolo estremamente elevati. Attualmente, grazie al considerevole aumento della potenza computazionale dei calcolatori, la simulazione è diventata un'attività sempre più presente in molti campi dell'ingegneria, dove è ormai considerata un mezzo indispensabile anche per l'analisi dei sistemi di trasporto e per l'ottimizzazione dei flussi di traffico.

La stima della domanda di trasporto, alcuni approcci modellistici

La simulazione dei flussi di traffico è sempre stata un problema molto delicato da risolvere a causa della complessità del fenomeno e del numero di fattori da considerare nel modello. Simulare il funzionamento di un sistema di trasporto significa simulare il funzionamento delle singole componenti, le reciproche interazioni e gli impatti sulla società e sul territorio.

Per analizzare un sistema di trasporto e progettare degli interventi efficaci è indispensabile stimare la domanda, comprendere i fattori che la determinano e simularne le variazioni conseguenti agli interventi progettati. La domanda di spostamento è l'elemento più rilevante e allo stesso tempo più complesso da modellizzare e da simulare. **Simulare la domanda significa stimare il numero medio di utenti che si spostano tra due zone dell'area di studio e simulare con quale modalità è effettuato lo spostamento.**

La simulazione implica l'elaborazione di un modello che dovrà rispecchiare il più possibile la realtà, in modo da garantire l'attendibilità dei risultati; proprio da questo modello dipende la bontà dei dati ottenuti in uscita dalla simulazione. Di norma, nell'analisi sono prese in considerazione le diverse categorie di utenti, i motivi degli spostamenti e le fasce orarie rilevanti ai fini dello studio. Purtroppo la maggioranza dei sistemi reali è caratterizzata da cambiamenti continui. Sarà quindi impossibile avere un esatto modello della realtà, ma si avranno modelli in grado di approssimarla in maniera più o meno precisa.

L'interesse verso la creazione di modelli e algoritmi in grado di descrivere il funzionamento del sistema ha portato nel corso degli anni allo sviluppo di diverse teorie modellistiche. I modelli possono variare per approccio teorico, metodi di assegnazione, gestione della casualità e livello di dettaglio rappresentativo. Essi sono classificati essenzialmente seguendo il metodo di simulazione del flusso di traffico e delle funzioni di prestazione. Secondo una classificazione generalmente condivisa è possibile distinguere tre importanti approcci alla simulazione.

| | Funzioni di prestazioni | |
|-----------------------------|-------------------------|--------------|
| Rappresentazione del flusso | Aggregate | Disaggregate |
| Continua | macroscopici | |
| Discreta | mesoscopici | microscopici |

Tabella 3.1: Approcci alla simulazione (Rivadossi, 2004)

Appartengono alla prima categoria, i modelli di **macrosimulazione** (detti anche “di prima generazione”). Essi considerano il traffico nella sua totalità, descrivendolo come un flusso definito da regole comportamentali che si basano principalmente sull'interazione tra i veicoli e dei veicoli con l'infrastruttura. I modelli macroscopici (modelli aggregati) si basano sulla simulazione continua del traffico, concentrandosi perlopiù sul traffico nella



sua evoluzione, fornendo previsioni sulla velocità media di scorrimento, sul flusso e sulla densità veicolare (grandezze continue e mediate) (Ortúzar e Willumsen, 1995).

Al contrario, si parla di **microsimulazione**, se si desidera ricostruire l'evoluzione del traffico studiando la singola unità. Nello specifico, i modelli di microsimulazione (modelli disaggregati) simulano il movimento e le traiettorie dei singoli veicoli, consentendo di seguire nel dettaglio il traffico sulla rete stradale. Questa prospettiva di analisi permette di introdurre elementi di eterogeneità nella distribuzione delle caratteristiche individuali, superando così un forte limite dei modelli di macrosimulazione, ossia l'assunto di omogeneità della popolazione, per il quale la relazione tra variabili va necessariamente modellata come invariata nell'intera popolazione (Macy e Willer, 2002).

Recentemente, grazie al già menzionato incremento delle potenzialità computazionali, anche i modelli di microsimulazione sono diventati mezzi di analisi interessanti, in grado di lavorare con un'elevata risoluzione sia temporale che spaziale (Charypar, Axhausen e Nagel, 2007). Risulta chiaro però che, rispetto ai modelli macroscopici, quelli microscopici richiedono e producono un'elevata quantità di dati, basti pensare a simulazioni dove si considerano le attività giornaliere di più di un milione di persone. Essi necessitano di notevoli risorse di calcolo sia in termini di memoria disponibile che di velocità di esecuzione e pertanto, allo stato attuale, sono generalmente applicati a reti di dimensioni ridotte.

Il terzo approccio è rappresentato dai modelli **mesoscopici**, che si collocano tra l'approccio aggregato dei modelli macroscopici e quello più particolare dei modelli microscopici riferito al singolo elemento. In questi modelli i veicoli sono rappresentati ancora microscopicamente, ma il comportamento dei veicoli è calcolato accorrandoli in aggregati con caratteristiche affini (velocità e tempi di viaggio), snellendo così le procedure di calcolo. In Figura 3.1 si riporta una raffigurazione riassuntiva dei diversi approcci alla simulazione.

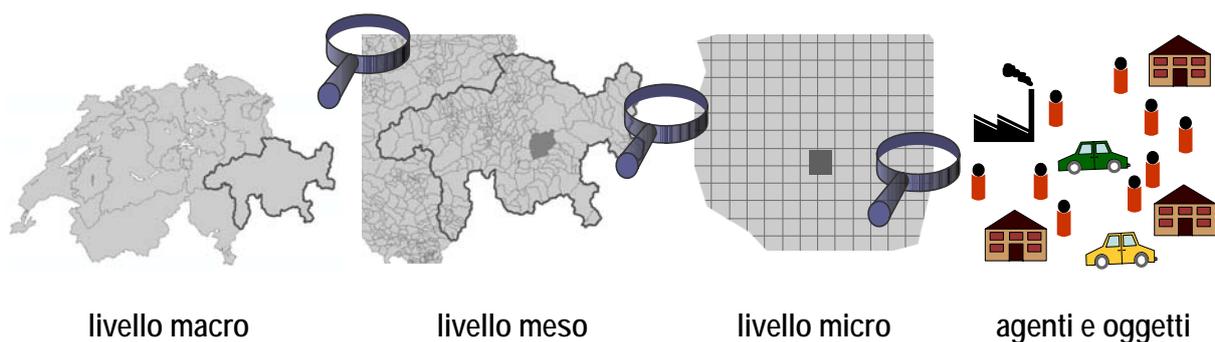


Figura 3.1: Risoluzione spaziale dei diversi approcci alla simulazione (versione adattata Schwarze et al., 2004)

Nella pratica non esistono né modelli interamente aggregati né interamente disaggregati, ma piuttosto modelli per i quali le variabili presentano maggiori o minori livelli di aggregazione. Il livello di aggregazione dipende naturalmente dallo scopo per il quale si modella la domanda. Spesso i simulatori sono composti di sottomodelli separati, le cui dimensioni di scelta possono essere simulate con approcci diversi.

Un'altra importante classificazione dei modelli è fatta distinguendo i modelli statistico-descrittivi dai modelli comportamentali. I modelli si dicono **comportamentali** se derivano da esplicite ipotesi sul comportamento di scelta degli utenti, mentre si diranno **descrittivi** se descrivono le relazioni fra domanda e offerta senza formulare alcuna specifica ipotesi sul comportamento degli utenti.

I modelli comportamentali sono i modelli matematici più utilizzati per assegnare i flussi di traffico alla rete di trasporto. Durante tutto l'intervallo di analisi, il comportamento di ogni singola unità è simulato sulla base di algoritmi decisionali di tipo comportamentale che stabiliscono di volta in volta le scelte individuali in base ai relativi aspetti socio-economici e all'attrattività delle diverse scelte (Ortúzar e Willumsen, 1995). In queste simulazioni si prendono in considerazione le scelte di viaggio in un paniere discreto di alternative (*choice set*), tra cui, ad esempio, la scelta di effettuare o meno lo spostamento per un certo motivo, la scelta di recarsi verso una certa destinazione, la scelta di usare un dato mezzo di trasporto, di seguire un certo percorso sulla rete di trasporto e la scelta temporale dello spostamento. Ricordiamo, che l'odierna riduzione dell'orario di lavoro e la possibilità di una sua gestione più flessibile permettono organizzazioni temporali della giornata dissimili, creando una richiesta d'uso della città polivalente, legata anche ai servizi e allo svago (Nuvolati, 2007).

In realtà, la distinzione fra modelli comportamentali e descrittivi può essere a volte molto sottile e riconducibile a una mera questione interpretativa. I modelli comportamentali sono associati spesso a un approccio microscopico, mentre quelli descrittivi il più delle volte a quello macroscopico.

Recentemente, la ricerca nell'ambito della modellizzazione ha proposto modelli di "nuova generazione", tra i quali possiamo ricordare uno degli approcci più promettenti del settore, quello della **simulazione ad agenti**. Un agente è caratterizzato dalle sue proprietà interne, dalla capacità di prendere decisioni e muoversi in uno spazio e dalla possibilità di interagire con lo spazio stesso e con gli altri agenti. L'idea fondamentale nasce dall'approccio comportamentale e si basa sul fatto che comportamenti complessi possano essere il frutto delle interazioni tra agenti che operano sulla base di regole semplici che, nel loro interagire fanno emergere quelle caratteristiche comportamentali che caratterizzano il comportamento collettivo del sistema. I modelli di simulazione ad agenti sono classificati tra i modelli di microsimulazione, ma con un'interpretazione dei fenomeni macroscopica (Nagel e Koll-Schretzenmayr, 2007).

I modelli di simulazione possono essere classificati anche in base al meccanismo di aggiornamento dello stato del sistema. L'avanzamento del tempo può essere definito **per intervalli fissi** (*unit-time*), nel caso in cui il tempo simulato sia incrementato di una quantità fissa Δt . Si parla invece di avanzamento del tempo **per eventi** (*event-driven*), nel caso l'intervallo di tempo sia incrementato solo all'occorrenza dell'evento successivo. Si hanno in questo caso incrementi irregolari (Figura 3.2), con il vantaggio però che il simulatore non considera i periodi di inattività (assenza di eventi).

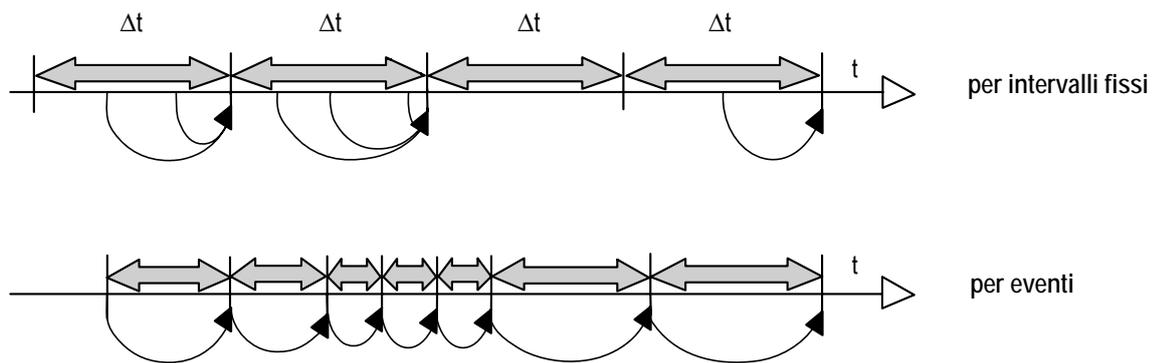


Figura 3.2: Avanzamento del tempo in una simulazione

Software di simulazione

Sulla base delle diverse teorie modellistiche, sono stati creati e implementati svariati software di simulazione a supporto della pianificazione strategica dei trasporti. Un **software di simulazione** è un insieme integrato di modelli matematici che consente di simulare e prevedere il comportamento di un sistema e, nel caso specifico, di un sistema di trasporto. Di norma, un software di simulazione opera su dati alfanumerici restituendo come output ancora dati alfanumerici. Per ovviare a questo limite, alcuni software di simulazione interagiscono con software grafici per consentire la visualizzazione dei risultati in formati differenti dalla sola forma alfanumerica.

Qui di seguito, si riportano alcune considerazioni e alcuni esempi di software (Tabella 3.2) che hanno preceduto e che hanno portato alla definizione di MATSim-T, il software di simulazione adottato in questo lavoro.

Come abbiamo visto nella sezione precedente, i **modelli di microsimulazione** tendono a spiegare la dinamica di ogni veicolo presente nella rete, al fine di simulare il comportamento delle singole unità (utente del sistema) e le eventuali interazioni tra i soggetti. Questi modelli cercano di simulare il maggior numero possibile di fenomeni legati al traffico, tra i quali il comportamento dei singoli veicoli in base al veicolo che li precede (*car-following*), il comportamento associato al cambio di corsia (*lane changing*) o l'attenzione all'attraversamento degli incroci (*gap acceptance*). A questi, si aggiungono ancora i modelli di simulazione della salita e discesa da rampe e sottopassi (*on e off ramp*) e quelli di modellizzazione dei cambi di corsia in funzione delle svolte (*look ahead*).

Numerosi modelli di simulazione sono stati concepiti e calibrati nell'ambito della ricerca informatica e trasportistica di varie università, soprattutto tedesche e inglesi, per poi essere adottati, almeno in parte, per alcuni software commerciali. Tra gli esempi di software di microsimulazione più utilizzati presenti sul mercato, troviamo AIMSUN, MITSIM, PARAMICS e VISSIM.

Un ulteriore approccio microscopico è rappresentato dalla simulazione *ad automi cellulari*, dove ogni singola cella dell'automata rappresenta un segmento della strada, normalmente occupata da un solo veicolo. Un importante esempio di software che utilizza questo approccio è rappresentato da TRANSIMS (TRANSIMS homepage, Nagel *et al.* 1998).

| Software | Ente sviluppatore | Referenza |
|-----------|---|---|
| AIMSUN | Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona | http://www.aimsun.com/site/ |
| MITSIM | Massachusetts Institute of Technology, Stati Uniti | http://mit.edu/its/mitsimlab.html |
| TRANSISMS | Los Alamos National Laboratori, Stati Uniti | http://transims.tsasa.lanl.gov/ |
| VISSIM | PTV System Software and Consulting GMBH, Germania | http://www.vissim.com/ |
| PARAMICS | The Edinburgh Parallel Computing Centre and SIAS Ltd, Regno Unito | http://www.paramics.com/ |

Tabella 3.2: Alcuni esempi di software di microsimulazione

Tra i software che adottano invece un **approccio mesoscopico** si possono citare, a titolo di esempio, i modelli METROPOLIS (De Palma e Marchal, 2002), DynaMIT, DYNASMART, DYNEMO e ORIENT/RV.

Tipi di dati utilizzati

La varietà degli approcci descritti, mette chiaramente in evidenza il problema della fonte dei dati da utilizzare nella simulazione. Spesso è difficile poter decidere a cosa dare priorità, se alla reperibilità dei dati o alla scelta dell'approccio modellistico. Nuove intuizioni teoriche sul comportamento del sistema da analizzare possono, infatti, stimolare la ricerca di nuove tecniche di raccolta dati, mentre la raccolta di nuovi dati può suggerire agli esperti del settore un adattamento e un arricchimento dell'approccio da loro adottato (Axhausen, 2000). È inoltre evidente, che la significatività della simulazione dei flussi di traffico dipende in grande misura dalla significatività dei dati utilizzati. Qui di seguito, si riportano i tipi di dati più comunemente utilizzati per la pianificazione dei trasporti e le relative modalità di rilevazione dei dati.

- Inventari di oggetti derivanti da osservazioni, per esempio l'ubicazione e la proprietà di un collegamento stradale (nodo di partenza, nodo di arrivo, lunghezza, numero di corsie, presenza di un parcheggio, ecc.), il percorso e le caratteristiche di un servizio di trasporto pubblico (orari, fermate servite, frequenza del servizio, il tipo di veicolo, ecc.) o l'offerta dei servizi di una zona.
- Censimenti di persone o imprese, ottenuti per lo scopo specifico da fonte diretta oppure da statistiche contenute in registri o da censimenti con scadenza pluriennale.
- Dati comportamentali sulle preferenze rilevate (indicate con l'abbreviazione RP dall'inglese *Revealed Preferences*), ottenuti indagini relative ai comportamenti effettivamente rilevati dagli utenti in un contesto reale ("cosa ha fatto?").



- Dati sulle abitudini dei viaggiatori, ottenuti da questionari posti direttamente ai viaggiatori.
- Dati comportamentali sulle preferenze dichiarate (indicate con l'abbreviazione SP dall'inglese *Stated Preferences*), ottenuti da indagini relative ai comportamenti dichiarati dagli utenti in contesti ipotetici (“cosa farebbe se?”).

Utilizzo del microsimulatore MATSim-T

Per lo svolgimento di questo lavoro sono stati utilizzati i dati di uscita prodotti dal simulatore MATSim-T (www.matsim.org). A seguito della breve introduzione sui diversi approcci alla simulazione nel settore dei trasporti, in questa sezione si presentano le caratteristiche proprie del simulatore, al fine di descrivere la struttura dei dati da esso generati e di introdurre la parte inerente il loro trattamento.

Descrizione tecnica

MATSim-T (*Multi-Agent Transportation SIMulation Toolkit*) è un simulatore sviluppato dall'Istituto di Pianificazione dei Trasporti del Politecnico di Zurigo (IVT, Eth, Zurigo) e dall'Istituto di Pianificazione dei Sistemi di Trasporto e di Telematica di Berlino (TU, Berlino). MATSim-T propone un **modello di simulazione dinamica** della circolazione stradale, basato su un **approccio ad agenti** (*agent-based*), in grado di offrire **scenari di traffico veicolare su larga scala** (Raney e Nagel, 2005).

Per le sue caratteristiche, MATSim-T viene più propriamente posto come via di mezzo tra l'approccio mesoscopico e quello microscopico ad automi cellulari (Charypar, Axhausen e Nagel, 2007), trattandosi di un simulatore di reti *queue-based* a eventi discreti (vedi Balmer, 2007).

In linea generale, ricordiamo che lo studio degli spostamenti richiede l'analisi di numerosi elementi coinvolti nel fenomeno, tra cui la tipologia di utenti che si spostano, il motivo dello spostamento, l'origine e la destinazione dello spostamento, l'istante temporale di inizio e fine dello spostamento e il modo di trasporto utilizzato.

Nel caso di MATSim-T, gli input del modello sono da un lato il sistema di offerta rappresentato dalla rete stradale e dall'altro la domanda di trasporto generata dai piani di attività dei singoli agenti. Oggetto della simulazione è una popolazione sintetica di agenti (*synthetic population*), generata nella prima fase del processo di simulazione, che svolge delle attività sull'arco delle 24 ore. Gli agenti rappresentano le entità che svolgono delle azioni indipendentemente l'uno dall'altro all'interno del sistema. Per ogni agente esiste un certo numero (positivo e finito) di possibili piani di attività, che sono salvati nella cosiddetta banca dati degli agenti (*agent database*). A ogni iterazione della simulazione, un

algoritmo di selezione sceglie per ogni agente un piano di attività tra le alternative offerte, cercando quella di massima utilità (Figura 3.3).

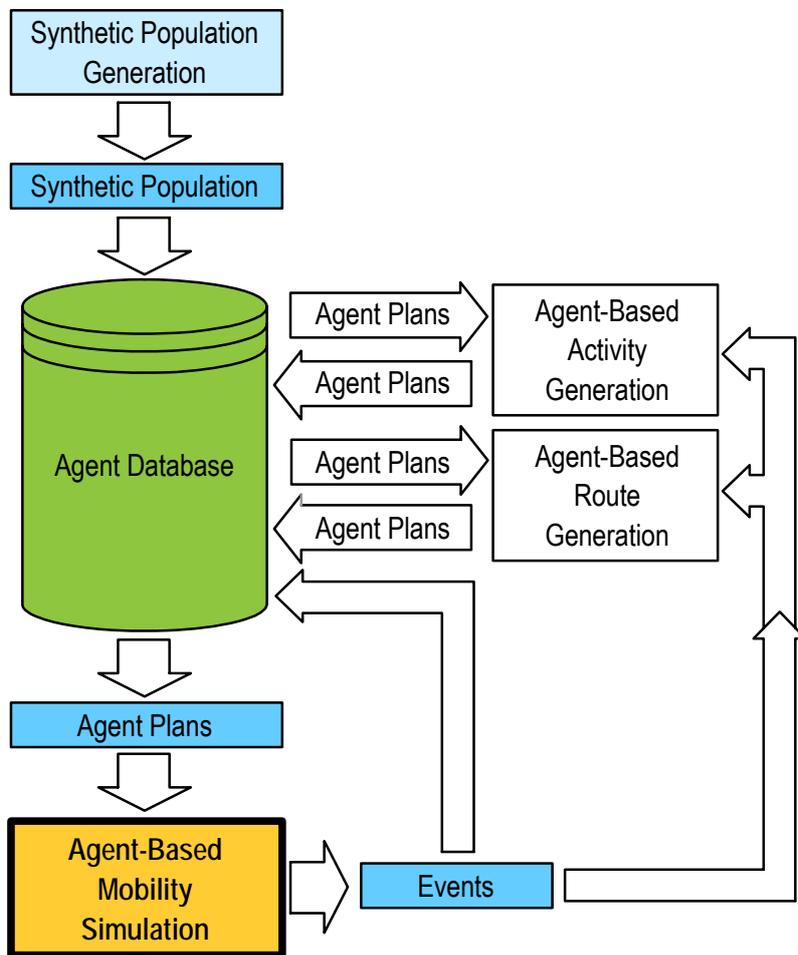


Figura 3.3: Rappresentazione schematica di MATSim-T (versione adattata da Balmer, 2007)

L'output del simulatore è dato invece da una tabella di eventi prodotta dalle attività degli agenti, dove sono listati gli eventi ordinati cronologicamente e per singolo agente.

In MATSim-T, i *files* di input e di output sono tutti scritti in formato XML¹ e, qui di seguito, se ne riporta una loro descrizione.

¹ XML (eXtensible Markup Language, ovvero «Linguaggio di marcatura estensibile») è un metalinguaggio per definire la struttura di documenti e dati. Questo sistema garantisce che i dati siano disponibili con una struttura semplice e accessibili in qualsiasi tipo di applicazione.

Il sistema di offerta

La rete stradale utilizzata da MATSim-T è descritta ricorrendo alla teoria dei grafi. Come esposto nel secondo capitolo, il grafo schematizza la rete di trasporto attraverso una combinazione di archi e di nodi, dove gli archi rappresentano tratte stradali dalle caratteristiche omogenee e i nodi rappresentano gli incroci tra le varie strade oltre che agli estremi di tratte omogenee di una stessa strada. In Figura 3.4, è riportato un breve esempio di file XML (*net.xml*) utilizzato per la descrizione del sistema di offerta.

```
<network>
  <nodes>
    <node id="1" x="0.0" y="0.0" />
    <node id="2" x="80.0" y="0.0" />
    ...
  </nodes>
  <links cpperiod="01:00:00">
    <link id="100" from="1" to="2" length="90.0" freespeed="7.5"
      capacity="1800.0" permlanes="1" oneway="1" />
    <link id="101" from="2" to="3" length="90.0" freespeed="7.5"
      capacity="1800.0" permlanes="1" oneway="1" />
    ...
  </links>
</network>
```

Figura 3.4: File XML del sistema stradale (Balmer, 2007)

I nodi sono individuati dalle coordinate spaziali X e Y e da una chiave identificativa; gli archi oltre alle informazioni geometriche e topologiche, contengono le principali caratteristiche funzionali per la circolazione (Tabella 3.3).

| Attributo | Descrizione |
|-----------|---|
| link id | ID dell'arco |
| from | ID del nodo di origine |
| to | ID del nodo di destinazione |
| length | lunghezza dell'arco in metri, questo valore può essere maggiore della lunghezza topologica |
| freespeed | velocità media a flusso nullo (m/s) |
| capacity | capacità di riferimento, il numero massimo di veicoli per unità di tempo che si possono muovere sull'arco |
| permlanes | numero di corsie |
| oneway | sensi di marcia |

Tabella 3.3: Attributi del file net.xml

La rete stradale impiegata per questo studio è stata sviluppata, per quel che riguarda i collegamenti svizzeri, dall'Ufficio federale dello sviluppo territoriale (ARE) e successivamente integrata con i principali collegamenti europei ottenuti grazie a uno studio relativo ai corridoi ferroviari di transito (Vrtic *et al.*, 2003). La rete comprende 60'492 archi e 24'180 nodi (Figura 3.5).



Figura 3.5: Rete stradale IVT (Eth, Zurigo) impiegata nella simulazione esaminata in questo lavoro

I dati sulla popolazione e i piani delle attività giornaliere

La popolazione di agenti necessaria per un modello microscopico implica un livello di disaggregazione dei dati maggiore rispetto a quello necessario per i modelli di trasporto convenzionali. Dal momento che il vantaggio principale della microsimulazione sta nel poter simulare il movimento e le traiettorie dei singoli individui, è chiaro che i dati riguardanti la popolazione devono essere noti e completi a livello di singolo agente. Per

-
-
-
-
-

una popolazione di agenti realistica e verosimile, i dati devono contenere, oltre a informazioni relative alle attività giornaliere, anche informazioni socio-demografiche, quali età, sesso, reddito, residenza, ecc.

Tuttavia, questi dati non sempre esistono e, nel caso siano disponibili, non tutti gli elementi utili alla simulazione sono contenuti nello stesso set di dati. Spesso, quando il quadro individuale di informazioni è completo, la copertura territoriale è limitata; viceversa, a una copertura territoriale maggiore, raramente corrisponde una completa ed esaustiva informazione individuale (Frick e Axhausen, 2003).

Questo problema solleva la questione di come generare un'adeguata popolazione di agenti per la microsimulazione. Nel caso di MATSim-T, per la generazione della popolazione sintetica, sono state utilizzate due fonti di dati principali, il **Censimento Federale della Popolazione** (CFP, 2000), svolto dall'Ufficio federale di statistica (UST) e il **Microcensimento del 2005**, svolto dagli Uffici federali dello sviluppo territoriale (ARE) e di statistica (UST). La popolazione sintetica è stata inizialmente generata sulle basi del campione più rappresentativo (CFP, 2000) e, successivamente, gli attributi mancanti sono stati aggiunti grazie alle informazioni contenute nei dati del Microcensimento, utilizzando modelli logit (possesso della vettura, licenza di guida, professione, ecc.). Un'ulteriore integrazione informativa è stata offerta dalle matrici dei movimenti pendolari.

Ricordiamo che il censimento federale è un'indagine demografica, che comprende tutto il territorio svizzero e viene realizzato ogni dieci anni. Ogni singolo individuo della popolazione residente in Svizzera, circa 7,5 milioni di persone, è censito. Oltre alle variabili demografiche classiche, sono raccolte anche le informazioni riguardanti la professione appresa ed esercitata, l'attuale attività e posizione professionale, il luogo di lavoro/di formazione e il relativo tragitto, i mezzi di trasporto utilizzati e il tempo impiegato per raggiungerlo.

Pur essendo le informazioni fornite dal censimento federale numerose, i dati sono stati integrati con quelli del Microcensimento, in quanto più specificatamente mirato allo studio del comportamento della popolazione nel traffico. In questo caso, infatti, un campione d'inchiesta rappresentativo della popolazione residente è intervistato telefonicamente su differenti aspetti della mobilità. Questi dati suggeriscono spesso informazioni fondamentali per la creazione della popolazione sintetica.

Ottenuti i dati riguardanti la popolazione, si possono ricostruire e mappare le possibili attività di un territorio, elementi determinanti per l'analisi delle dinamiche di spostamento all'interno e tra le zone di traffico. Nel caso di MATSim-T, le informazioni riguardanti i singoli agenti e la descrizione delle attività giornaliere potenzialmente pianificate sono contenute nel file *plan.xml*.

Il contenuto del file riportato in Figura 3.6 descrive un agente caratterizzato da ID = 1, di sesso femminile, età 20 anni, titolare di patente di guida, senza auto e impiegato. All'inizio della simulazione (00.00), l'agente si trova presso la sua abitazione (arco 102), dove vi rimane fino alle 8.00, quando si reca a fare shopping per 4 ore sull'arco 100, attraversando i nodi 12 e 1.

```

<person id="1" sex="f" age="20" license="yes"
  car_avail="never" employed="yes">

<plan score="80.38" selected="yes">
  <act type="home" link="102" start_time="00:00:00"
    dur="08:00:00" end_time="08:00:00" />
  <leg num="0" mode="car" <route> 12 1 </route>
</leg>
  <act type="shop" link="100" start_time="08:00:00"
    dur="04:00:00" end_time="12:00:00" />
  <leg num="1" mode="car" <route> </route>
</leg>
  <act type="work" link="100" start_time="12:00:00"
    dur="04:00:00" end_time="16:00:00" />
  <leg num="2" mode="car" <route> 2 3 </route>
</leg>
  <act type="home" link="102" start_time="16:00:00"
    dur="04:00:00" end_time="20:00:00" />
  <leg num="3" mode="car" <route> 4 9 10 11 </route>
</leg>
  <act type="home" link="102" start_time="20:00:00"
    dur="04:00:00" end_time="24:00:00" />
</plan>
</person>
  
```

Figura 3.6: Esempio di file *plan.xml* (Balmer, 2007)

Ai diversi piani di attività attribuiti a ciascun agente è assegnato un valore di preferenza (*plan score*), che permette di ottenere output diversi. Il valore di preferenza è calcolato utilizzando una funzione di utilità (*scoring function*) che tiene conto di diversi aspetti, tra i quali l'utilità dello spostamento, l'utilità di svolgere una determinata attività, i tempi di sosta tra i singoli spostamenti e le attività svolte.

Esistono al momento cinque tipi di attività simulate (stare a casa, lavoro, formazione, shopping e tempo libero) e, anche se il modello prevede un trasporto multimodale (a piedi, bicicletta, trasporti pubblici e trasporto motorizzato privato), solo il traffico stradale privato (motorizzato e non) era incluso come modalità di trasporto al momento della simulazione oggetto di studio.

La tabella eventi

La tabella degli eventi prodotta dalla simulazione descrive per ogni istante della simulazione la posizione di ogni singolo agente lungo la rete stradale e il tipo di attività svolta. Gli attributi che caratterizzano l'evento sono contenuti in Tabella 3.5.

Ogni evento è distinto da una collocazione temporale precisa nell'arco delle 24 ore (*T_GBL*), dalla chiave identificativa dell'agente che opera l'azione (*VEH_ID*), dal tipo di attività svolta (lavoro, svago, casa ecc.) e dal tipo di azione (*EVENT_FLAG*, *DESCRIPTION*). In Tabella 3.6 sono riportate le diverse possibili azioni svolte da un agente.



| Attributo | Descrizione |
|--------------|--|
| T_GBL | tempo espresso in secondi |
| VEH_ID | ID dell'agente |
| LEG_NR | percorso giornaliero dell'agente |
| LINK_ID | ID dell'arco dove si trova l'agente |
| FROM_NODE_ID | ID del nodo di partenza |
| EVENT_FLAG | codice identificativo dell'attività svolta |
| DESCRIPTION | descrizione dell'attività svolta |

Tabella 3.5: Attributi della tabella eventi

| Tipo di evento | Codice | Traduzione |
|--|--------|-----------------------------|
| departure | 6 | partenza |
| wait2link | 4 | attesa di entrata sull'arco |
| left link | 2 | allontanarsi dall'arco |
| entered link | 5 | entrata sull'arco |
| vehicle got stuck and is aborting its plan | 3 | abbandono del percorso |
| arrival | 0 | arrivo a destinazione |

Tabella 3.6: Tipi di azione svolta

Interpretare correttamente il tipo di azione svolta dal singolo agente (attesa, entrata sull'arco, arrivo, ecc.) è di centrale importanza per la comprensione delle analisi post-simulazione effettuate. Come è possibile notare dalla raffigurazione delle azioni schematizzate in Figura 3.7, solamente gli eventi “*wait2link*” (per l'arco con ID=2248) e “*entered link*” (per l'arco con ID=2255) corrispondono all'entrata reale sull'arco e non l'evento “*departure*”, come potrebbe invece essere suggerito dal nome.

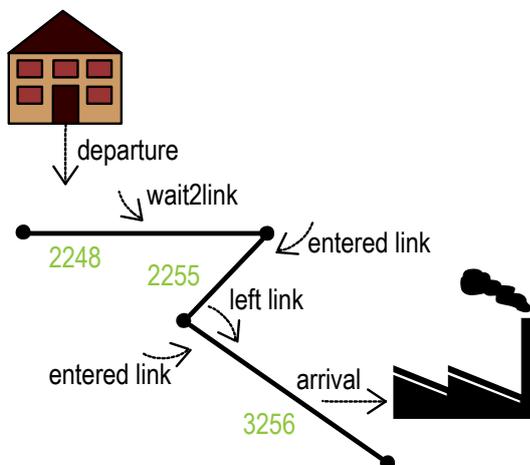


Figura 3.7: Illustrazione delle azioni svolte da un agente nel tragitto casa-lavoro

In Figura 3.8A si riportano alcune righe estratte da una tabella eventi, dove sono elencate le attività di un solo agente (VEH_ID = 636294), seguite dalla rispettiva visualizzazione dei suoi spostamenti su carta topografica (Figura 3.8B).

| T_GBL | VEH_ID | LINK_ID | FROM_NODE | EVENT_FLAG | DESCRIPTION |
|-------|--------|---------|-----------|------------|--------------|
| 24853 | 636294 | 2248 | 1088 | 6 | departure |
| 24853 | 636294 | 2248 | 1088 | 4 | wait2link |
| 24854 | 636294 | 2248 | 1088 | 2 | left link |
| 24854 | 636294 | 2255 | 1089 | 5 | entered link |
| 24901 | 636294 | 2255 | 1089 | 2 | left link |
| 24901 | 636294 | 3195 | 1131 | 5 | entered link |
| 25170 | 636294 | 3195 | 1131 | 0 | arrival |
| 36361 | 636294 | 3195 | 1131 | 6 | departure |
| 36361 | 636294 | 3195 | 1131 | 4 | wait2link |
| 36362 | 636294 | 3195 | 1131 | 2 | left link |
| 36362 | 636294 | 3256 | 1183 | 5 | entered link |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Figura 3.8A: Tabella di eventi

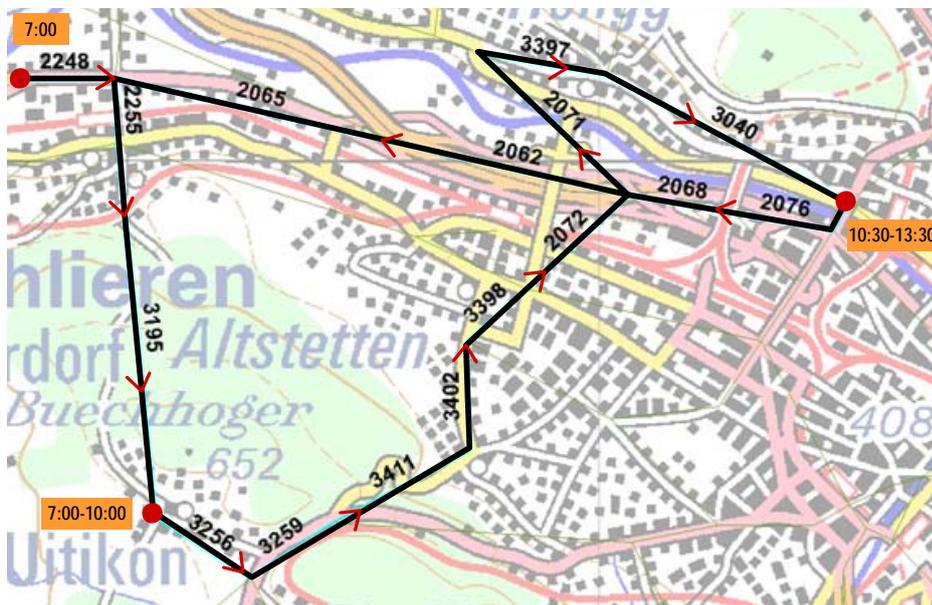


Figura 3.8B: Raffigurazione su carta topografica 1:200'000 (Swisstopo)

In base al numero degli agenti che partecipano alla simulazione, la tabella eventi può raggiungere dimensioni importanti. Per fare un esempio, se consideriamo la regione di Zurigo e le attività giornaliere di circa 580'000 agenti, è prodotto un file di eventi con più di 20 milioni di *records*.

I GIS come strumento di visualizzazione e di analisi della mobilità

Finalità dell'analisi post-simulazione

Come già più volte sottolineato, le simulazioni, soprattutto quelle che adottano un approccio microscopico, producono un grandissimo numero di dati che spesso mancano di adeguati metodi di analisi e di un'esaustiva rappresentazione grafica. Anche nel caso di MATSim-T, allo stato attuale non esiste un modulo di analisi e di visualizzazione grafica dei risultati. Per tale motivo, la gestione e l'interpretazione dei dati generati dal simulatore hanno rappresentato l'aspetto fondamentale di questa parte del lavoro, che ha avuto come scopo quello di ottenere, grazie agli strumenti di analisi tipici di un sistema informativo territoriale, risultati numerici e grafici sia livello di singolo segmento stradale che di "area complessiva" (aggregazione dell'informazione).

Come abbiamo avuto modo di vedere nel secondo capitolo, una piattaforma GIS rappresenta una soluzione efficace per questo tipo di problemi. Essa garantisce, grazie alla strutturazione dei dati, un efficiente collegamento tra i dati e il sistema di riferimento spaziale e consente l'inserimento e la manipolazione di dati a differenti livelli di aggregazione.

Grazie all'uso di tecniche GIS, si possono analizzare e visualizzare i risultati delle simulazioni offrendo un valido controllo della qualità dei dati input e output del modello e fornendo informazioni funzionali a una successiva calibrazione dello stesso. L'analisi numerica, combinata con la visualizzazione dell'informazione permette di mettere in evidenza aspetti che sono difficilmente rilevabili usando approcci puramente numerici (Wang, 2005).

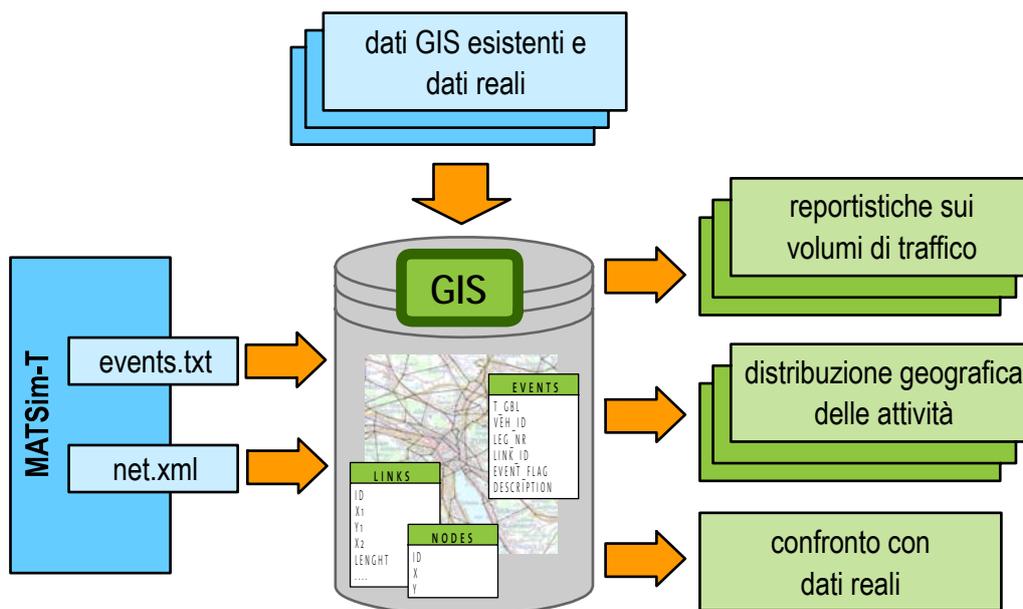


Figura 3.9: Schema dell'analisi post-simulazione

In accordo con lo schema illustrato in Figura 3.9, i prerequisiti per l'analisi post-simulazione proposta sono la strutturazione dei dati e la loro acquisizione, seguite solo in un secondo momento dalla fase di analisi. Tra i dati da strutturare nello schema concettuale figurano i dati relativi alla rete stradale, i dati prodotti dal simulatore e alcuni geodati preesistenti, al fine di garantire un inquadramento territoriale.

L'obiettivo finale è stato quello di ricostruire il movimento dei cittadini sul territorio e le loro preferenze, specie nelle ore in cui si concentrano gli spostamenti del tipo casa-lavoro e lavoro-casa, ricostruendo il quadro della mobilità sul territorio (visione di insieme del fenomeno traffico e mobilità giornaliera).

Costruzione del modello logico

Il progetto è interamente basato sulla piattaforma ESRI, dove si è creata una banca dati centralizzata (ArcSDE-Oracle), che permette di lavorare in un ambiente di multiutenza. Si ricorda che ArcSDE fornisce un'interfaccia alle banche relazionali e, nel caso specifico, consente ad ArcGIS di gestire le informazioni geografiche contenute in una banca dati Oracle.

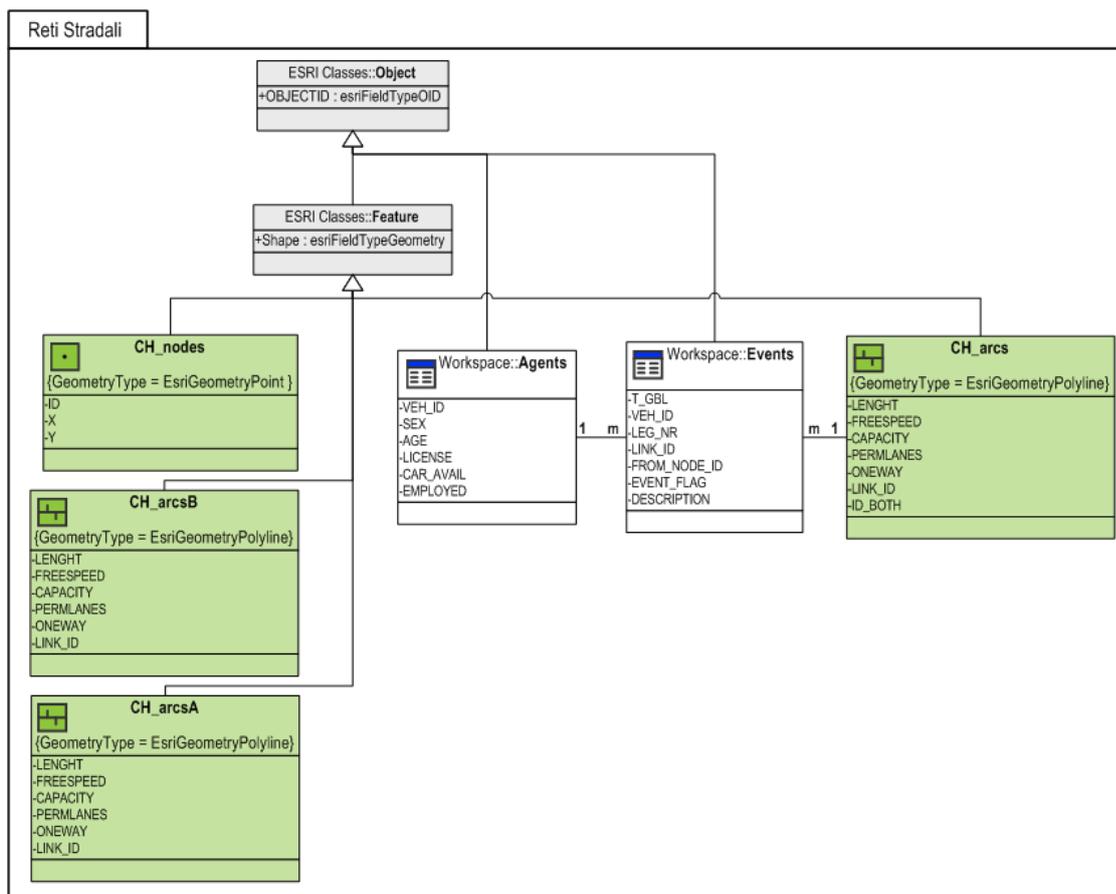


Figura 3.10: Modello concettuale della rete stradale costruito in Microsoft VISIO



In Figura 3.10 è raffigurato lo schema concettuale successivamente tradotto in schema logico nella banca dati ArcSDE-Oracle.

Nella fase di acquisizione dei dati, dai *files* in formato XML sono state ricavate le tabelle da integrare in ambiente GIS.

È da sottolineare il fatto che i segmenti stradali utilizzati da MATSim-T sono quasi tutti bidirezionali, rappresentati cioè da due archi geometricamente coincidenti, in quanto percorribili in entrambe le direzioni. Per poter visualizzare separatamente le due direzioni e gli attributi che caratterizzano ogni arco, nel modello di raffigurazione grafica si sono assegnati agli archi un valore di *offset* che permette di raffigurare in modo distinto i segmenti stradali (Figura 3.11) e una freccia direzionale per indicare il senso di marcia.

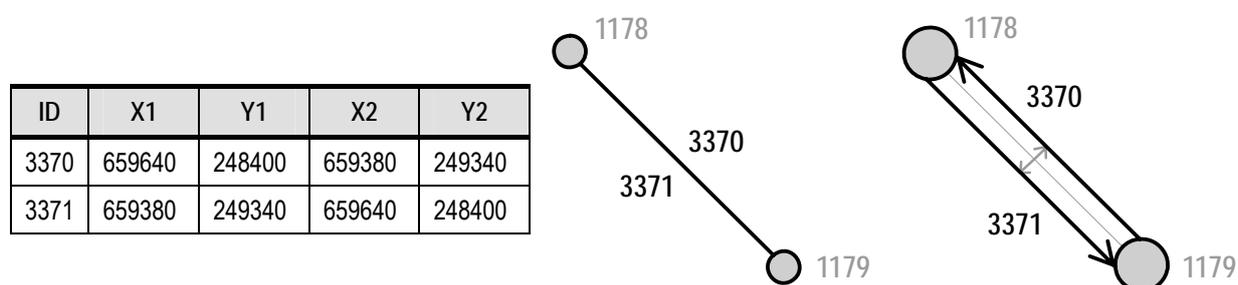


Figura 3.11: Rappresentazione degli archi bidirezionali

Distribuzione del volume dei flussi di traffico

Sfruttando le capacità di analisi spaziale offerte dai GIS si è stati in grado di elaborare analisi riguardanti i flussi veicolari. Il volume dei flussi di traffico è definito come il numero totale di veicoli che passano attraverso la sezione di un dato arco stradale in un determinato intervallo temporale.

Utilizzando i dati relativi all'intera giornata contenuti nella tabella eventi, si possono ottenere reportistiche dettagliate, consentendo un monitoraggio costante del traffico simulato.

Il **livello di aggregazione spaziale** dell'informazione varia in base alla scala di rappresentazione scelta. I volumi di traffico possono essere rappresentati per senso di marcia, a livello di singolo arco (si riporta in questo caso il valore massimo tra i due sensi di marcia) o aggregati a livello di unità amministrativa (comuni e cantoni) (Figura 3.12). In questo modo, si è in grado di derivare il valore puntuale relativo a un tratto stradale oppure alcuni valori aggregati che offrono un quadro completo del territorio.

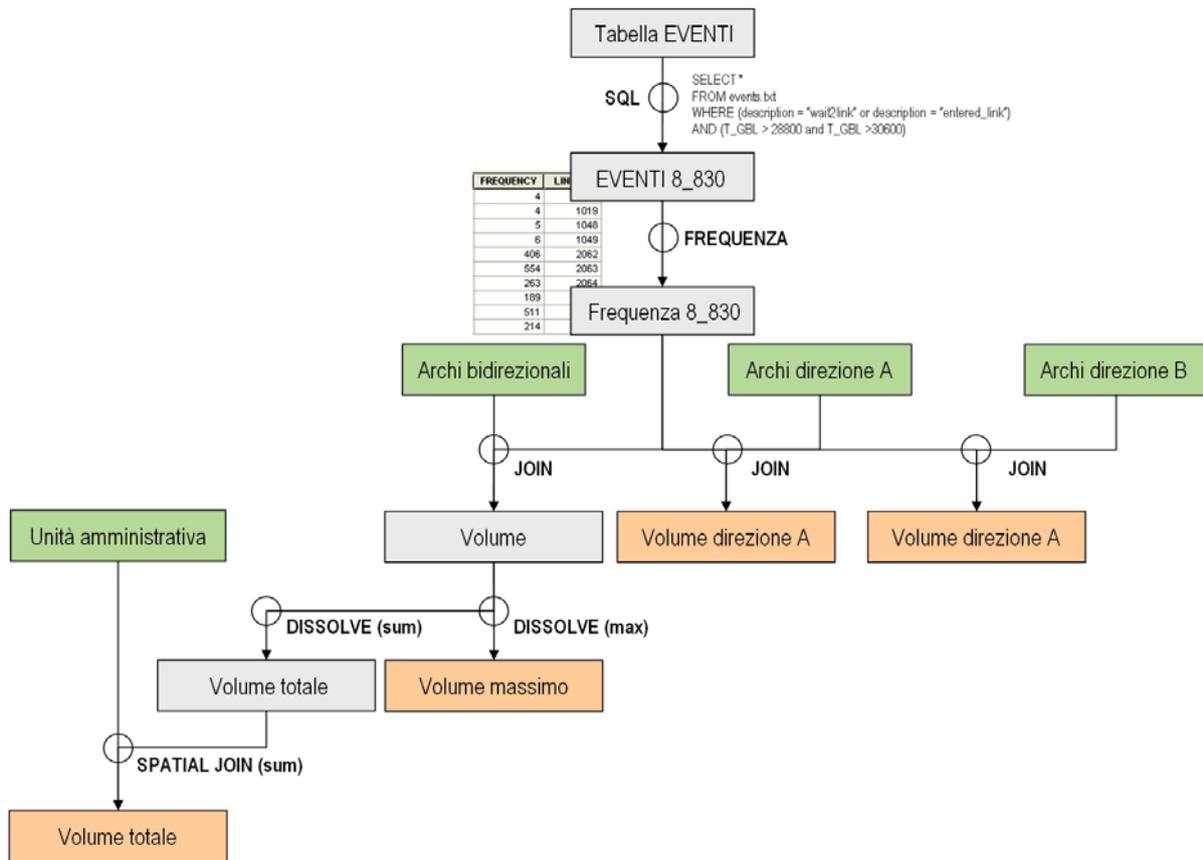


Figura 3.12: Esempio di diagramma di flusso per il calcolo del volume dei flussi di traffico tra le 8.00 e le 8.30

Per un conteggio corretto degli agenti transitanti in un dato intervallo di tempo su un determinato arco, si è impostata l’interrogazione tematica selezionando solo le azioni di attesa di entrata (“*wait2link*”) e quelle di entrata sull’arco (“*entered_link*”).

```

SELECT *
FROM events.txt
WHERE (description = "wait2link" or description = "entered_link")
    
```

Con questo risultato intermedio si può calcolare il valore della frequenza dei transiti (numero di agenti per arco) e successivamente, grazie a un’operazione di *join* tematico, si può riferire tale valore ai singoli archi.

Per ottenere il valore massimo o la somma del volume di traffico tra le due direzioni, si esegue un’operazione di *dissolve*. La chiave identificativa comune degli archi (ID_comune) è scelta come attributo rispetto al quale si associano gli archi bidirezionali (Figura 3.13).

| ID | X1 | Y1 | X2 | Y2 | ID_comune | Frequenza |
|------|--------|--------|--------|--------|-----------|-----------|
| 3370 | 659640 | 248400 | 659380 | 249340 | 337000 | 525 |
| 3371 | 659380 | 249340 | 659640 | 248400 | 337000 | 163 |

Valore massimo = 525
Somma = 688

Figura 3.13: Diagramma di flusso per il calcolo del volume dei flussi di traffico

Per ottenere il valore riferito alle unità amministrative si procede con un'operazione di *join* spaziale, che permette di associare all'unità amministrativa le informazioni tematiche (volume totale) degli archi in essa contenuti.

Il gruppo di analisi appena descritto permette di creare carte tematiche dei volumi di traffico, dove l'intervallo minimo di **aggregazione temporale** è variabile e si definisce grazie a un'interrogazione tematica ($T_GBL > 28800$ and $T_GBL > 30600$). Intervalli di 30 minuti e di un'ora sono i più verosimili e utilizzati, anche per mantenere una coerenza con il concetto di capacità di una sezione stradale (riferita a intervalli di 60 minuti).

```
SELECT *
FROM events.txt
WHERE (description = "wait2link" or description = "entered_link")
AND (T_GBL > 28800 and T_GBL >30600)
```

La possibilità di visualizzare i volumi di traffico in relazione ai diversi orari della giornata e con gradi di dettaglio diversi, consente di avere più prospettive del fenomeno traffico.

Con l'ausilio di queste carte tematiche, si riescono a identificare zone con funzioni logistiche importanti e zone di alta congestione, ottenendo informazioni utili per la pianificazione del traffico (Figura 3.14). Si può calcolare, ad esempio, il numero di veicoli transitanti nelle ore di punta su determinati segmenti stradali, come il mattino tra le 8 e le 9 verso Zurigo o la sera tra le 17 e le 18 nella direzione opposta.

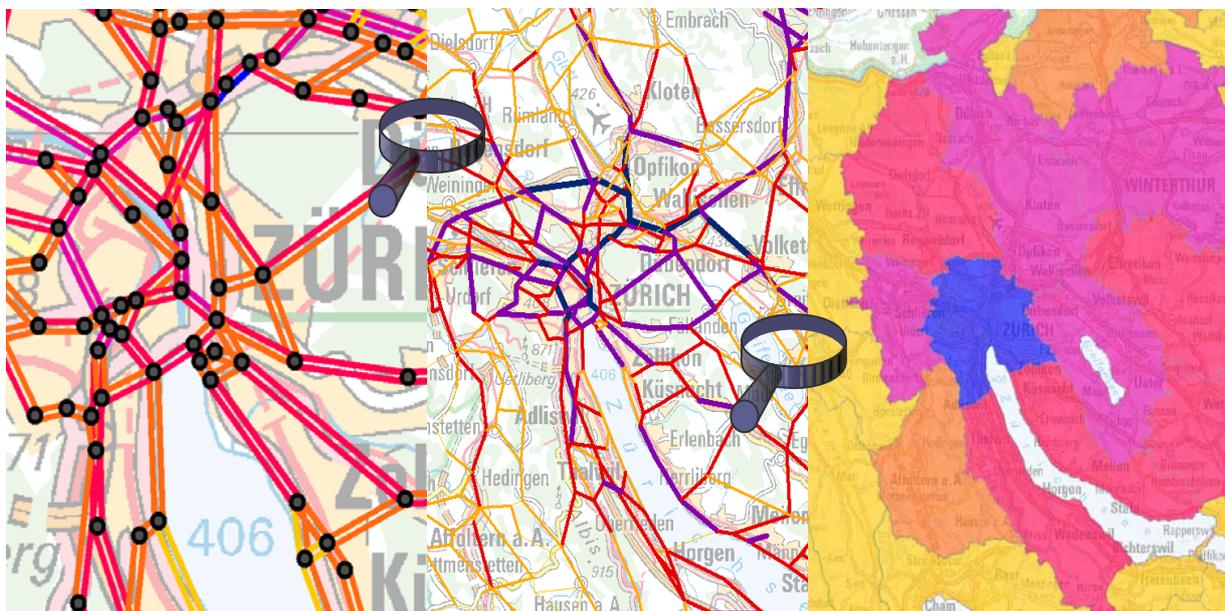


Figura 3.14: Volumi dei flussi di traffico con livelli di aggregazione spaziale diversi

L'analisi a ragnatela (*spider analysis*)

Come già accennato nel secondo capitolo, le matrici origine/destinazione (O/D) sono uno degli strumenti classici e di ampio utilizzo per stimare gli spostamenti, la loro distribuzione tra determinate zone di traffico e la relativa ripartizione spazio-temporale. Esse definiscono il collegamento, ossia il segmento tra il luogo d'origine e quello di destinazione e il modo di trasporto utilizzato, oltre che alla fascia oraria dello spostamento a cui appartiene il segmento.

Un nuovo e interessante mezzo per la stima degli spostamenti è dato dalla raffigurazione degli spostamenti legati esclusivamente a una singola zona di transito, la cosiddetta "analisi a ragnatela". Questo tipo di analisi non è ancora di uso comune, ma è in grado di suggerire considerazioni sui flussi di traffico complementari a quelle già note. Essa **permette di ricostruire le provenienze dei flussi di traffico verso e in partenza da particolari punti di congestione**.

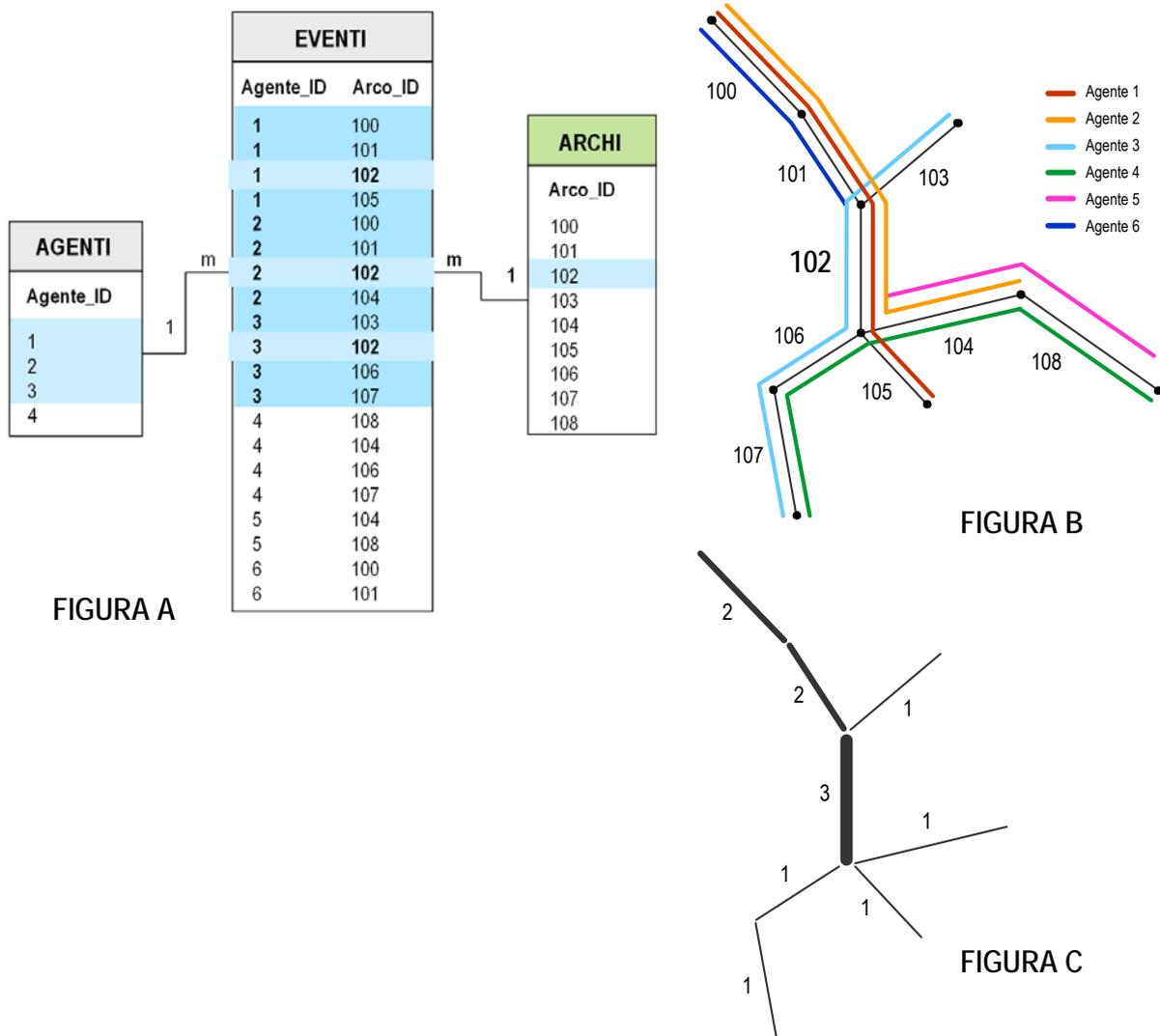


Figura 3.15: Schematizzazione dell'analisi a ragnatela per l'arco con ID=102



Se prendiamo come esempio le tabelle in Figura 3.15A, si nota come, grazie alle relazioni 1-m esistenti tra le tabelle, sia possibile risalire ai movimenti degli agenti transitanti esclusivamente sull'arco 102 in un determinato intervallo di tempo. Nella raffigurazione 3.15C che ne segue, si può osservare come i movimenti degli agenti 4, 5 e 6 non siano in questo modo presi in considerazione e, di conseguenza, l'arco 108 non è disegnato come parte integrante della ragnatela.

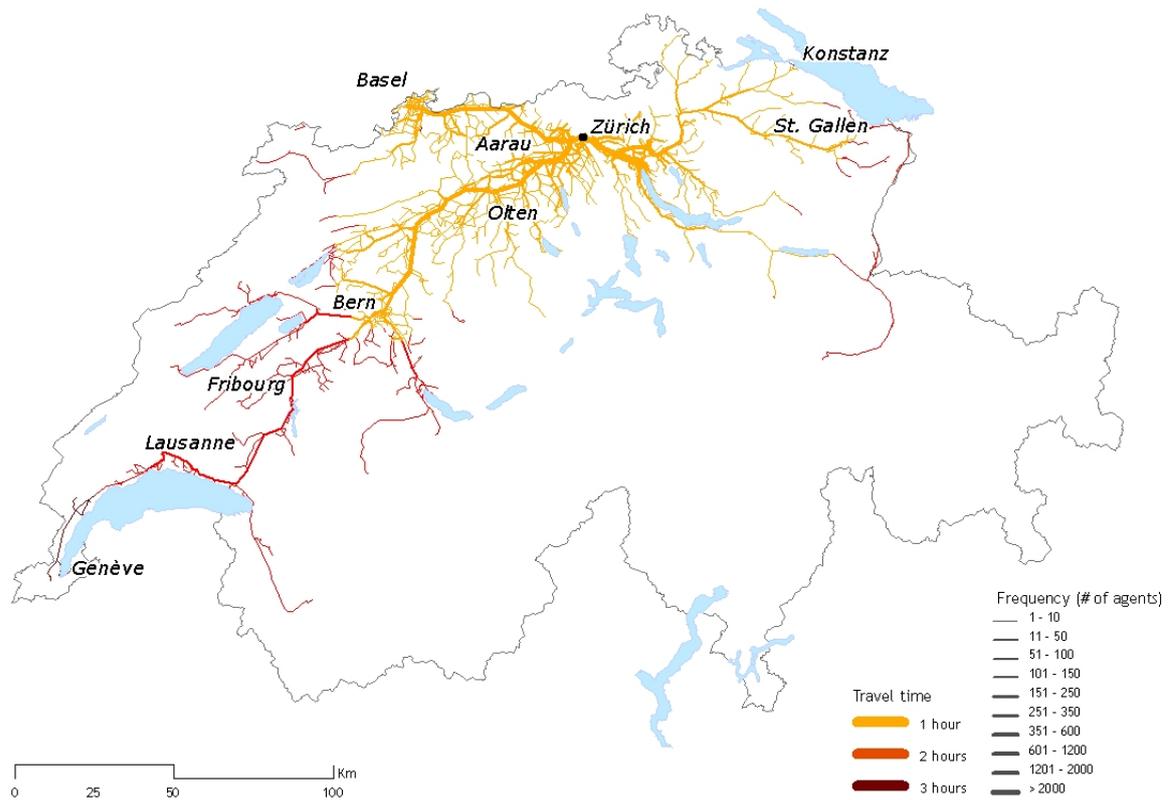


Figura 3.16: Esempio di analisi a ragnatela

Nell'esempio illustrato in Figura 3.16, si è voluta raffigurare l'analisi a ragnatela relativa al flusso di traffico in entrata verso Zurigo simulato al Tunnel del Baregg, nell'intervallo tra le 8.00 e le 9.00 di mattina.

Distribuzione geografica delle attività

Utilizzando l'informazione riguardante le attività svolte dai singoli agenti, si è potuta visualizzare la distribuzione spaziale delle attività lavorative sull'intero territorio svizzero, ponendo particolare attenzione ai piani di spostamento casa-lavoro (tragitti dei pendolari), indipendentemente dall'intervallo di tempo considerato. Si è cercato di rispondere a domande del tipo “dove lavorano le persone che vivono nel cantone di San Gallo?” o “dove vanno a fare la spesa le persone che vivono nella zona più ricca di Zurigo?”.

Nella tabella eventi grazie a un'interrogazione tematica si è in grado di mettere in evidenza gli archi caratterizzati dallo stesso ID dell'agente, ma caratterizzati da una tipologia di attività diversa (ad esempio casa e lavoro).

Nell'esempio riportato in Figura 3.17 è raffigurata la distribuzione delle attività lavorative delle persone residenti nella regione di Winterthur.

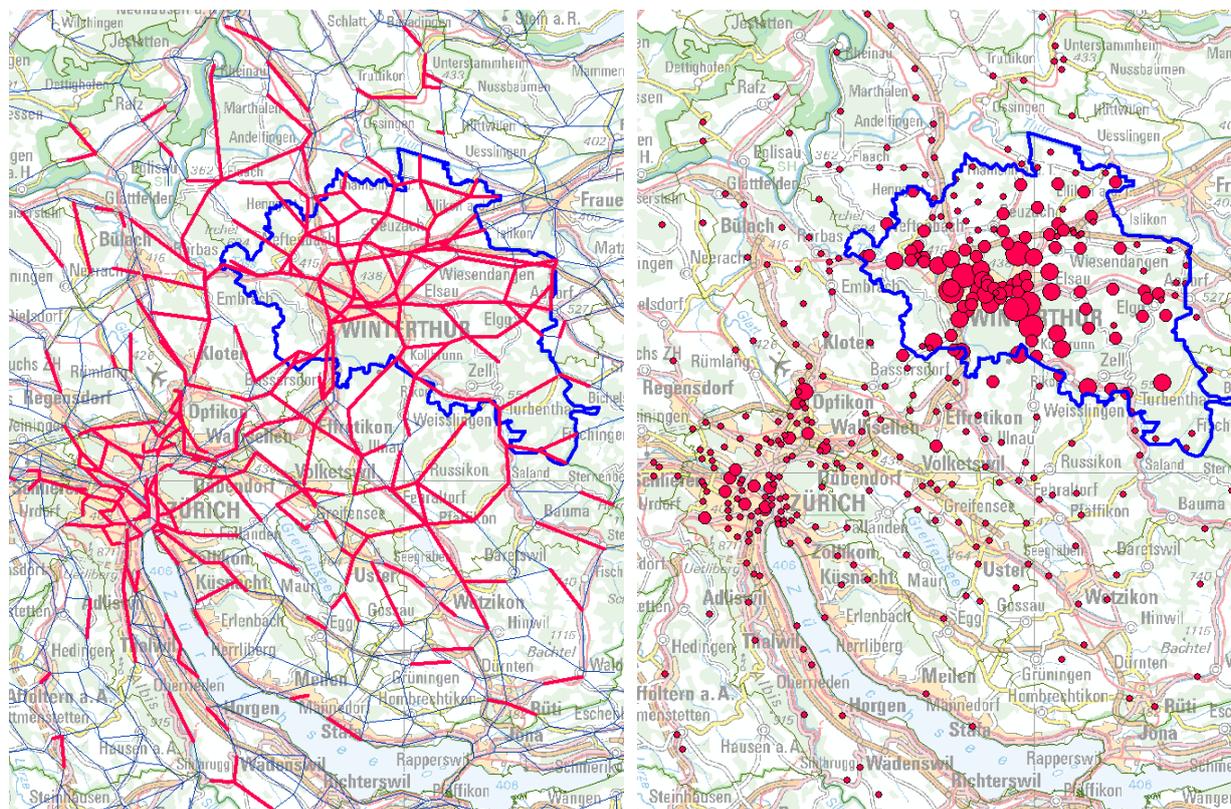


Figura 3.17: Distribuzione delle attività lavorative dalla regione di Winterthur

Come evidenziato in figura, le attività possono essere riferite all'arco (esempio a sinistra), oppure l'informazione può diventare maggiormente leggibile se riferita a un oggetto puntiforme (nel caso specifico il baricentro dell'arco), dove la grandezza del simbolo può essere proporzionale al numero di persone che svolgono l'attività lavorativa.

Confronto con dati reali

I risultati ottenuti con la simulazione, sempre grazie agli strumenti di calcolo offerti dai GIS, possono essere confrontati con dati reali riguardanti il traffico. Le analisi numeriche e cartografiche dei risultati delle simulazioni rappresentano una base conoscitiva particolarmente efficace per fornire informazioni funzionali alla calibrazione del modello e per cercare di ridurre i fenomeni di congestione nelle aree caratterizzate da un'elevata densità di traffico.



Un confronto è stato fatto tra i dati contenuti nella tabella eventi con i numeri di veicoli conteggiati dalle stazioni di rilevazione del flusso di traffico posizionati e controllati dall'Ufficio federale delle strade (USTRA), dove il conteggio delle auto viene effettuato con scadenza oraria mediante contatore meccanico.

La calibrazione del software non è stata parte integrante del lavoro di tesi, ma è solo stata suggerita la modalità di confronto.

Elaborazione del prototipo

L'obiettivo del prototipo² è quello di offrire alcuni strumenti di analisi finalizzati allo studio dei dati provenienti dal simulatore MATSim-T. A tal fine sono state sviluppate alcune **interfacce grafiche in ArcGIS** in grado di automatizzare le analisi descritte nelle precedenti sezioni, con un notevole risparmio di tempo da parte dell'utente.

Le applicazioni a finestra programmate in *Visual Basic* e in *Python* permettono uno svolgimento facilitato delle operazioni di analisi e garantiscono una buona flessibilità di azione. La progettazione di interfacce grafiche consente all'utente di reperire informazioni sulla mobilità giornaliera simulata anche senza grandi conoscenze del software GIS utilizzato.

Sono previsti il calcolo dei volumi di traffico con livelli di dettaglio (spaziale e temporale) variabili e l'elaborazione dell'analisi a ragnatela. Come input, l'utente sceglie l'intervallo di tempo desiderato e, per l'analisi a ragnatela, anche l>ID dell'arco di transito.

La scelta di una modalità di visualizzazione "adeguata" risulta spesso un problema, principalmente per la difficoltà di trovare un'opportuna icona in grado di evidenziare al meglio le caratteristiche del fenomeno analizzato. La grande potenzialità tecnica dei GIS di generare forme, simboli, scale cromatiche con estrema semplicità, non è supportata da una guida per la scelta del metodo corretto di visualizzazione dei fenomeni.

Non dobbiamo dimenticare che una carta è il mezzo di comunicazione visuale dei dati geografici e condiziona il modo in cui le informazioni in essa contenute sono interpretate dall'utente. Quando si visualizzano informazioni geografiche è necessario tenere presente che la natura e il significato del dato, sia dal punto di vista geografico che da quello degli attributi, devono essere compresi e trattati in modo corretto.

Tenuto conto di queste osservazioni, sono state programmate e messe a disposizione dell'utente delle carte tematiche con **modelli di rappresentazione grafica** predefiniti in grado di offrire alcune interessanti possibilità di visualizzazione (Figura 3.18), lasciando la libertà di modificare alcuni valori qualora lo si ritenesse necessario.

² Un prototipo è un sotto insieme del sistema finale che utilizza dei mezzi informatici ridotti e non definitivi (Theriault, 1996).

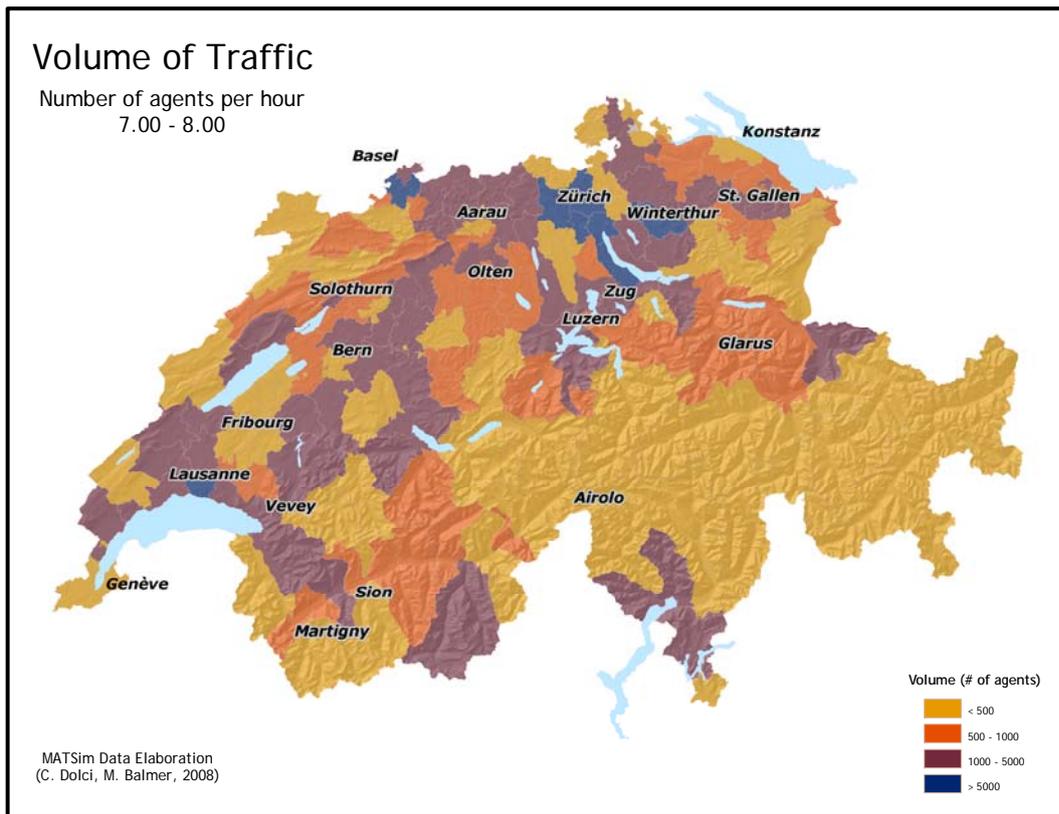


Figura 3.18: Esempio di carta dei volumi di traffico

Conclusioni

Come abbiamo avuto modo di vedere nel corso del capitolo, la crescita della capacità elaborativa ha consentito di migliorare lo studio dei sistemi di trasporto, la cui analisi genera spesso moli notevoli di dati. Lo studio e la comprensione di risultati voluminosi e complessi sono spesso operazioni improponibili tramite tecniche di presentazione dei dati tradizionali (tabelle e grafici) e richiedono un approccio più sofisticato per permettere all'utente di ricercare ed evidenziare gli aspetti in esame.

A conclusione del lavoro svolto, possiamo osservare come la struttura dei dati offerta dal modello logico e le molteplici capacità di analisi e calcolo proprie dei GIS riescano a garantire un valido supporto per l'analisi dell'informazione.

La visualizzazione, vista come elemento finale del processo di analisi, rappresenta inoltre un valido strumento per migliorare la comprensione dei fenomeni e si presta a supportare sia l'attività degli specialisti del settore, sia la comunicazione di messaggi chiari e sintetici a un pubblico non esperto, ma comunque interessato alla tematica.



Bibliografia

- Axhausen, K.W. (2000) Definition of Movement and Activity for Transport Modelling. Handbooks in Transport: Transport Modelling. Edited by D. Hensher and K. Button. Oxford, England: Elsevier.
- Balmer, M. (2007) Travel Demand Modeling for Multi-Agent Transport Simulations: Algorithms and Systems, Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Charypar, D., K. W. Axhausen e K. Nagel (2007) An Event-Driven Parallel Queue-Based Microsimulation for Large Scale Traffic Scenarios, paper presented at the *11th World Conference of Transport Research*, Berkeley, June 2007.
- De Palma, A. e F. Marchal (2002) Real cases applications of the fully dynamic METROPOLIS tool-box: an advocacy for large-scale mesoscopic transportation systems, *Networks and Spatial Economics* 2 (2002) (4), 347–369.
- Frick, M. e K.W. Axhausen (2003) Generating Synthetic Populations using IPF and Monte Carlo Techniques: Some New Results, paper presented at the 4th Swiss Transport Research Conference, Ascona, March 2004.
- Macy, M. e R. Willer (2002) From Factors to Actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling, *Annual Review of Sociology*, 28, 143-166.
- Nagel, K. e M. Koll-Schretzenmayr (2007) Multi-Agent Simulations in Spatial Planning, *disP* 170, 3/2007, Volume 43, Network City and Landscape, ETH Zürich.
- Nagel, K., P. Stretz, M. Pieck, S. Leckey, R. Donnelly, e C. Barrett (1998) TRANSIMS Traffic Flow Characteristics, paper presented at the 77th annual TRB meeting, Transportation Research Board.
- Nuvolati, G. (2007) Mobilità quotidiana e complessità urbana, Firenze University Press, Edizione Elettronica ISBN: 978-88-8453-630-3.
- Ortúzar, J. e L.G. Willumsen (1995) Modelling Transport, J. Wiley & Sons, New York, USA.
- Putman, S.H. e S.L. Chan (2001) The METROPILUS planning support system: urban models and GIS. In Brail R.K. and R.E. Klosterman (Eds.), *Planning support systems: integrating geographic information systems, models and visualization tools* (99-128). Redlands, CA: ESRI.
- Raney, B. e K. Nagel (2005) An improved framework for large-scale multi-agent simulations of travel behavior, in TRB (2005) Annual Meeting CD-ROM, Transportation Research Board, Washington, D.C., January 9-13 2005.
- Rivadossi, M. (2004) Metodologie per la modellazione di un'area critica: Il caso della zona Piazza Arnaldo-Canton Mombello a Brescia, *Tesi di laurea*, Università degli Studi di Brescia, Facoltà di Ingegneria Civile.

Schwarze, B., D. Strauch, H. Mühlhans e G. Rindsfuser (2004) Bedarf, Anforderungen und Verwendung räumlicher Daten in einer integrierten, dynamisch-mikroskopischen Simulation der Stadtentwicklung, In: Raubal M., A. Sliwinski and W. Kuhn, Eds. (2004) Geoinformation und Mobilität - Von der Forschung zur praktischen Anwendung. IfGIprints 22. Verlag Natur & Wissenschaft, Solingen, Germany.

Theriault, M. (1996) Systèmes d'information géographique: Concepts fondamentaux, *Notes de cours*, LATIG, Département de Géographie, Université Laval.

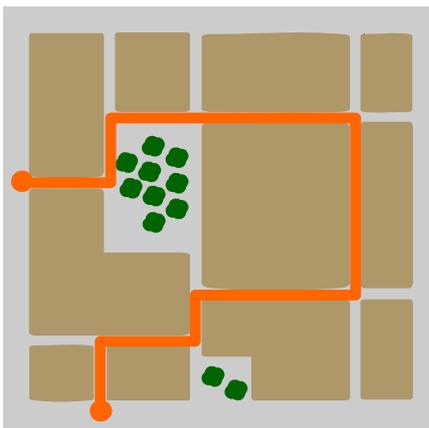
Vrtic, M., P. Fröhlich and K. W. Axhausen (2003) Schweizerische Netzmodelle für Strassen- und Schienenverkehr, in T. Bieger, C. Lässer and R. Maggi (eds.) Jahrbuch 2002/2003 Schweizerische Verkehrswirtschaft, 119–140, SVWG Schweizerische Verkehrswissenschaftliche Gesellschaft, St. Gallen.

Wang, X. (2005) Integrating GIS, simulation modes, and visualization in traffic impact analysis, *Computer, Environment and Urban Systems*, 29, 471-496.



*capitolo*quarto

AGGIORNAMENTO IN TEMPO REALE DEI FLUSSI DI TRAFFICO



Telecomunicazione e navigazione stanno crescendo insieme. L'offerta informativa riguardante il traffico e lo stato delle strade è ampia e sempre più diffusa.

La diversificazione dei mezzi di comunicazione atti alla diramazione delle informazioni stradali e l'utilizzo sempre maggiore dei mezzi tecnologici garantiscono una buona fruizione dell'informazione geografica.

In questo capitolo è proposto un approccio di routing dinamico studiato per la realtà svizzera, che permette la pianificazione di itinerari personalizzati tenendo conto dell'informazione sul traffico in tempo reale.



L'infomobilità e il controllo delle rotte

Appare sempre più evidente come alla continua domanda di trasporto non si possa rispondere unicamente con la costruzione di nuove infrastrutture. Il sistema dei trasporti necessita di un processo di ottimizzazione che si coordini con uno sviluppo sostenibile e che offra soluzioni concrete. Una gestione moderna del traffico contribuisce considerevolmente a fluidificare il traffico e dunque a rispettare i tempi di trasporto e una buona accessibilità. Il controllo delle rotte è particolarmente utile in circostanze di traffico congestionato (presenza di code), in caso di incidenti, di condizioni meteorologiche avverse o, più in generale, in condizioni di traffico non equamente distribuito sulla rete.

Si ricorda, che lo stato del traffico e la distribuzione dei flussi su una rete di trasporto, sono influenzati dalle decisioni prese dagli utenti della rete. La scelta dei percorsi da parte dei singoli utenti avviene sulla base di criteri individuali di utilità che non tengono conto dello stato del sistema nel suo complesso. Le zone interessate dalle difficoltà di circolazione stradale sono spesso concentrate lungo le principali direttrici di comunicazione e nelle grandi zone urbane. Nel periodo delle vacanze si deve invece far fronte a code chilometriche su tratte strategiche di collegamento (ad esempio l'asse nord-sud per quel che riguarda il territorio svizzero). Attraverso una migliore pianificazione dei flussi di traffico si dovrebbe poter raggiungere una significativa diminuzione dei fenomeni di congestione.

Utili a questo scopo possono essere i servizi di infomobilità che forniscono agli utenti informazioni e previsioni costantemente aggiornate sul traffico, segnalando in tempo reale, eventuali rallentamenti e consigliando agli utenti percorsi alternativi. L'**infomobilità** è stata definita (Commissione Europea - IST 99) come "l'accesso continuo, interattivo, intelligente a informazioni multimediali per supportare esigenze nel campo dei trasporti e delle attività lavorative e di piacere" e comprende tutti quei processi di divulgazione dello stato di accessibilità e utilizzo del sistema di trasporto.

Attualmente l'offerta di informazioni sulle condizioni delle strade e del traffico è molto vasta, ma la loro interpretazione e di conseguenza la scelta delle eventuali alternative di percorso rimangono a carico degli utenti.

Tenuto conto delle considerazioni appena fatte, si è concretizzata la necessità di sviluppare un servizio WebGIS che permetta agli utenti di tenersi informati sulle condizioni della rete per meglio pianificare i loro itinerari. Lo scopo è quello di fornire uno strumento per il calcolo e la visualizzazione di percorsi personalizzati, considerando le informazioni della situazione del traffico in tempo reale (semi-reale) nelle aree da percorrere.

Come area di studio è stata presa in considerazione la realtà svizzera, avendo a completa disposizione i dati relativi allo stato del traffico forniti in tempo reale da Viasuisse e il dettaglio della rete stradale fornita da TeleAtlas.

Per raggiungere l'obiettivo preposto, si è sviluppata un'applicazione WebGIS basata sulla piattaforma ArcGIS (ESRI), in grado di integrare il modello dei dati relativi alla rete stradale con la più affidabile fonte di informazioni sul traffico in Svizzera.

Si ricorda che per sistema WebGIS si intende un GIS caratterizzato da un insieme di tecnologie che lo rendono in grado, attraverso la rete internet, di distribuire contenuti geografici e di rendere disponibili funzionalità GIS per elaborarli. Va specificato che internet non cambia la fondamentale natura dei GIS, ma ne permette un impiego più diffuso (Harder, 1998).

Impatto sui flussi di traffico della rete stradale

Come abbiamo avuto modo di vedere nel secondo capitolo, l'approccio classico adottato per rappresentare e gestire una rete è quello basato su un sistema di elementi topologicamente connessi tra loro tramite la struttura arco-nodo. Per trovare i percorsi più convenienti o i percorsi alternativi possibili, nel caso si verificano fattori di disturbo alla circolazione, si fa ricorso alle funzioni per la verifica della connettività che permettono di identificare tutti i segmenti stradali tra loro connessi.

Inoltre, grazie agli algoritmi per il calcolo degli itinerari, si possono includere nel calcolo gli eventuali pesi associati agli elementi della rete.

Le condizioni di disturbo alla circolazione possono essere suddivise sostanzialmente in due categorie: eventi che influenzano lo stato del traffico e blocchi veri e propri della circolazione. La maggior parte dei messaggi sul traffico si riferisce a eventi che causano solo una riduzione del flusso di traffico (ad esempio la presenza di un cantiere con conseguente chiusura di una corsia, rallentamenti nelle ore di punta o ingorghi), mentre effettive chiusure di tratti stradali (dovute a lavori in corso, a chiusure stagionali o a incidenti) risultano, di norma, più rare.

Se il messaggio comunica la chiusura di una carreggiata o di una strada, per impedire il flusso di traffico sulla sezione della rete interessata, nel modello dei dati sono aggiunte delle barriere, in grado di interrompere la connettività tra gli archi della rete.

Al contrario, quando il flusso di traffico si riduce a causa di un evento che ne altera il normale scorrimento, si assiste a un aumento del tempo di percorrenza che ogni utente impiega per transitare sul medesimo tratto, se questo fosse libero ad esempio da cantieri o da incidenti. Il tempo minimo di percorrenza deve quindi essere corretto e ricalcolato.

A seconda dell'entità e dell'importanza dell'evento, il flusso di traffico ne è influenzato in maniera differente. Il calcolo è quindi eseguito utilizzando i cosiddetti "fattori di cambiamento", valori che dipendono dal tipo di evento registrato sul tratto stradale. Si tratta, infatti, di coefficienti numerici che moltiplicati per il tempo di percorrenza ordinario associato ai segmenti stradali permettono di calcolare il tempo effettivo.



| Codice Alert-C | Evento | Fattore di cambiamento |
|----------------|--------------------------------|------------------------|
| 1 | traffico perturbato | 2 |
| 101 | traffico bloccato | 10 |
| 108 | traffico fortemente rallentato | 5 |
| 201 | incidente | 4 |
| 401 | strada chiusa | chiusa |
| 514 | traffico su una sola corsia | 2 |
| 701 | lavori in corso | 2 |
| 1006 | pericolo di ghiaccio | 3 |
| 1012 | neve | 3 |
| 1304 | nebbia | 3 |

Tabella 4.1: Lista di alcuni tra gli eventi più comuni, con i relativi codici Alert-C e il fattore di cambiamento associato

Ogni messaggio sul traffico contiene un codice, che lo mette in relazione con la tipologia di evento segnalato. I codici sono definiti nel protocollo di Alert-C¹ (*Advise and problem Location for European Traffic-C*). Per la decodifica del messaggio si fa riferimento a una lista di 1500 eventi che descrivono le possibili situazioni. Tra le cause più frequenti di disturbo, se ne possono identificare 35 registrate nel 95% dei messaggi codificati (ad esempio: pericolo di ghiaccio, nebbia, tempi d'attesa, veicolo in contromano, ecc.) (Tabella 4.1).

Una volta decodificato il messaggio, il tempo di percorrenza può essere corretto e quindi moltiplicato per il relativo fattore di cambiamento individuato (Tabella 4.2).

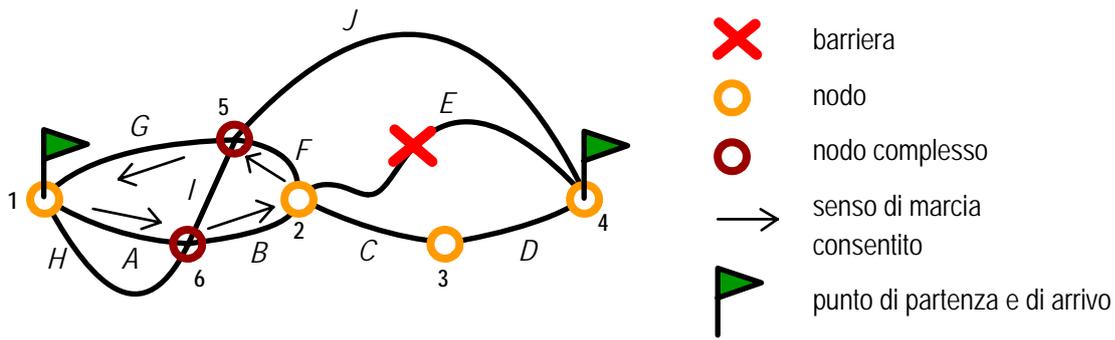
| Arco_ID | Lunghezza (metri) | Minuti | Minuti_corretti | |
|---------|-------------------|--------|-----------------|-----------------------------|
| 1 | 231 | 0.5 | 1 | ⇒ Fattore di cambiamento: 2 |
| 101 | 1226 | 1.1 | 1.1 | |
| 108 | 4531 | 3.5 | 14 | ⇒ Fattore di cambiamento: 4 |

Tabella 4.2: Correzione del tempo di percorrenza con il fattore di cambiamento

In Figura 4.1 sono raffigurati gli elementi di base di una rete, dove è stata aggiunta una barriera sull'elemento E.

L'algoritmo di *routing* calcola il percorso meno costoso partendo dal nodo 1 per raggiungere il nodo 4. Considerando nel calcolo la lunghezza degli archi, la loro direzione e la presenza della barriera, la variante migliore risulta essere il percorso ABCD; al contrario, se si vuole ottimizzare il tempo di viaggio viene preferita l'alternativa HIJ.

¹ Insieme di protocolli per la trasmissione di informazioni, raccomandato in Europa; si fonda sulla classificazione e standardizzazione di testi brevi, combinabili tra loro e in grado di coprire un'ampia varietà di situazioni, località e messaggi.



| Arco_ID | FNODE | TNODE | Oneway | Lunghezza | Minuti |
|---------|-------|-------|--------|-----------|--------|
| A | 1 | 6 | FT | 1000 | 1 |
| B | 6 | 2 | FT | 1000 | 1 |
| C | 2 | 3 | | 1000 | 1 |
| D | 3 | 4 | | 1000 | 1 |
| E | 4 | 2 | | 2300 | 2.3 |
| F | 5 | 2 | TF | 600 | 0.4 |
| G | 1 | 5 | TF | 1300 | 1 |
| H | 1 | 6 | | 1200 | 1 |
| I | 6 | 5 | | 700 | 0.5 |
| J | 5 | 4 | | 3500 | 2 |

POSSIBILI PERCORSI DAL NODO 1 AL NODO 4

| Arco_ID | Peso_Lunghezza | Peso_Minuti |
|---------|----------------|-------------|
| A-B-C-D | 4000 | 4 |
| A-B-E | 4300 | 4.3 |
| H-I-J | 5400 | 3.5 |

Figura 4.1: Esempio di tragitto con barriera

È inoltre da ricordare che una rete, a seconda della sua complessità, può contenere informazioni sui sensi di marcia e/o tenere conto della presenza di nodi complessi. Se consideriamo, ad esempio, i cavalcavia sopra un'autostrada (i nodi 5 e 6 nell'esempio di Figura 4.1), la rete deve essere in grado di tradurre il modello rappresentante la realtà e non permettere il cambiamento di direzione in prossimità di questi particolari nodi.



Fonti di dati utilizzate per l'applicazione

L'applicazione sviluppata utilizza due tipologie di dati: il sistema di offerta (rete stradale) e i messaggi sullo stato del traffico contenenti le informazioni TMC (*Traffic Message Channel*). Grazie alla combinazione di queste informazioni, si è in grado di localizzare geograficamente il luogo indicato dal messaggio di aggiornamento sul traffico e di reagire con il calcolo del percorso richiesto.

Segue una descrizione e una valutazione dei dati utilizzati.

Rete stradale

Per poter essere idonei allo scopo dell'applicazione, i dati relativi alla rete stradale devono soddisfare alcuni criteri:

- Essere in formato vettoriale e corrispondere il più possibile alla realtà. In particolar modo, il modello dei dati deve tener conto dei sensi di marcia consentiti e delle informazioni relative a incroci e/o nodi complessi.
- Le strade devono essere classificate gerarchicamente a seconda della loro tipologia. Ad esempio, le autostrade devono essere classificate e riconoscibili rispetto alle strade cantonali.
- L'applicazione è stata sviluppata utilizzando librerie degli *ArcObjects*, quindi i dati devono essere in formato ESRI, o perlomeno, facilmente convertibili.
- Ogni elemento costituente la geometria lineare della strada deve poter essere descritto da un tempo di percorrenza il più realistico possibile.
- Deve esistere la possibilità di interfacciare il modello di offerta con le informazioni TMC.

I dati di riferimento relativi alla rete stradale si basano sulla banca dati geografica di **TeleAtlas** (MultiNet Version 4.3.1), uno dei leader europei per la fornitura di dati stradali e soluzioni per la navigazione. Si tratta di una banca dati di dimensioni notevoli (2 GB per la rete stradale svizzera), sulla quale è garantita dalla casa produttrice un'accuratezza fino a 12 metri nelle aree extraurbane e fino a 5 metri nei centri urbani. La banca dati è regolarmente aggiornata da controlli periodici effettuati più volte l'anno. L'aggiornamento è fatto basandosi su carte stradali ufficiali, su elaborazioni di immagini satellitari e attraverso un gran numero di rilievi sul terreno.

La banca dati contiene le informazioni necessarie alla fruizione della rete stessa, quali la tipologia di manovra concessa, il significato e la posizione dei segnali stradali o l'appartenenza dell'elemento stradale a una particolare zona di traffico (zona pedonale, parcheggio, accesso limitato, ecc.).

Fra i numerosi tematismi contenuti nella banca dati, quelli utilizzati ai fini della presente analisi sono il tematismo "jc", che contiene le informazioni relative ai nodi e quello "nw"

relativo agli archi. Reti articolate come quella stradale svizzera contengono nodi complessi (incroci complessi).

In Tabella 4.3 sono riportati i campi di maggiore interesse relativi alla tabella degli archi “nw”, mentre nella Figura 4.2 si riporta una rappresentazione grafica degli archi e dei nodi con una mappa tematica basata sulla classificazione funzionale della strada (attributo FRC).

| Attributo | Descrizione |
|-----------|--|
| ID | Chiave primaria dell'arco |
| F_JNCTID | Chiave primaria del nodo iniziale |
| T_JNCTID | Chiave primaria del nodo finale |
| METERS | Lunghezza dell'elemento in metri |
| FRC | Classificazione funzionale della strada |
| NET2CLASS | Fornisce una classificazione in quattro livelli di importanza della strada |
| NAME | Nome della via |
| ROUTENUM | Designazione amministrativa della strada |
| FOW | Indica l'appartenenza a particolari tipologie di arco |
| TOLLRD | Indica se la strada è a pedaggio o meno |
| ONEWAY | Indica se la strada è a senso unico ed eventualmente il senso di marcia consentito |
| KPH | Limite di velocità (in km/h) |
| MINUTES | Tempo di attraversamento in minuti |

Tabella 4.3: Principali attributi del tematismo nw

I campi F_JNCTID e T_JNCTID corrispondono alla chiave primaria dei nodi (ID) e permettono quindi di associare a un arco i nodi a esso collegati. Si precisa che a ogni arco è associato un verso convenzionale (che va dal nodo indicato in F_JNCTID a quello in T_JNCTID), anche se in realtà l'arco è bidirezionale e l'attributo ONEWAY consente di determinare il verso di percorrenza.

La banca dati di TeleAtlas è stata preferita ad altre reti di traffico, in quanto è una delle poche fonti di dati compatibili con la metodologia TMC (vedi paragrafo successivo), fattore indispensabile al funzionamento dell'applicazione.



Figura 4.2: Raffigurazione dei *layers* nw e jc

Informazione sul traffico e metodologia TMC

Per poter essere utilizzati in maniera adeguata, i messaggi riguardanti il traffico devono avere le seguenti caratteristiche:

- essere in formato digitale;
- coprire l'intera rete nazionale svizzera;
- contenere informazioni aggiornate;
- avere un determinato formato e una struttura precisa.

La fonte di dati sul traffico utilizzata in questo lavoro è quella di **Viasuisse** (<http://www.viasuisse.ch>), centro informativo che garantisce a livello nazionale le informazioni viarie in tempo reale. La diffusione del messaggio avviene su frequenze FM (*Frequency Modulation*), attraverso il canale RDS, utilizzando il protocollo TMC che definisce le regole di codifica (*Radio Data System/Traffic Message Channel*, RDS/TMC).

Per ottimizzare la strutturazione e la qualità del messaggio, si sono potuti definire con Viasuisse i parametri necessari all'utilizzo delle informazioni presenti nel messaggio informativo. Ogni quarto d'ora il messaggio aggiornato viene salvato sul server IGPGIS1 (Istituto di Fotogrammetria e Geodesia, Eth, Zurigo) in formato XML e raggiungibile via

FTP (*File Transfer Protocol*). Il messaggio ha una struttura ben definita e quindi facilmente interpretabile ai fini dell'applicazione.

Insieme alla descrizione dei dati relativi alla rete stradale, è opportuno descrivere brevemente il significato delle informazioni TMC.

Il TMC è una tecnologia che permette di visualizzare segnalazioni relative al traffico su dispositivi abilitati. Il messaggio codificato contiene diverse indicazioni, tra le quali la descrizione dell'evento occorso, l'area d'influenza, la sua estensione, la durata ed eventuali percorsi alternativi.

Per poter interpretare correttamente l'informazione a cui si riferisce il messaggio, si deve poter localizzare in maniera univoca l'informazione del TMC sulla rete stradale di riferimento. Tecnicamente, il TMC prevede una serie di punti nevralgici distribuiti sull'intero sistema stradale (raccordi, diramazioni, gallerie, ecc.), collegati a determinati elementi lineari della rete nelle dirette prossimità; si parla, infatti, di TMC *Locations* (nodi) e di TMC *Paths* (percorsi composti da più archi).

Maggiore è il numero di TMC *Locations* inserite nella banca dati TeleAtlas, maggiore è il dettaglio con cui possono essere fornite le informazioni sulla mobilità.

In Figura 4.3A sono raffigurate due TMC *Locations* e gli elementi della rete stradale a essi collegati (evidenziati con una linea di spessore maggiore), mentre in Figura 4.3B sono rappresentati due diversi percorsi, in colore chiaro il percorso a Chiasso a Basilea (TMC *Path 1*) e in tonalità più scura quello da Chiasso a Zurigo (TMC *Path 2*).

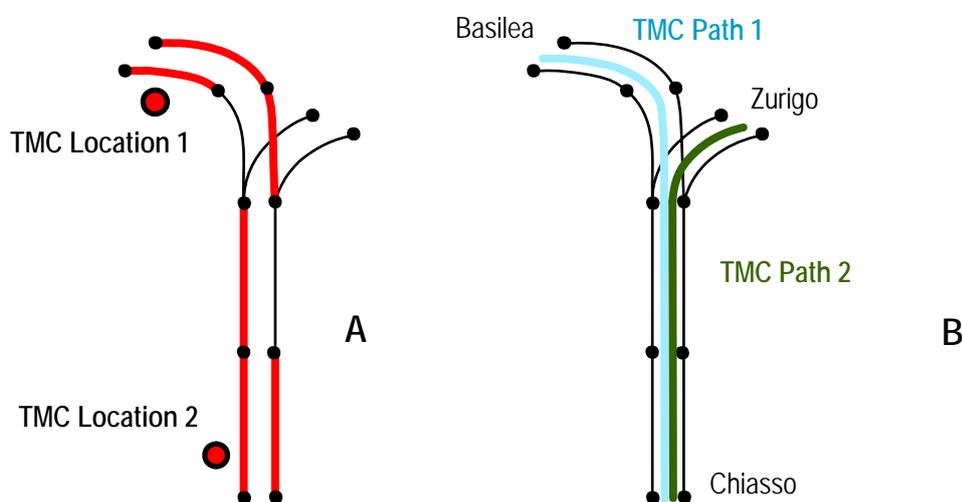


Figura 4.3: Informazione TMC (versione adattata da Koller, 2006)

Ogni messaggio relativo al traffico fornito da Viasuisse contiene il riferimento a una TMC *Location*, assicurando una corrispondenza diretta tra il messaggio e la rete stradale. A tale proposito, in Figura 4.4 è riportato il modello dei dati che raffigura la relazione tra la rete stradale e le informazioni TMC.

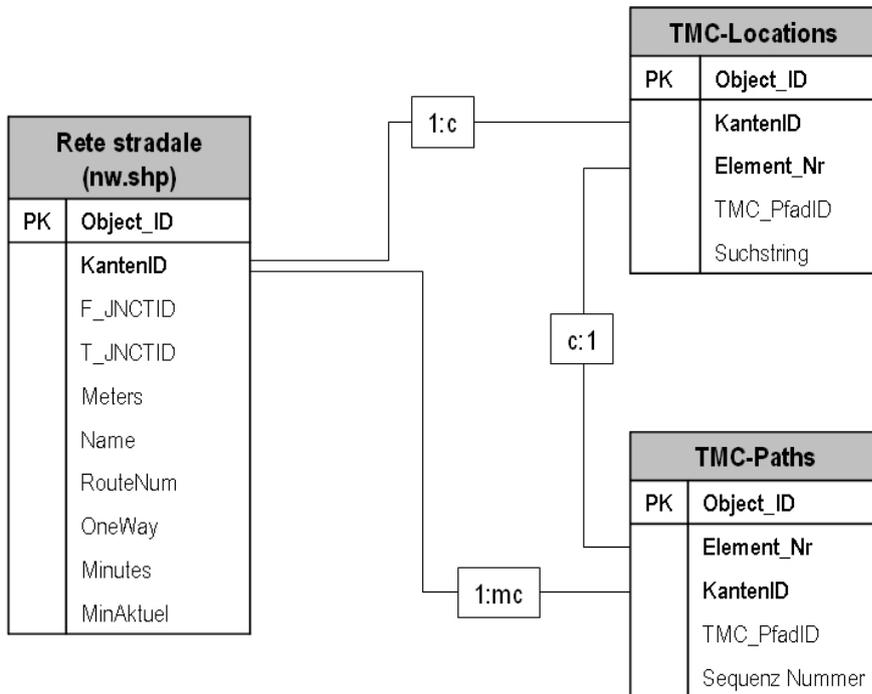


Figura 4.4: Modello relazionale tra gli oggetti TMC e la rete stradale (versione adattata da Koller, 2006)

Architettura dell'applicazione: alcuni aspetti tecnici

L'applicazione è stata sviluppata in *Visual Basic for Applications* (VBA) utilizzando le librerie di *ArcObjects*². Essa è suddivisa in più componenti, che lavorano indipendentemente le une dalle altre (Figura 4.5). I messaggi sullo stato del traffico sono comunicati al server IGPGIS1 dell'Istituto di Fotogrammetria e Geodesia (Eth, Zurigo) da Viasuisse in formato XML a intervalli regolari. A questo punto ogni messaggio è decodificato e le TMC *Locations* interessate dagli eventi vengono così identificate, permettendo la conseguente selezione dei segmenti stradali coinvolti dal disagio. I parametri di percorrenza per i tratti interessati vengono aggiornati e il percorso richiesto calcolato tenendo in considerazione l'attuale situazione del traffico.

Ricordiamo, che il servizio deve essere utilizzabile attraverso Internet e deve poter fornire all'utente uno strumento per il calcolo e la visualizzazione del percorso richiesto.

² Gli ArcObjects permettono di personalizzare l'interfaccia di ArcGIS integrando funzionalità già esistenti. Essi sono costituiti da più di 3'000 classi indipendenti da una specifica piattaforma, sviluppate da ESRI in ambiente C++. Per accedere agli ArcObjects si possono utilizzare i linguaggi di programmazione più conosciuti come VisualBasic, C++, Delphi e Java.

Il percorso personalizzato e aggiornato viene infine comunicato all'utente. Per la consultazione del servizio via internet, si è reso necessario lo sviluppo di un'interfaccia in grado di ricevere le richieste dell'utilizzatore (località di partenza, località di arrivo e criterio di ottimizzazione) e di trasferirle correttamente all'applicazione che pianifica il percorso.

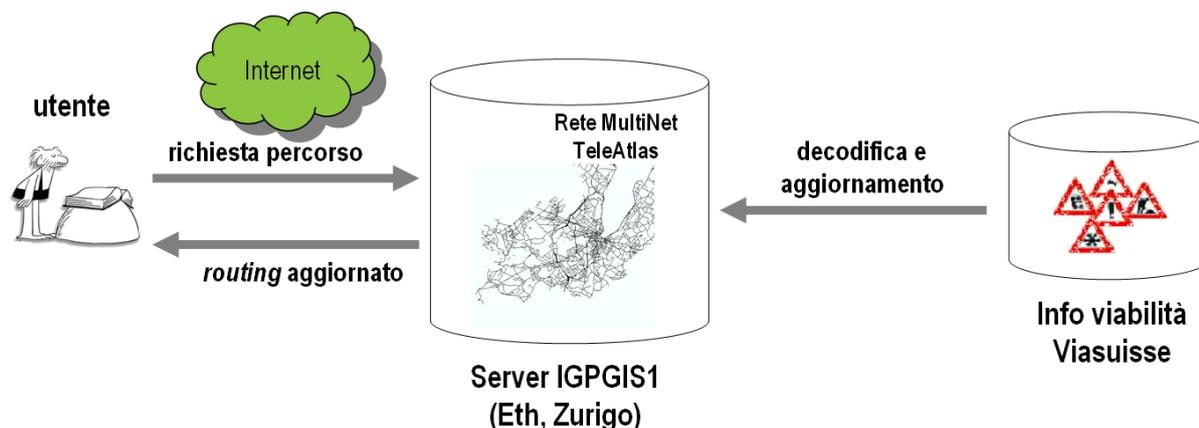


Figura 4.5: Schema dell'applicazione

Ai fini di una migliore comprensione dell'applicazione, segue una descrizione più dettagliata delle diverse componenti sviluppate.

Decodifica del messaggio di Viasuisse

In Figura 4.6 sono illustrate le componenti fondamentali di un messaggio del traffico prodotto e fornito dalla centrale di Viasuisse.

Il file XML contiene l'informazione in una forma estremamente semplificata e schematizzata, includendo tuttavia tutte le indicazioni necessarie alla localizzazione dell'evento sulla rete stradale. In un singolo file di messaggio possono essere presenti decine di eventi diversi e diversamente distribuiti, che descrivono la situazione del traffico su tutto il territorio nazionale.

La struttura dei tag³ utilizzati nel documento XML è la seguente:

- IFN: l'inizio e la fine dell'evento riguardante il traffico;
- MDT: la descrizione dell'evento in linguaggio ordinario;
- LRN: l'identificazione della strada considerata;
- ECO: la codifica dell'evento secondo il protocollo *Alert C*;
- LME: l'estrapolazione geografica del messaggio sulla rete stradale (spiegazione nel paragrafo successivo);

³ I tag sono dei marcatori che racchiudono delle informazioni, utilizzati per assegnare una semantica al testo.



- LDR: l'informazione riguardante la direzione lungo il percorso TMC;
- LOC e LCD: i codici TMC per la posizione. La prima posizione viene indicata come *primary location*; se dovessero essere presenti nel messaggio più TMC, l'ultima posizione viene indicata come *secondary location*.

```
<IFN>
  <MDT> Zwischen Amsteg und Wassen in beiden Richtungen gesperrt </MDT>
  <LRN> A2 </LRN>
  <ECO> 401 </ECO>
  <LME> 2 </LME>
  <LDR> 1 </LDR>
  <-LOC>
    <LCD> 10456 </LCD> PRIMARY LOCATION
  <-/LOC>
  <-LOC>
    <LCD> 13838 </LCD> MIDDLE LOCATION
  <-/LOC>
  <-LOC>
    <LCD> 24475 </LCD> SECONDARY LOCATION
  <-/LOC>
</IFN>
```

Figura 4.6: Esempio di un messaggio XML fornito da Viasuisse

Localizzazione del disagio e aggiornamento della rete

In questo paragrafo viene descritto il processo attraverso il quale viene localizzato il disagio sulla rete e aggiornati i pesi considerati per il calcolo di ottimizzazione dei percorsi. Nel processo di localizzazione del disagio è utile distinguere due casi possibili: il messaggio può riguardare nessuna o una sola TMC *Location* (LME = 0, LME = 1) oppure nello stesso messaggio sono indicate più TMC *Locations* interessate dallo stesso evento (LME > 1).

Il codice per localizzare l'evento sulla rete stradale si compone come segue:

ABCDEEEEE

dove

- A = orientamento del tratto (+/-)
- B = codice nazionale (4 per la Svizzera)
- CC = numero della banca dati (p.es. 09)
- D = direzione TMC del tratto (+/-; P/N)
- EEEE = il codice del punto TMC

Nel caso in cui il messaggio riguardi una TMC *Location*, solo gli archi a essa collegati sono quelli interessati dal disagio. Prendendo come esempio un evento che si verifica in

Svizzera (BCC = 409) che coinvolge la TMC *Location* 10456, i messaggi da decodificare sono **+409P10456**, **-409P10456**, **+409+10456** e **-409+10456**.

Utilizzando l'attributo SUCHSTRING presente nella tabella TMC *Locations* e la relazione che lega le TMC *Locations* agli archi della rete stradale (Figura 4.4) si è in grado di selezionare gli archi corrispondenti (K8 e K9) (Figura 4.7).

In base poi al fattore di cambiamento corrispondente all'evento, verranno aggiornati i tempi di percorrenza degli archi identificati nella banca dati del sistema di offerta.

| TMC-Locations | | | | |
|---------------|----------|------------|------------|------------|
| Object_ID | KantenID | Element_Nr | TMC_PfadID | Suchstring |
| 1 | K17 | E1 | 101 | +409N10456 |
| 2 | K17 | E2 | 111 | -409-10456 |
| 3 | K9 | E3 | 200 | +409P10456 |
| 4 | K8 | E4 | 200 | +409+10456 |
| 5 | K8 | E5 | 203 | -409+10456 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 45 | K14 | E10 | 101 | +409N13838 |
| 46 | K15 | E11 | 101 | -409-13838 |
| 47 | K6 | E12 | 200 | +409P13838 |
| 48 | K6 | E13 | 203 | -409+13838 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 1008 | K11 | E14 | 101 | +409N24475 |
| 1009 | K1 | E15 | 200 | +409P24475 |
| 1010 | K1 | E16 | 203 | -409P24475 |

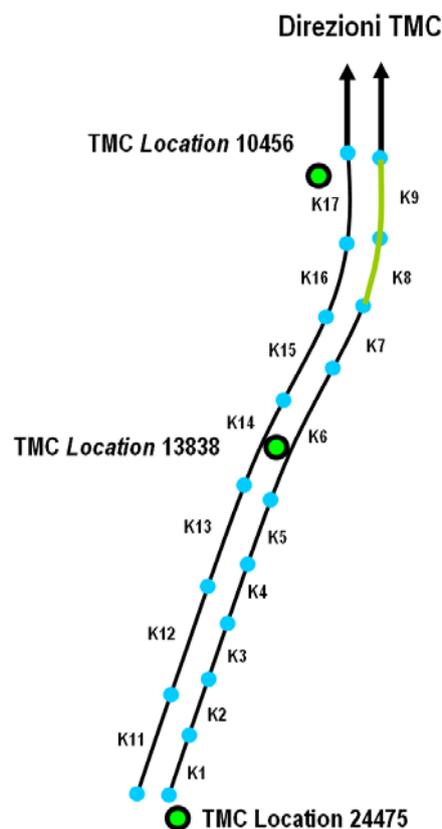


Figura 4.7: Localizzazione del disagio – una TMC *Location* coinvolta, 10456 (Koller, 2006)

Se l'evento relativo al traffico interessa invece più TMC *Locations* ($LME > 1$), devono essere selezionati e aggiornati non solo gli archi direttamente collegati alle TMC *Locations*, ma anche tutti quelli topologicamente compresi.

Utilizzando sempre il modello dei dati che mette in relazione gli oggetti TMC e gli archi della rete stradale, si è in grado di selezionare tutti gli archi interessati e aggiornarne i relativi tempi di percorrenza.

Se consideriamo il caso concreto di Figura 4.8, dove il messaggio di traffico interessa le TMC *Locations* 10456 e 24475, gli archi da ritenersi coinvolti nel disagio sono tutti quelli evidenziati in Figura 4.8, e non solo K1, K8 e K9.



| TMC-Pfade | | | | |
|-----------|------------|----------|------------|------------|
| Object_ID | Element_Nr | KantenID | TMC_PfadID | Sequenz Nr |
| 34 | E56 | K21 | 203 | ... |
| 35 | E2 | K98 | 203 | 99 |
| 36 | E1006 | K322 | 203 | 100 |
| 37 | E16 | K1 | 203 | 101 |
| 38 | E124 | K2 | 203 | 102 |
| 39 | E453 | K3 | 203 | 103 |
| 40 | E957 | K4 | 203 | 104 |
| 41 | E231 | K5 | 203 | 105 |
| 42 | E13 | K6 | 203 | 106 |
| 43 | E436 | K7 | 203 | 107 |
| 44 | E5 | K8 | 203 | 108 |
| 45 | E800 | K9 | 203 | 109 |
| 46 | E832 | K322 | 203 | 110 |
| 47 | E95 | K98 | 203 | 111 |
| 48 | E75 | K12 | 203 | ... |

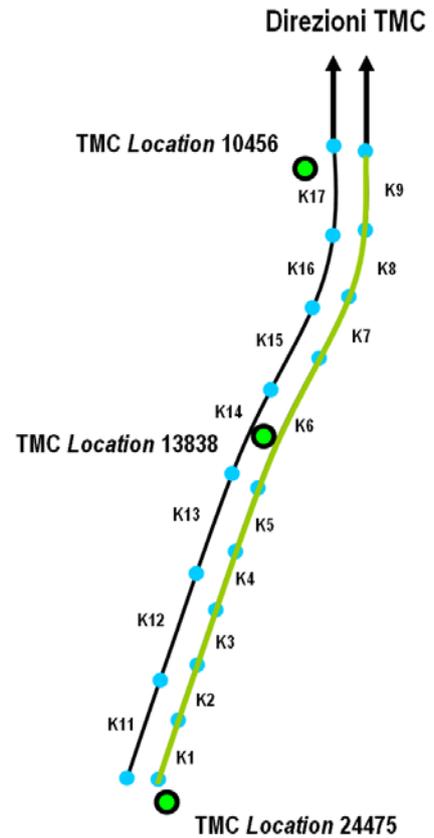


Figura 4.8: Localizzazione del disagio – due TMC Locations coinvolte, 10456 e 24475 (Koller, 2006)

Attualizzazione della rete stradale

L'applicazione *update.exe* viene inizializzata dal sistema operativo del server IGPGIS1 dell'istituto attraverso una *scheduled task*, che periodicamente, a seconda delle necessità o delle richieste (ad esempio ogni ora), verifica la presenza di nuovi messaggi e aggiorna la rete (Figura 4.9).

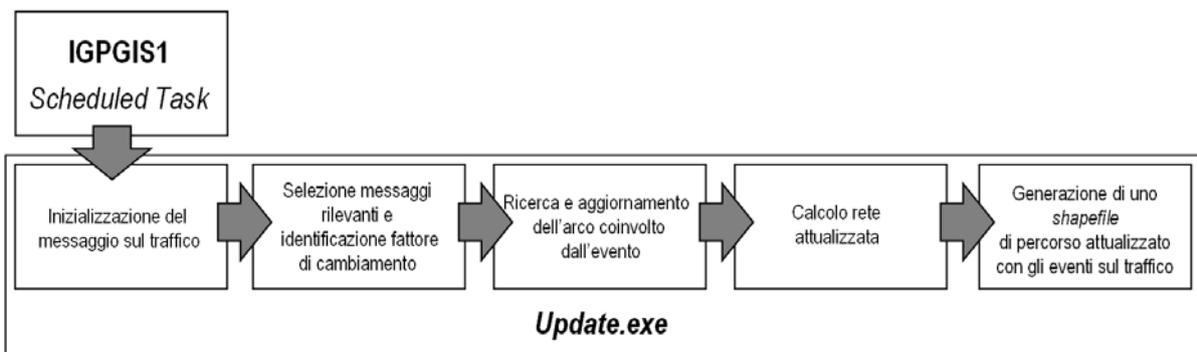


Figura 4.9: Attualizzazione della rete con i messaggi sul traffico

Dopo la verifica di tutte le condizioni necessarie all'ambiente di lavoro (la licenza di ArcInfo, l'accesso al modello dei dati e le informazioni relative ai codici TMC, ecc.), viene decodificato il file XML con i dati relativi al traffico.

Prima di integrare il nuovo messaggio e quindi ricalcolare gli effettivi tempi di percorrenza, è necessario ripristinare i tempi di percorrenza ordinari associati alla rete stradale e rimuovere le eventuali barriere aggiunte.

Ricordiamo che sul server, la rete stradale è sempre aggiornata con l'ultimo messaggio ricevuto e decodificato.

Routing e internet

Per la consultazione del servizio via internet e il processo di calcolo del *routing*, si è reso necessario lo sviluppo di un'interfaccia in grado di ricevere le richieste dell'utilizzatore (località di partenza, località di arrivo e criterio di ottimizzazione) e di trasferirle correttamente all'applicazione che pianifica il percorso.

Per la decodifica delle richieste dell'utente (protocollo HTTP) e per il processo di calcolo del *routing* è stata sviluppata dalla parte server un'applicazione in PHP (*Hypertext Preprocessor*, linguaggio di *scripting serverside*), mentre l'accesso via internet al servizio è stato realizzato grazie a un sito *web*.

Il servizio WebGIS offerto è in grado di restituire all'utente il risultato dell'itinerario nel *browser* non solo in formato numerico e di testo, ma anche in forma grafica. La grafica del percorso è stata realizzata usando un'applicazione *Java freeware* (*Jshape*), specifica per la visualizzazione dei dati geografici vettoriali (*ESRI shapefile*).

La Figura 4.10 illustra le diverse componenti utilizzate per la comunicazione tra l'utente e l'applicazione server per il calcolo dell'itinerario. L'interfaccia in PHP (salvata sul server) rappresenta l'elemento centrale e riveste la funzione di comunicazione tra il web browser dell'utente e l'applicazione server per il calcolo del percorso.

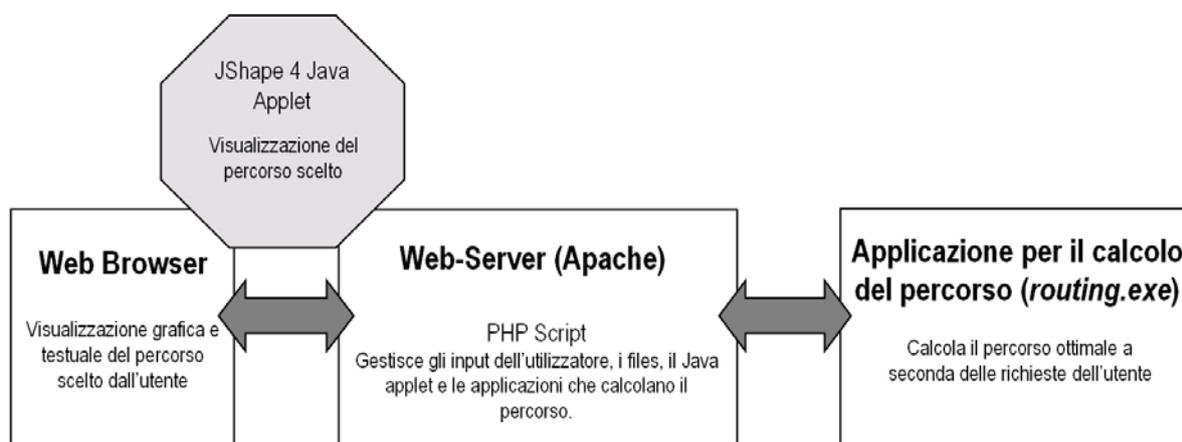


Figura 4.10: Componenti dell'applicazione per il calcolo del percorso (versione adattata da Koller, 2006)



Lo script in PHP viene inizializzato non appena l'utilizzatore attiva l'applicazione sulla pagina web. La prima parte dello script genera un formulario richiedente la località di partenza, quella di destinazione e un criterio per l'ottimizzazione del percorso. Non appena i dati richiesti dal formulario sono stati inseriti, lo script verifica che le due località non siano coincidenti.

A questo punto il programma *routing.exe* permette di procedere al calcolo dell'itinerario.

Come già accennato in precedenza, l'applicazione è basata sulla piattaforma ArcGIS e, più specificatamente, la modellizzazione delle reti e il calcolo degli itinerari sono realizzati grazie all'estensione *Network Analyst*.

Il percorso ottimale viene calcolato utilizzando un solver disponibile nelle librerie di ArcGIS (*network solver*). Come risultato del calcolo viene creato uno *shapefile* a geometria lineare che descrive il percorso, un file XML con la descrizione dello stesso e un file di testo con la somma totale del peso considerato (tempo o distanza) e le coordinate di inizio e fine del percorso (valori necessari per la successiva rappresentazione del percorso nel web browser dell'utilizzatore).

Risultati

Con il presente lavoro è stato possibile raggiungere l'obiettivo prefissato di offrire a un cliente internet un servizio di *routing* dinamico per la pianificazione di percorsi ottimizzati rispetto alla situazione del traffico. Il fruitore del servizio può, inserendo la località di partenza e quella di destinazione, procedere al calcolo del proprio itinerario.

A scelta, il percorso può essere ottimizzato rispetto al tempo impiegato (più veloce) oppure rispetto alla lunghezza (più breve) dello stesso. L'applicazione restituisce sia graficamente che testualmente il risultato ottenuto dall'algoritmo di *routing* sulla rete stradale attualizzata e permette di visionare gli eventi relativi al traffico registrati sull'intera rete stradale svizzera.

Per una migliore interpretazione del grafo selezionato sono disponibili alcuni semplici strumenti per la navigazione e la consultazione (zoom in, zoom out, pan, ecc.).

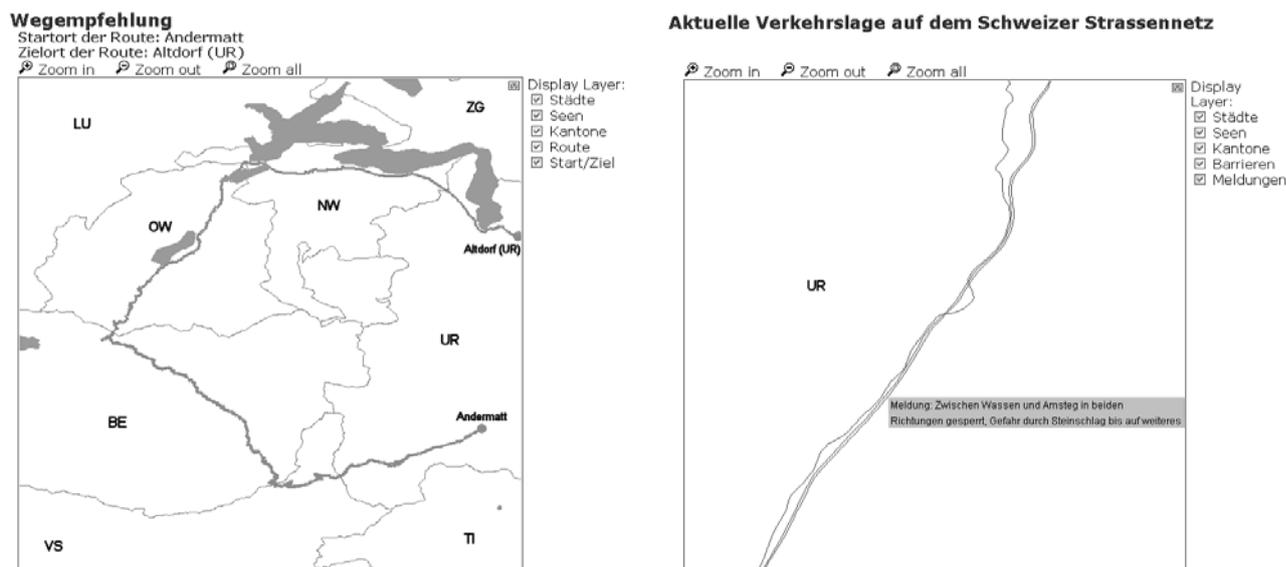


Figura 4.11: Esempio di percorso stradale suggerito dall'applicazione

In Figura 4.11 è riportato un esempio di percorso stradale suggerito dall'applicazione. Nel caso illustrato, il percorso normale tra la località di partenza e quella di arrivo è di 33 km. L'itinerario proposto è invece molto più lungo, 139 km, in seguito alla chiusura contemporanea sia dell'autostrada che della strada principale per il pericolo di caduta sassi (situazione realmente registrata il 31.05.2006).

Conclusioni

Tra gli aspetti più interessanti di questa applicazione, sono da evidenziare l'affidabilità di una rete stradale sempre aggiornata e l'uso di internet come mezzo per la pubblicazione dei dati. Questa seconda caratteristica rende il servizio consultabile attraverso diversi strumenti, tra i quali dispositivi mobili come *smartphones*, cellulari e palmari ove sia integrata una tecnologia adeguata.

La richiesta di un calcolo di *routing* per una determinata scadenza, al termine della quale l'itinerario viene calcolato e inviato all'utente sarebbe una possibile estensione del servizio.

Prossimi sviluppi potrebbero contemplare il calcolo di percorsi basati non solo sullo stato attuale del traffico ma anche su previsioni per poter così pianificare in anticipo l'itinerario, magari combinandoli con dati ottenuti da software di simulazione. La registrazione sistematica degli eventi permetterebbe di analizzarne la frequenza e la distribuzione riuscendo a pianificare itinerari alternativi per i periodi dell'anno ad alta densità di traffico.

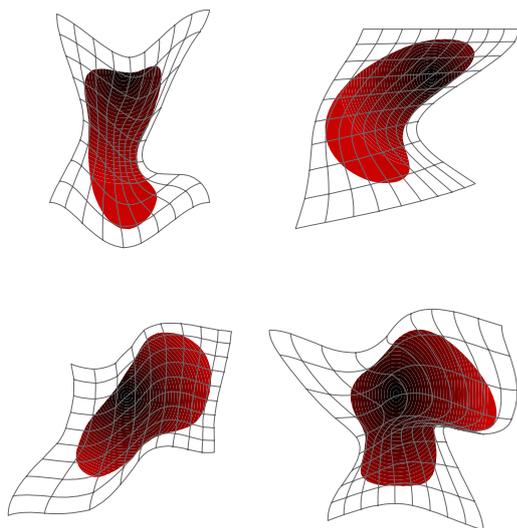


Bibliografia

- Koller, M. (2006) Dynamisches WebGIS zur optimierten Routenplanung, Diplomarbeit, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Departement Bau, Umwelt und Geomatik, ETH Zürich.
- Miller, H. J. e S. Shaw (2001) Geographic information systems for transportation – principles and applications, Oxford University Press.
- Tele Atlas NV (2001) “Handling TMC with MultiNet Shapefile, Version 0.01”.
- Tele Atlas NV (2005) “Tele Atlas MultiNet Version 3.4.1 Data Specification”.
- Tele Atlas NV (2005) “Tele Atlas MultiNet, Oracle 4.3.1 Format Specifications”.
- Tele Atlas NV (2006) “TMC Information”.
- TMC Forum (2004), “TMC Handbook, Location Table Exchange Format, Version 05”.
- ESRI (2005) “ArcGIS 9 Network Analyst Tutorial”, Redlands USA.
- GEWI GMBH (2005) “TIC Info Specification – Release 14”, Bernburg Germany.
- Harder, C. (1998) Serving Maps on the Internet, Geographic Information on the World Wide Web, ESRI Press.

capitolo quinto

LE CARTE DEL TEMPO



Le distanze in linea d'aria tra le località restano invariate nel tempo. Questa caratteristica garantisce che la forma e la posizione degli elementi geografici di un paese rimangano stabili per decenni. Lo stesso non si può affermare per la lunghezza dei percorsi stradali e le relative distanze temporali che separano le diverse località. Grazie allo sviluppo infrastrutturale in atto, tali distanze tendono, infatti, sempre più a ridursi.

Questo capitolo presenta un'applicazione che consente la realizzazione delle cosiddette carte del tempo. Il capitolo discute la costruzione di una serie di carte prodotte per la Svizzera che documentano il "restringimento" del paese dal 1950 a oggi. Si descrivono i dati utilizzati e il modello matematico impiegato per il rescaling necessario. Per concludere, si presentano i risultati ottenuti.

Relazione spazio-tempo in cartografia

Visualizzare per creare conoscenza

La visualizzazione è uno strumento di acquisizione del sapere che accompagna l'uomo fin dall'antichità. La storia della visualizzazione delle informazioni è la storia della scrittura, la storia delle mappe e la storia della conoscenza.

L'uomo proprio attraverso il processo della visualizzazione è in grado di comprendere meglio i fenomeni che lo circondano (*"using vision to think"*, Bertin, 1977) e di comunicare risultati già compresi, in quanto la generazione di immagini semplifica spesso l'apprendimento delle informazioni¹. Con la visualizzazione siamo in grado di comunicare di più, più efficacemente e in maniera più diretta (Figura 5.1).

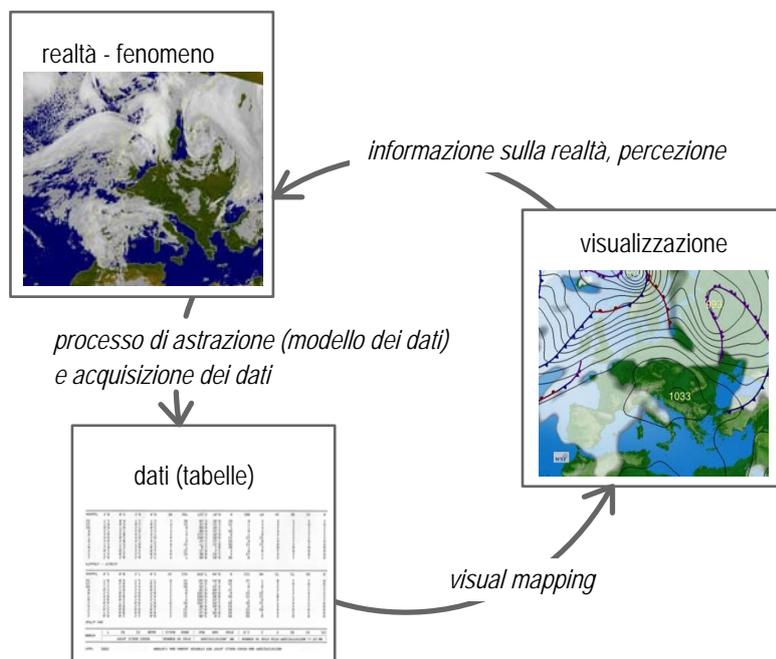


Figura 5.1: Processo di visualizzazione

I fenomeni intorno a noi sono per loro natura caratterizzati da una dimensione temporale², oltre che da quella spaziale. Il concetto stesso di distanza include la dimensione del tempo. Se pensiamo a due punti fissi nello spazio, la loro distanza si può considerare entro certi limiti costante, mentre la distanza temporale che li divide è legata alla velocità di spostamento da un punto all'altro, cioè alla relazione dello spazio sul tempo.

In letteratura, si trovano diversi esempi dove è rappresentata tale relazione. Grazie all'utilizzo della grafica sono state sviluppate varie tecniche di raffigurazione. La scelta di

¹ *We can think of visualizations as adjustable mappings from data to visual form to the human perceiver* (Card et al., 1999)

² *Nothing in the world is purely spatial or purely temporal; everything is process* (Blaut, 1961)

una modalità di visualizzazione “adeguata” è spesso un problema, dovuto principalmente alla difficoltà di trovare un’opportuna icona in grado di rappresentare ed evidenziare al meglio le caratteristiche di interesse di un fenomeno.

In questo capitolo, si riportano esempi di visualizzazioni che enfatizzano l’aspetto dinamico dell’informazione e che mirano a mostrare come il loro utilizzo possa essere di supporto e di stimolo alla comprensione.

Le prime raffigurazioni proposte trattano il problema della visualizzazione di particolari avvenimenti storici, eventi quindi legati a una successione cronologica precisa. Si passa poi al tema più specifico della raffigurazione dei tempi di viaggio, discutendone gli esempi più significativi.

Evoluzione storica

Nel 1765 Joseph Priestley fu il primo a usare la “**Time line**” per rappresentare la localizzazione temporale di eventi storici. Nell’esempio riportato in Figura 5.2 si trova raffigurata la durata della vita di personaggi famosi vissuti nell’arco di tempo dal 1200 al 1750.

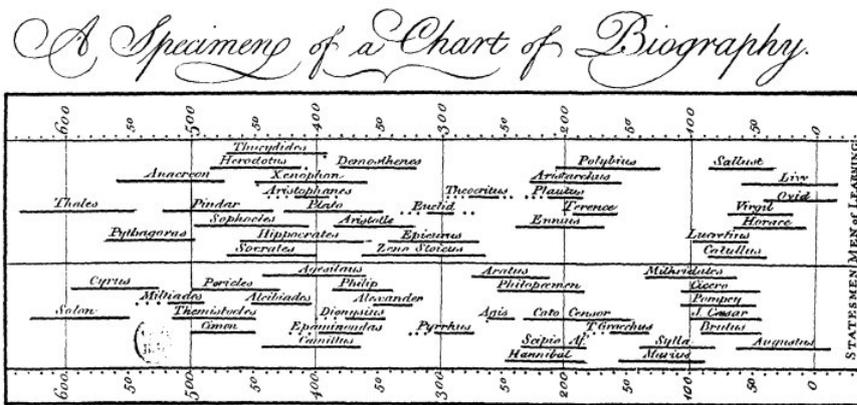


Figura 5.2: “Time line” biografica (Priestley, 1765)

Nel 1861 Minard creò la mappa dell’avanzata e della ritirata dell’esercito Napoleonico dalla campagna di Russia del 1812-1813 (**Carta di Minard**). Egli riuscì a rappresentare in una singola immagine bidimensionale la disastrosa marcia grazie alla combinazione di differenti tipi di informazioni grafiche e di dati multidimensionali (Figura 5.3).

Lo spessore delle curve (in marrone è rappresentata la curva dell’avanzata e in nero quella della ritirata) indica il tragico ridursi dell’armata durante la campagna. L’andamento delle curve mostra la direzione di marcia e la posizione geografica delle truppe. La presenza di alcune date indicative e delle temperature registrate permette una ricostruzione precisa dell’evento storico.

Tra le rappresentazioni più recenti possiamo ricordare semplici **tabelle a due entrate** (Figura 5.5), spesso usate negli atlanti stradali, o i **diagrammi a barre**³ dove sono riportati i tempi di viaggio richiesti per un determinato spostamento (Figura 5.6).

| | | ORE | | |
|----|-----------|-----------|------|--------|
| | | Amsterdam | Roma | Zurigo |
| KM | Amsterdam | | 15 | 10 |
| | Roma | 1500 | | 5 |
| | Zurigo | 1000 | 500 | |

Figura 5.5: Tabella a due entrate

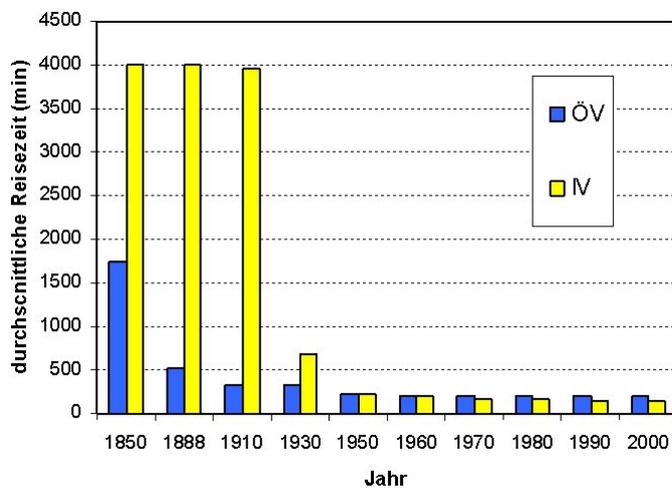


Figura 5.6: Diagramma a barre per i tempi di viaggio Ginevra-Lucerne, 1850-2000 (Fonte: COST Aktion 340)

Un'ulteriore possibilità consiste nel visualizzare il tempo con delle **isocrone**. Grazie all'ausilio di isolinee o di scale di colore si possono facilmente illustrare le zone raggiungibili in uno stesso intervallo di tempo partendo da una determinata località. In queste raffigurazioni, la distanza delle isolinee è proporzionale al tempo di viaggio.

³ William Payfair (1759-1823) creò il primo moderno grafico a barre, dal quale presero forma i moderni diagrammi.



Figura 5.7: Esempio di isolinee - Particolare dalla mappa della metropolitana di Londra⁴

In Figura 5.7 è riportato un particolare della mappa della metropolitana di Londra, dove sono rappresentati i tempi di viaggio calcolati dalla stazione di *Elephant and Castle*. In Figura 5.8 sono visualizzati i tempi di viaggio (trasporto ferroviario) dalla stazione di Zurigo calcolati per l'anno 1997 con 11 diverse scale di colore.

Bahnreisezeiten von Zürich im Jahre 1997



50 km

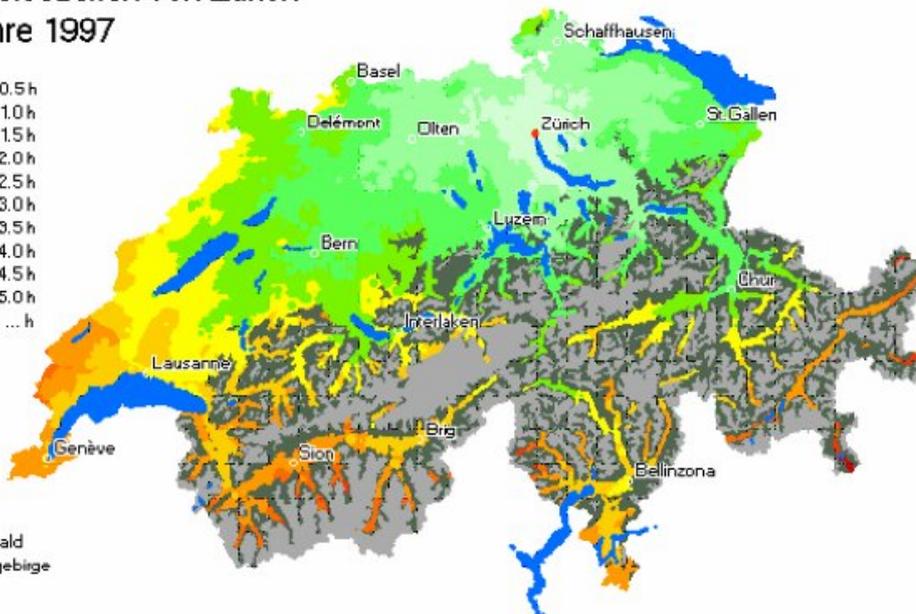


Figura 5.8: Esempio di isocrone con tempi di viaggio calcolati da Zurigo (Fröhlich, 2002)

⁴ <http://www.oskarlin.com/2005/11/29/time-travel>

Le carte del tempo

Le **carte del tempo** costituiscono un'altra possibilità per la visualizzazione dei tempi di viaggio e sono la soluzione analizzata e discussa più ampiamente in questo capitolo. In tale rappresentazione, la distanza tra due punti non è considerata proporzionale alla loro distanza fisica (come avviene nelle carte topografiche), ma alla distanza temporale che li divide. Di conseguenza, due località facilmente raggiungibili saranno raffigurate vicine; al contrario, all'aumentare dei tempi di viaggio aumenterà anche la loro distanza fisica sulla carta del tempo.

Queste raffigurazioni, a differenza delle isocrone, sono in grado di mettere in evidenza le connessioni temporali sull'intero territorio esaminato e non solamente i tempi di viaggio calcolati da una sola località. Tale aspetto presenta dei vantaggi rispetto alle modalità di raffigurazione mostrate fino ad ora, offrendo la possibilità di poter rappresentare su carta la sproporzione tra spazio e tempo.

Come verrà chiarito più avanti in questo capitolo, in una rappresentazione bidimensionale non è possibile riprodurre in modo esatto i tempi di viaggio tra tutte le località, in quanto non possono essere sempre proporzionali alle distanze fisiche. Risulta quindi chiaro che, indipendentemente dalla modalità di calcolo e dall'algoritmo scelto, le carte del tempo contengono delle distorsioni.

Anamorfosi e cartogrammi

In cartografia per risolvere i conflitti geometrici di prossimità si può ricorrere alla tecnica dell'anamorfosi, che consiste nel dissimulare una figura o un oggetto deformandolo, permettendone così una trasformazione locale (Figura 5.9).

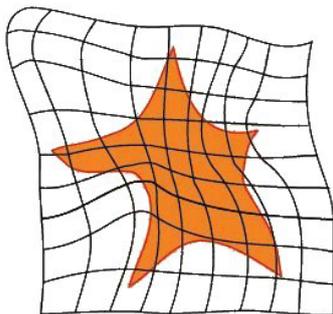


Figura 5.9: Esempio di anamorfosi

Questa tecnica si traduce in carte tematiche⁵ molto particolari dette anche **cartogrammi**, nei quali la forma degli oggetti o la distanza tra gli oggetti non è preservata in quanto si è

⁵ Le carte tematiche convenzionali raffigurano i dati utilizzando come base geometrica la superficie territoriale e non altre variabili.



modificata la scala in funzione di un valore/fenomeno da rappresentare⁶ (Figura 5.13). La geometria degli oggetti è “coscientemente” distorta, al fine di visualizzare un particolare contenuto tematico (Thrower, 1972).

Qui di seguito, ne tracciamo le principali caratteristiche tratte dalla descrizione fatta da Canters (2002).

La variante più comune è rappresentata dai **cartogrammi areali** (*value-by-area cartograms*). In questa tipologia di carta, le dimensioni delle partizioni territoriali (gli stati, le regioni di uno stato, ecc.) sono alterate e rese proporzionali, non all’effettiva superficie territoriale, bensì a fenomeni demografici o economici, quali ad esempio la quantità della popolazione o il prodotto interno lordo. In Figura 5.10 è riportato l’esempio di cartogrammi raffiguranti la densità della popolazione nelle contee della California.

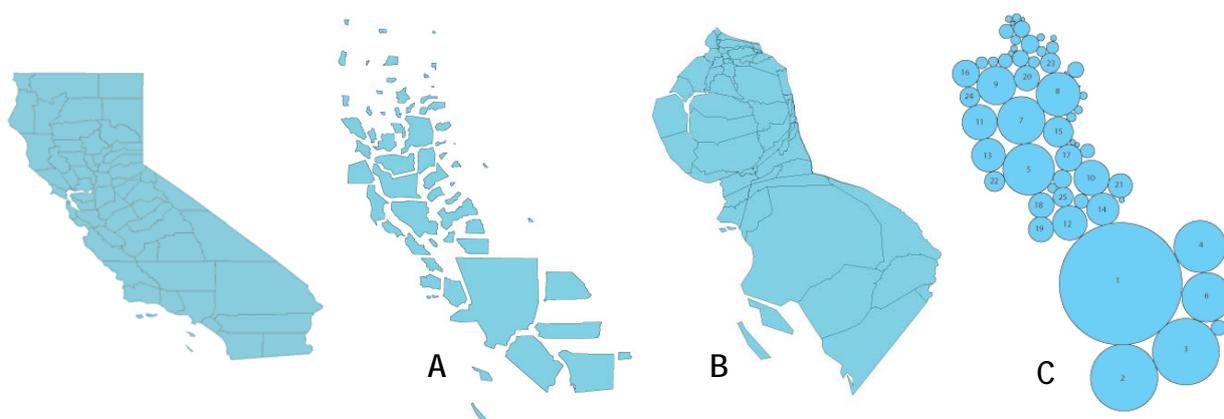


Figura 5.10: Cartogramma areale a poligoni non contigui (A), a poligoni contigui (B) e cartogramma di Dorling (C)⁷

La variante meno conosciuta, ma di maggiore interesse per la tematica trattata in questo capitolo, è rappresentata dai **cartogrammi a distanza**. In queste carte la distanza tra i punti di una carta è proporzionale alla variabile tematica analizzata. Due punti si troveranno tanto più vicini quanto lo sono in termini di tempo di viaggio, costi di viaggio, livello di interazione socioeconomica, ecc.

Esistono fondamentalmente due tipi di cartogrammi a distanza. Il primo analizza le relazioni intercorrenti tra un punto specifico della carta e il resto del territorio. La costruzione di questo tipo di cartogramma si basa sulla proiezione azimutale equidistante, che raffigura in modo corretto le direzioni, ma rappresenta le distanze dal punto proporzionali alla variabile analizzata. In Figura 5.11 è proposta la carta di Monmonier (1993), dove le distanze dalla città al centro del cartogramma sono proporzionali al costo del viaggio verso le località distribuite sui cerchi concentrici.

⁶ Origine: il termine anamorfoosi dal greco "anamorfo", *ana* (nuovo) e *morphe* (forma) sta ad indicare un disegno in cui appare un’immagine distorta, la trasformazione delle proporzioni di un disegno.

⁷ http://www.ncgia.ucsb.edu/projects/Cartogram_Central/types.html

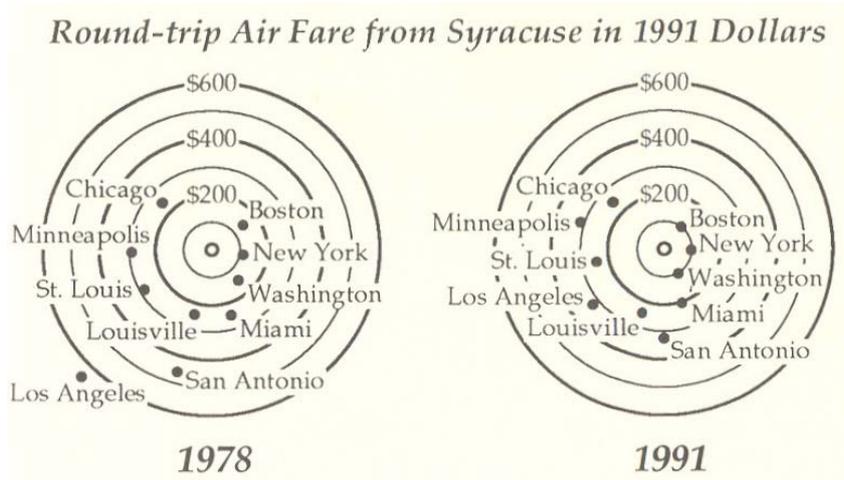


Figura 5.11: Confronto tra i costi di viaggio dal 1978 al 1991 per la città di Syracuse (Monmonier, 1993)

Il secondo tipo di cartogramma a distanza si propone invece di raffigurare tutte le possibili connessioni tra i punti di una carta. In Figura 5.12 è riportato un altro esempio di cartogramma a distanza (Muller, 1982), dove sono raffigurati i tempi di viaggio tra 10 località della Germania con modalità di trasporto diverse.

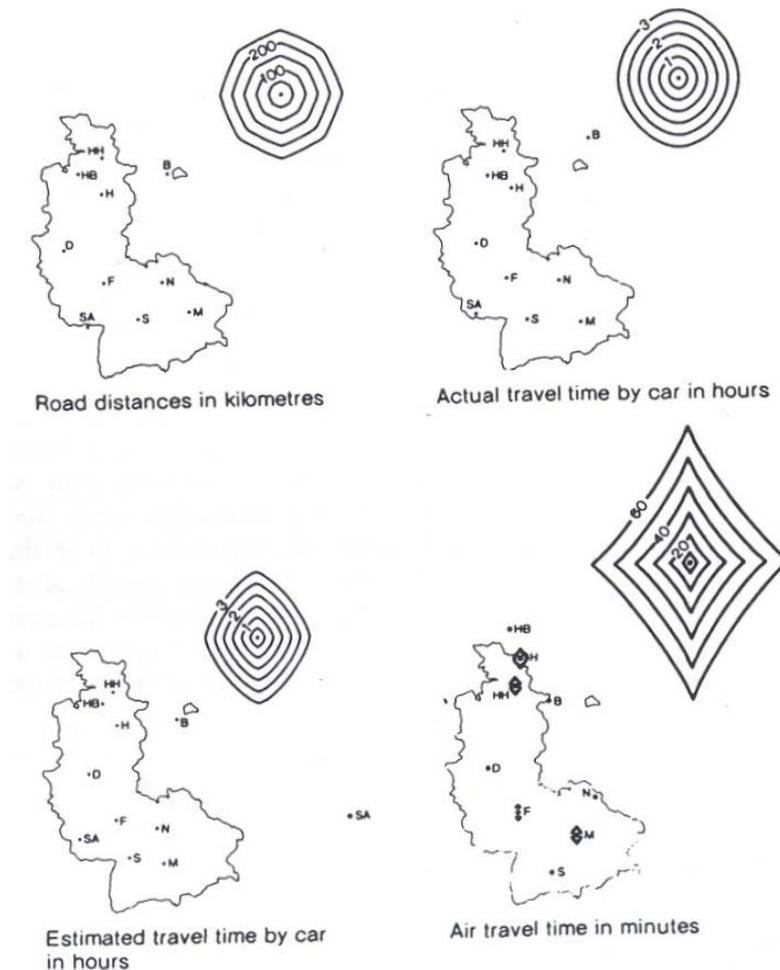


Figura 5.12: Tempi di viaggio tra 10 località della Germania con diverse modalità di viaggio (Muller, 1982)

Soluzioni matematiche più recenti

Come abbiamo potuto vedere l'idea di considerare il tempo di viaggio tra due località come una distanza "virtuale" non è sicuramente pratica recente. Oltre ai lavori già citati, possiamo ancora ricordare la soluzione proposta da Ahmed e Miller (2007) e la singolare carta del tempo di Dicken (1998), dove è illustrato il restringimento del globo dovuto ai miglioramenti infrastrutturali avvenuti dal 1500 a oggi.

Ancora da citare è sicuramente il lavoro di Spiekermann e Wegener (1993 e 1994). Essi costruirono, basandosi su un precedente lavoro (Shimizu, 1993), le prime carte del tempo dell'Europa riguardanti il traffico ferroviario.

La costruzione di queste carte è stata realizzata adottando un algoritmo di *scaling* multidimensionale (MSD) (Spiekermann e Wegener, 1994), che ha permesso di ottenere risultati davvero interessanti e di risolvere il problema dei margini dell'area di studio.

In Figura 5.13 ne è riportato un esempio, dove sono raffigurati i tempi di viaggio per l'anno 1993. Queste carte hanno lo svantaggio di enfatizzare l'importanza della distribuzione spaziale dei punti di accesso alla rete ferroviaria e non il reale tempo di viaggio tra le località.

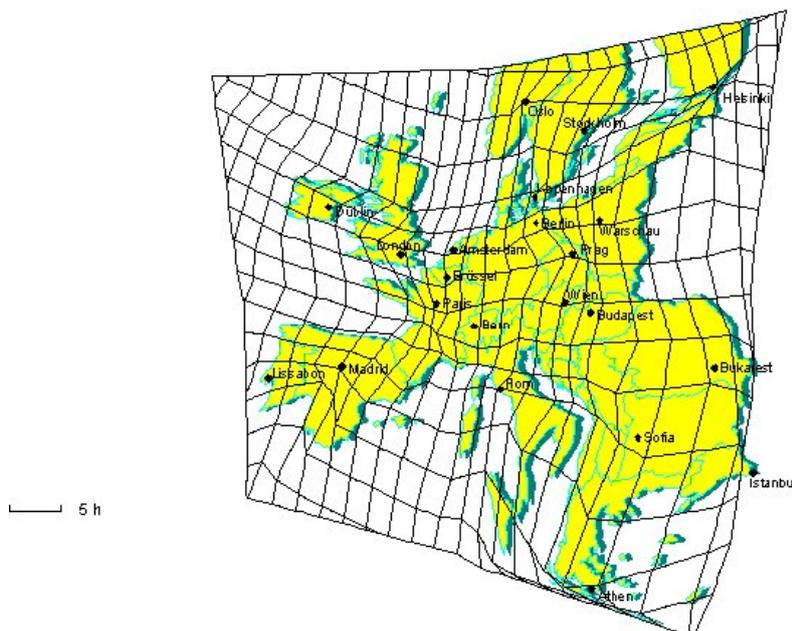


Figura 5.13: Esempio di carta del tempo (Spiekermann e Wegener, 1994)

L'Hostis (1997) riuscì a risolvere questo problema, proponendo le prime **carte del tempo tridimensionali** (Figura 5.14), dove fu in grado di raggruppare i tempi di viaggio per categorie di mezzi di trasporto. In questo modo, i collegamenti minori non vanno a influenzare eccessivamente il quadro completo degli spostamenti, anche se la leggibilità della carta non è ancora ottimale.

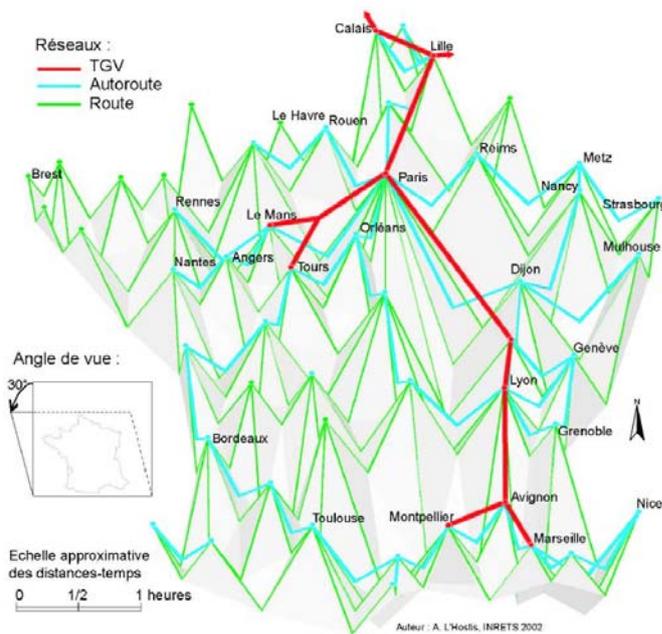


Figura 5.14: Carta del tempo tridimensionale (L'Hostis, 1997)

Riflessioni sulle carte del tempo

Qui di seguito, proviamo a riassumere i principali problemi legati alle carte del tempo emersi dagli esempi fino a ora descritti.

Abbiamo visto il problema dei margini dell'area di studio, l'influenza delle diverse modalità di trasporto sulle velocità di viaggio e la questione della distribuzione spaziale degli accessi alle infrastrutture.

Esiste poi la possibilità che le distorsioni presenti sulla carta, vadano a cambiare la topologia degli oggetti rappresentati, che una località venga quindi a trovarsi in tutt'altra posizione rispetto a quella reale, stravolgendo così la geografia del territorio e di conseguenza anche la leggibilità stessa del prodotto. Come sarà evidenziato più avanti, questo problema è legato al campione di punti incluso nei calcoli, sia in termini di numero di punti che di distribuzione spaziale dei punti stessi sul territorio.

Vi è inoltre la necessità che il processo di realizzazione delle carte sia tale da permettere che i prodotti finali, soprattutto se appartenenti a una serie storica, siano facilmente confrontabili.

Si possono infine aggiungere una serie di considerazioni da fare riguardo alla leggibilità di queste carte. Pur contenendo distorsioni anche di notevole grandezza, le carte del tempo devono riuscire a mantenere un alto grado di leggibilità e poter comunicare le informazioni in maniera efficiente (se il lettore deve studiare per capire l'immagine, la visualizzazione non è efficace). Importante, infatti, è che il fine della carta non sia quello



di impressionare, ma quello di interpretarne il contenuto e quindi il messaggio che vuole essere trasmesso.

Centrale per tale tipo di carta resta quindi la corretta comprensione dei dati raffigurati e la garanzia che ogni osservatore estragga dalla carta la medesima informazione. Le distorsioni presenti sulla carta devono diventare una chiave di lettura efficace e non un elemento di disturbo per il lettore.

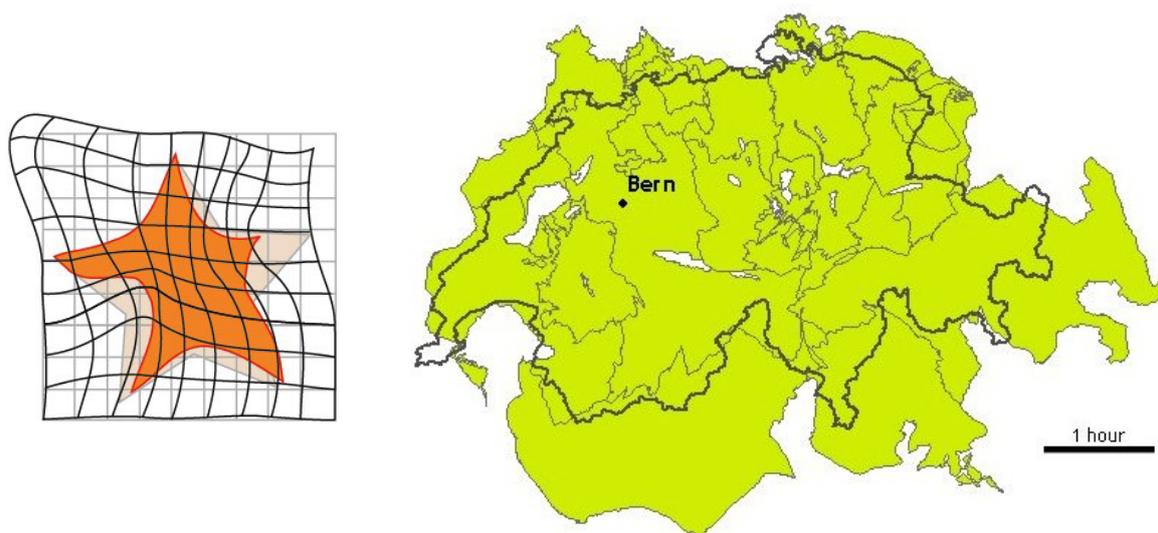


Figura 5.15: Anamorfosi con carta di riferimento

Oltre alla scala di rappresentazione (Griffin, 1983), un'utile misura per migliorare la leggibilità di queste carte è spesso rappresentata da una figura di riferimento sovrapposta o anteposta alla carta (Dent, 1975) (Figura 5.15).

Tenendo conto di tali riflessioni si è voluta adottare una tecnica che permettesse una costruzione delle carte del tempo di facile realizzazione e di alta leggibilità, provando a raggiungere un risultato che soddisfacesse le varie esigenze.

La soluzione con il metodo dei minimi quadrati

Ripartendo dall'assunto che in una rappresentazione bidimensionale non è possibile riprodurre in modo esatto i tempi di viaggio tra tutte le località, ora si descrive la soluzione adottata in questa parte del lavoro.

Per calcolare le carte del tempo è necessario assumere una scala temporale. Le carte sono generate attraverso una trasformazione delle coordinate spaziali in coordinate temporali.

Per determinare i parametri della trasformazione (delle coordinate spaziali in coordinate temporali) da applicare alle coordinate spaziali, è necessario conoscere le coordinate temporali di un numero sufficiente di località in entrambi i sistemi.

Prendendo in esame tre località e i relativi tempi di viaggio, date le coordinate temporali di due località, è possibile calcolare in modo preciso le nuove coordinate temporali della terza. Il tempo di viaggio tra due località si considera come una distanza “virtuale”, fissando sulla carta la lunghezza dell’unità di tempo (**scala temporale**).

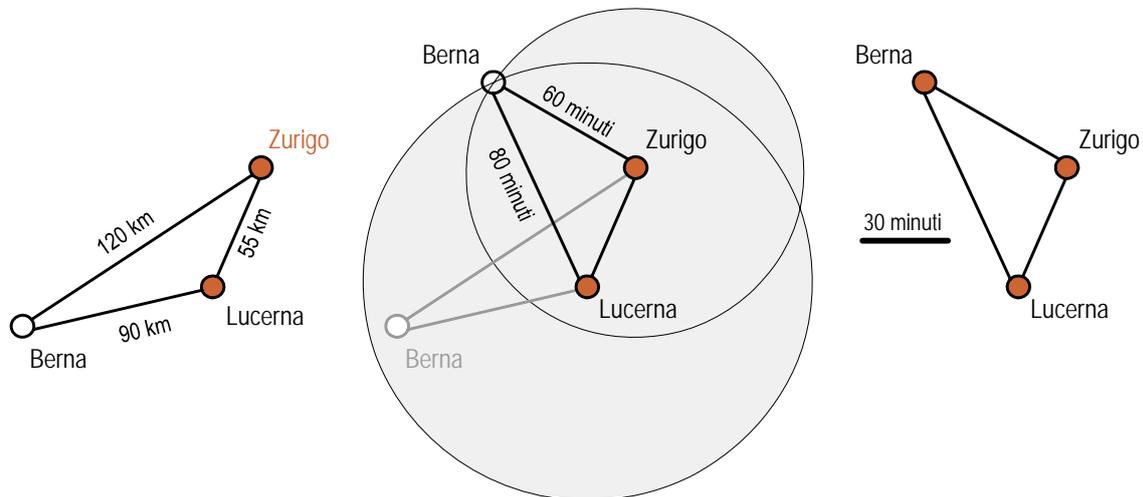


Figura 5.16: Calcolo delle coordinate temporali considerando tre località

Per meglio spiegare la metodologia utilizzata per la costruzione delle carte del tempo, immaginiamo di avere dapprima due località (Zurigo e Lucerna) di coordinate temporali note (Figura 5.16). Abbiamo poi una terza località (Berna) della quale si vuole calcolare la posizione nella carta del tempo.

La distanza in chilometri è di 120 km da Zurigo e di 90 km da Lucerna e i tempi di viaggio rispettivamente di 60 e di 80 minuti⁸.

Fissata la scala temporale, il calcolo della nuova posizione di Berna è fatto descrivendo due circonferenze che corrispondono ai tempi di viaggio. Le nuove coordinate sono, in questo modo, individuate sull’intersecarsi delle due circonferenze.

Aumentando il numero dei punti, si creano inevitabilmente dei conflitti geometrici, in quanto i tempi di viaggio non sono più proporzionali alle distanze. Come già accennato in precedenza, in una rappresentazione bidimensionale non è quindi possibile riprodurre in modo esatto i tempi di viaggio tra tutte le località. Per risolvere questo problema diventa necessario ricorrere alla statistica.

In questo lavoro, si è costruito un sistema di equazione per calcolare le nuove coordinate temporali in funzione dei tempi di viaggio, considerandoli come osservazioni. La soluzione è stata raggiunta applicando il **metodo dei minimi quadrati**, assicurando che le distanze tra le località potessero rappresentare al meglio i tempi di viaggio. Le nuove coordinate sono

⁸ Nell’esempio considerato i tempi di viaggio risultano minori per la distanza maggiore. Questo è dovuto al collegamento autostradale tra Berna e Zurigo.



state calcolate in modo tale da garantire che i residui fossero il più piccoli possibili (minimizzazione della somma dei quadrati dei residui) (Figura 5.17).

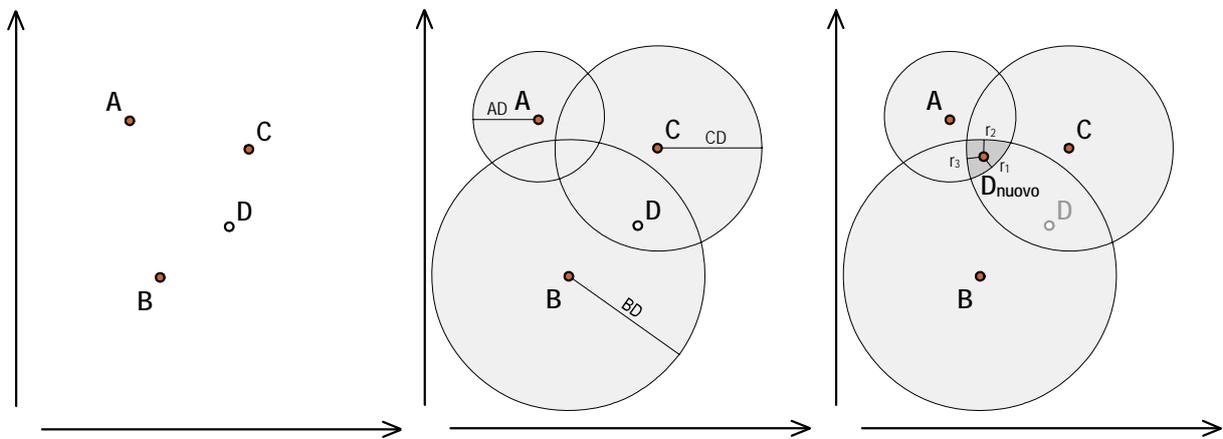


Figura 5.17: Calcolo delle coordinate temporali considerando quattro località

L'equazione che esprime il tempo di viaggio in funzione delle coordinate temporali (per le località P_i e P_j) è la seguente (Carosio, 2003):

$$\text{Tempo di viaggio } (P_i - P_j) + r_{ij} = \sqrt{(Y_i - Y_j)^2 + (X_i - X_j)^2}$$

dove

$$\sum r_{ij}^2 = \min$$

Correzioni aggiuntive

L'alto numero di località considerato nella realizzazione delle carte (più di 3'000), ha portato inizialmente a risultati grafici in parte falsificati, in quanto le località minori andavano a influenzare eccessivamente il quadro generale della mobilità.

Si è quindi optato per un calcolo da realizzarsi in due fasi distinte. Nella prima fase si sono compensati i tempi di viaggio tra i più importanti nodi stradali (30) e ferroviari (22) della Svizzera. Nel caso della rete stradale si sono considerati anche alcune località nei paesi confinanti, al fine di ridurre i problemi di margine. Per la rete ferroviaria invece non si sono potuti includere gli stessi nodi, in quanto i collegamenti con l'estero contenuti nella banca dati utilizzata considerano solo treni diretti e ad alta velocità.

Successivamente, si sono calcolate le coordinate delle restanti località, prendendo in considerazione nel calcolo solo i collegamenti tra queste e i nodi principali. Si è attribuito quindi un peso (p_{ij}) minore ai tempi di viaggio per i collegamenti più lunghi, in modo da non sovrastimarne l'influenza nella compensazione e mantenendo fisse le coordinate calcolate nella prima fase.

Nella seconda fase, la condizione risultava la seguente:

$$\sum p_{ij} r_{ij}^2 = \min$$

Questo approccio trova conferma nel numero relativamente basso di viaggi a lunga distanza. Va ricordato, infatti, che nei paesi industrializzati i viaggi di sola andata di lunghezza superiore ai 100 km coprono solo l'1-1.5% del totale (Axhausen *et al.*, 2008).

Per garantire una soluzione il più esatta possibile, la scala (grandezza geometrica per le unità temporali) e l'orientamento della carta sono state convenute prima della trasformazione. Questo ha garantito di calcolare una posizione quasi ottimale per tutte le località e di rappresentare i tempi di viaggio con una distorsione ridotta dell'immagine (Figura 5.18).



Figura 5.18: Ipotesi per il calcolo delle nuove coordinate

Le prime carte del tempo prodotte per il traffico ferroviario sono risultate graficamente poco soddisfacenti. Le cause erano da evidenziarsi nei collegamenti poco funzionali tra Bellinzona e Coira e tra Bellinzona e Sion per le decadi 1950, 1960 e 1970. Nel primo caso, infatti, si era costretti a transitare per Zurigo e nel secondo caso per Berna e Losanna.

La soluzione si è trovata basandosi sull'idea della statistica robusta (Carosio, 2001). I sopraccitati collegamenti sono stati trattati come *outliers*, ai quali è stato assegnato un peso minore, riducendoli del 20% per gli anni 1960 e 1970 e del 40% per il 1950.



Realizzazione delle carte del tempo

La realizzazione delle carte del tempo ha previsto una fase di calcolo delle nuove coordinate con il metodo dei minimi quadrati, seguita dalla realizzazione vera e propria delle carte in un software commerciale.

Utilizzo di LTOP

La soluzione con il metodo dei minimi quadrati per il calcolo delle nuove coordinate è stata realizzata per ragioni pratiche con il programma esistente **LTOP** (Ufficio Federale di Topografia, <http://www.swisstopo.ch>), utilizzato in Svizzera per la compensazione di misure geodetiche.

LTOP è in grado di calcolare le nuove coordinate, assegnando alle singole osservazioni pesi diversi in base ai valori di deviazione standard (Gubler, 2002). Per il calcolo, la città di Berna è stata scelta come punto fisso e l'azimut tra Ginevra e St. Moritz (Figura 5.18) mantenuto costante (*datum*).

Realizzazione in ArcGIS

Ottenute le nuove coordinate, per la realizzazione delle carte del tempo è stata resa necessaria una trasformazione continua dell'informazione cartografica. Per questa fase è stato scelto il software **ArcGIS** (ESRI, <http://www.esri.com>).

In ArcMap, interfaccia grafica del programma, si possono generare vettori di spostamento che permettono di realizzare la trasformazione continua della carta con il metodo a foglio di gomma (*rubbersheet*).

Nel caso di un'irregolare distribuzione spaziale dei vettori, l'algoritmo standard di ArcGIS non offre una soluzione grafica soddisfacente per lo scopo del nostro lavoro. I primi risultati hanno indicato, infatti, zone di sovrapposizione e distorsioni dell'immagine molto forti (Figura 5.19).

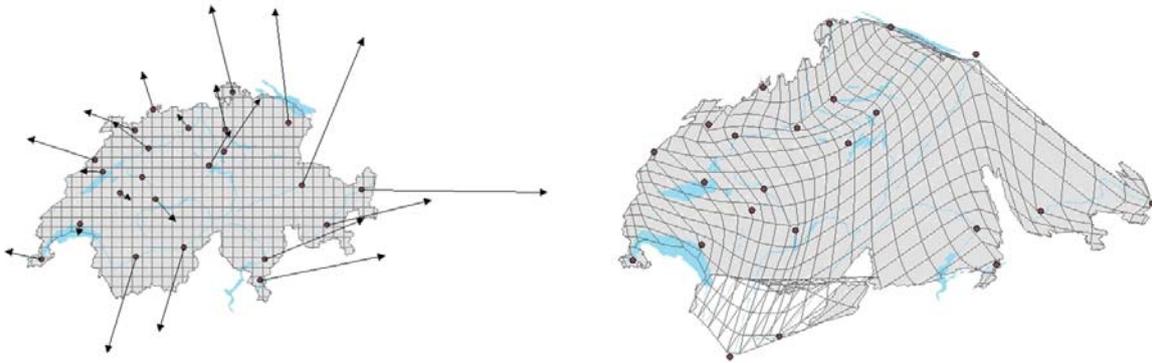
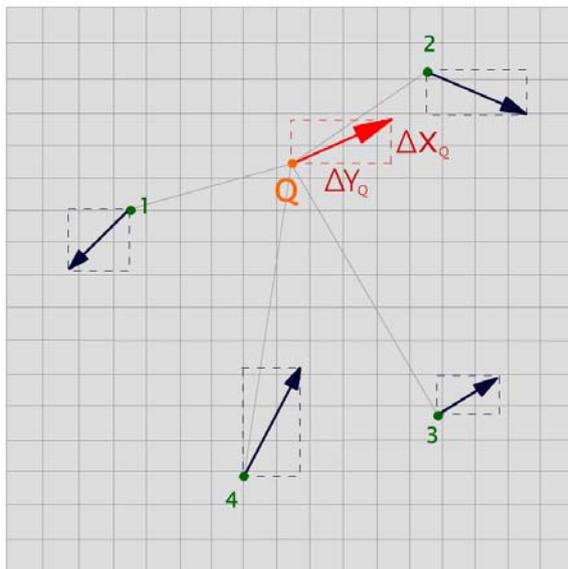


Figura 5.19: Trasformazione standard con vettori di spostamento

Per risolvere questo problema, in *Visual Basic* è stata programmata un'interpolazione secondo la media aritmetica delle deformazioni puntuali su una griglia a maglia regolare di dieci chilometri. Il peso utilizzato p_i è inversamente proporzionale alla terza potenza della distanza (Figura 5.20).



$$\Delta X_Q = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta X_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

$$\Delta Y_Q = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta Y_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

, dove

$$p_i = \frac{1}{d_i^3}$$

Figura 5.20: Trasformazione dei singoli punti della griglia

Grazie a questa trasformazione, sono state prodotte nuove coordinate trasformate per ogni punto della griglia e di conseguenza nuovi vettori spostamento (Figura 5.21).

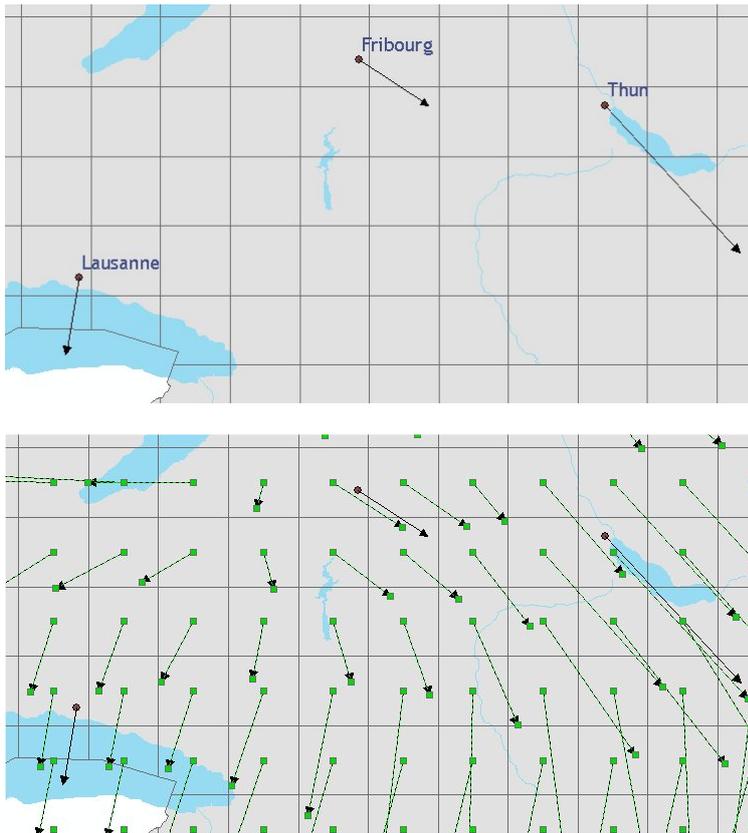


Figura 5.21: Nuovi vettori spostamento per ogni maglia della griglia

La regolarità e la maggiore densità dei vettori hanno permesso di ottenere un maggiore controllo sull'algoritmo di trasformazione standard offerto da ArcGIS e hanno garantito risultati graficamente soddisfacenti (Figura 5.22) (Carosio *et al.*, 2005).

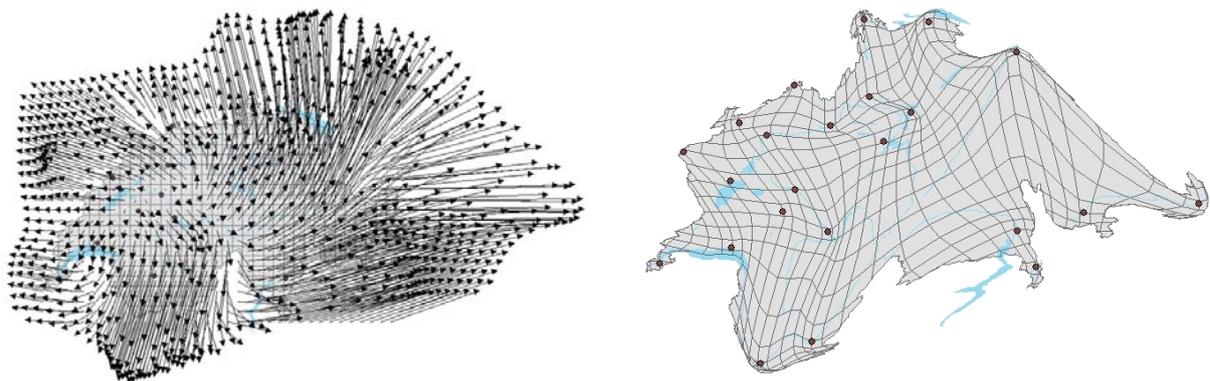


Figura 5.22: Trasformazione con vettori di spostamento più fitti

Dati storici impiegati

Nell'ambito del progetto di ricerca europeo *Cost-Transport Towards a European Intermodal Transport Network: Lessons from History* (**COST Aktion 340**), eseguito presso l'Istituto di Pianificazione dei Sistemi di Trasporto del Politecnico di Zurigo (IVT, Eth, Zurigo) in collaborazione con il Centro per la Storia del Traffico di Berna (ViaStoria) e l'Istituto di Storia dell'Università di Neuchâtel, è stata realizzata una banca dati relativa allo sviluppo della rete viaria e ferroviaria svizzera (Fröhlich *et al.*, 2004). Uno degli scopi del progetto era la produzione di matrici di tempi di viaggio dal 1850 al 2000, necessarie al calcolo dell'accessibilità (Fröhlich e Axhausen, 2002).

Come rete stradale di riferimento per l'anno 2000 si è utilizzato il prodotto **MicroDrive** (MicroGIS). Questa rete copre tutto il territorio svizzero ed è costituita da 20'000 archi e circa 15'000 nodi. Per gli anni precedenti al 2000 sono stati considerati i cambiamenti (aperture, miglioramenti e allargamenti di corsie) riguardanti sia autostrade che le strade principali. Per lo sviluppo delle autostrade si sono utilizzati i dati ASTRA (2001).

La raccolta dei dati per quel che riguarda le strade principali è stato molto laborioso, in quanto l'amministrazione cantonale competente non è in possesso di una documentazione completa. Di conseguenza, sono state ricostruite le strade principali partendo da diverse carte, riviste, progetti e preventivi. In seguito i dati sono stati confrontati e armonizzati con i dati attuali.

I tempi di viaggio tra i 2'896 comuni considerati nel progetto sono stati calcolati grazie al software VISUM.

Risultati e commenti

Utilizzando la metodologia sopra descritta, sono state realizzate le carte del tempo per il trasporto ferroviario e quello su strada della Svizzera dal 1950 al 2000 (Figura 5.23).

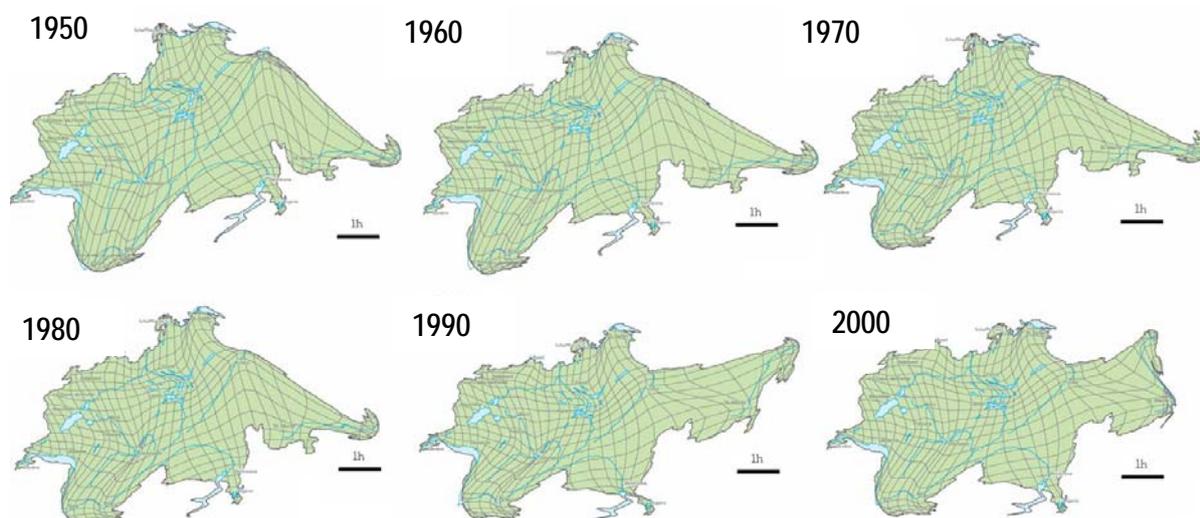


Figura 5.23A: Carte del tempo per il trasporto ferroviario in Svizzera 1950 - 2000

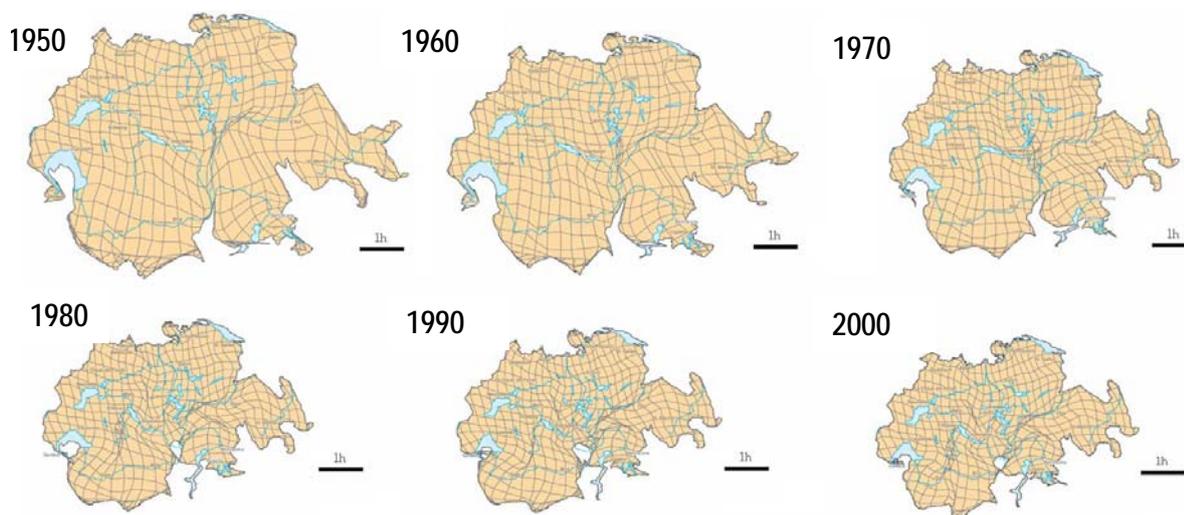


Figura 5.23B: Carte del tempo per il trasporto su strada in Svizzera 1950 - 2000

Se si considera la superficie del paese in scala temporale, si può notare come nel caso del trasporto su strada le dimensioni si siano ridotte di circa il 50%, e solo di un quinto per il trasporto ferroviario (Tabella 5.1). Quest'ultimo dato è in parte attribuibile al fatto che nell'analisi dei tempi di viaggio non si è tenuto conto dei miglioramenti apportati riguardanti la maggiore frequenza dei collegamenti offerti negli ultimi decenni.

| | Trasporto su strada | Trasporto ferroviario |
|------|---------------------|-----------------------|
| 1950 | 100% | 100% |
| 1960 | 82% | 92% |
| 1970 | 61% | 82% |
| 1980 | 52% | 79% |
| 1990 | 49% | 79% |
| 2000 | 47% | 83% |

Tabella 5.1: Riduzioni in percentuale dell'area del paese nelle carte del tempo (Carosio *et al.*, 2005)

La mancanza di forti distorsioni nelle carte evidenzia come la Svizzera sia riuscita negli ultimi decenni a servire in maniera efficiente anche le zone più remote del paese.

Dalla serie storica prodotta, è possibile anche notare come il paese abbia praticamente cessato di restringersi dopo il 1970 per quel che riguarda il trasporto ferroviario⁹ e dopo il 1980 per quel che riguarda il trasporto su strada. Le cause di quest'ultimo fenomeno sono da ricercarsi in alcuni fattori che hanno contenuto la riduzione dei tempi di viaggio, quali l'imposizione dei limiti di velocità avvenuta negli anni '80, lo spostamento pianificato degli investimenti dal cuore economico del paese alle zone più periferiche e la continua crescita di possessori di auto con un conseguente aumento dei fenomeni di congestione.

Conclusioni e possibili sviluppi

Le carte del tempo prodotte costituiscono un elemento cartografico nuovo per gli atlanti storici e rappresentano un valido supporto per l'analisi dei cambiamenti demografici avvenuti in Svizzera nel secondo dopoguerra e per lo studio dei miglioramenti infrastrutturali che hanno permesso di ridurre i tempi di viaggio su tutto il territorio nazionale.

La possibilità di poter rappresentare su carta questa sproporzione tra spazio e tempo può essere sicuramente importante per molte analisi strategiche. Queste carte rappresentano, infatti, uno strumento per l'individuazione di un eventuale deficit infrastrutturale e per il conseguente studio degli investimenti.

In ultimo è da segnalare come la metodologia proposta possa essere utilizzata per lavori dove sono richieste trasformazioni che prevedono forti distorsioni, quali ad esempio lavori di georeferenziazione di carte storiche.

Dal punto di vista metodologico, se da un lato si sono ottenuti risultati graficamente soddisfacenti e ben interpretabili, dall'altro l'automatizzazione auspicata nella creazione delle carte è stata solo in parte raggiunta. Allo stato attuale, è possibile solo un processo semiautomatico della procedura.

⁹ In questo caso bisogna sempre tenere a mente che non sono stati considerati i miglioramenti avvenuti riguardo alla frequenza dei collegamenti.



Bibliografia

- Ahmed, N. e H. J. Miller (2007) Time-space transformations of geographic space for exploring, analyzing and visualizing transportation systems, *Journal of Transport Geography*, 15(1), 2-17.
- ASTRA (2001) *Info 2001-Schweizerische Nationalstrassen* (Berne: Bundesamt für Strassen).
- Axhausen, K.W., C. Dolci, Ph. Fröhlich, M. Scherer e A. Carosio (2008) Constructing time-scaled maps: Switzerland: 1950 to 2000 in *Transport Reviews*, Volume 28, Issue 3 May 2008 , 391-413.
- Bertin, J. (1977) *La Graphique et le Traitement Graphique de l'Information*, Flammarion, Paris, France.
- Blaut, J.M. (1961) Space and Process, in: *The Professional Geographer*, Volume 13, 1-7.
- Canter, F. (2002) *Small-scale Map Projection Design*, London: Taylor & Francis 2002.
- Card, S.K., J.D. Mackinlay e B. Shneiderman (Editors) (1999), *Readings in Information Visualization*, Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco, CA.
- Carosio, A. (2001) The methods of robust statistics for applications in Geodesy and GIS, IAG SSG 4.190, March 2001, IGP-Bericht, 296, IGP, ETH Zürich, Zürich.
- Carosio, A. (2003) *Ausgleichsrechnung I*, Zürich: Vorlesungsskript IGP, ETH Zürich.
- Carosio, A., C. Dolci e M. Scherer (2005) Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz: Eine kartographische Darstellung, in K.W. Axhausen and L. Hurni (eds.) *Zeitkarten Schweiz 1950 - 2000*, 41-62, IVT and IKA, ETH Zürich, Zürich.
- Carosio, A., C. Dolci e M. Scherer (2005) Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz: Eine kartographische Darstellung [Accessibility change in Switzerland: A cartographic history], in: K. W. Axhausen and L. Hurni (Eds) *Zeitkarten Schweiz 1950–2000*, 41–62 (Zürich: IVT e IKA, ETH Zürich).
- Dent, B.D. (1975) Communicative aspects of value-by-area cartograms, *American Cartographer*, 2, 154-168.
- Dicken, P. (1998) *Global Shift: Transforming the World Economy* (London: Paul Chapman).
- Fröhlich, P. e K.W. Axhausen (2002) Development of car-based accessibility in Switzerland from 1950 through 2000: First results, *Arbeitsbericht Verkehr- und Raumplanung*, 111, Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau (IVT), ETH, Zürich.

- Fröhlich, Ph., T. Frey, S. Reubi e H.-U. Schiedt (2004) Entwicklung des Transitverkehrs-Systems und deren Auswirkung auf die Raumnutzung in der Schweiz (COST 340): Verkehrsnetz-Datenbank, Arbeitsbericht Verkehrs- und Raumplanung, 208, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Griffin, T.C.L. (1983) Recognition of areal units on topological cartograms, *American Cartographer*, 10, 17-29.
- Gubler, E. (2002) Beschreibung zum Programm LTOP Version 9.4 [Description of the LTOP softwareversion 1994], Bundesamt für Landestopographie, Berne, http://www.swisstopo.ch/pub/download/download/geo_software/ltop_de.pdf.
- Kraak, M.J. (2003) The space-time cube revisited from a geovisualization perspective. 21st International Cartographic Conference, ICA Durban, 1988-1995.
- L'Hostis, A. (1997) A 3D Representation for Transportation Networks. 10th European Colloquium of Theoretical and Quantitative Geography, Rostock, Sept 1997.
- Minard, C.J. (1861) *Des Tableaux Graphiques et des Cartes Figuratives*, Paris: E. Thunot et Cie.
- Monmonier, M. (1993) *Mapping it Out*. Chicago: University of Chicago Press.
- Muller, J.-C. (1982) Non-Euclidean geographic spaces: mapping functional distances. In: *Geographical Analysis*, 14 (1982), 189-203.
- Priestley, J. (1765) *A chart of biography*, London, Thomas Jeffreys.
- Scherer, M. (2004) Erreichbarkeitsveränderungen in der Schweiz: Eine kartographische Darstellung, Semesterarbeit, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT), ETH Zürich, Zürich.
- Shimizu, E. (1993) Time-space Mapping Based on Topological Transformation of Physical Map, *Proceedings the 6th World Conference on Transport Research*, 1, 219-230.
- Spiekermann, K. e M. Wegener (1994) The shrinking continent: New time-spamaps of Europe, *Environment and Planning B*, 21 (5) 653-673.
- Thrower, N. (1972) *Maps and Man*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.





conclusioni

A conclusione del lavoro svolto nel corso del dottorato e descritto nella presente tesi si rende opportuno focalizzare l'attenzione su alcune considerazioni che, pur in parte già presenti nel testo, meritano di essere messe in evidenza.

Ritengo la mia tesi essere non tanto il punto di arrivo di un percorso di ricerca, quanto un contributo nello studio delle possibilità offerte dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) nel settore dei trasporti. Le nuove tecnologie, tra cui anche i GIS, influenzano in maniera sempre più determinante le applicazioni e la ricerca in questo particolare settore: dalla logistica alla pianificazione del trasporto pubblico e privato e dalla manutenzione del sistema di offerta alle informazioni in tempo reale sul traffico.

Come già esposto durante il lavoro, i GIS si prestano a supportare sia le attività degli specialisti del settore, sia la comunicazione di messaggi chiari e sintetici a un pubblico meno esperto, ottimizzando la gestione delle reti di trasporto e migliorando la comprensione dei fenomeni trattati.

Negli ultimi anni, grazie allo sviluppo di internet, molti servizi sono stati resi accessibili ad ampie categorie di utenza, e termini legati al traffico, tra i quali congestione, mobilità e sistemi di navigazione, sono entrati a far parte della nostra realtà quotidiana.

La pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto sono materie indubbiamente molto vaste, in grado di suggerire sempre nuovi spunti e aspetti da approfondire. Nei casi pratici studiati, si sono potute trattare solo alcune problematiche riguardanti i flussi di traffico, in particolar modo si è voluta prediligere l'analisi dell'aspetto dinamico-temporale degli spostamenti.

L'integrazione della componente temporale dell'informazione geografica non è ancora pienamente sviluppata come soluzione standardizzata nei GIS e i software oggi a disposizione non possiedono ancora vere e proprie soluzioni per la sua gestione.



Si ricorda, come il fenomeno del traffico, proprio per i molteplici fattori che lo caratterizzano e influenzano, venga analizzato utilizzando unità temporali e geografiche spesso molto differenti. Di frequente, si dispone di banche dati e statistiche considerevoli, facenti riferimento a intervalli temporali che variano dal dato in tempo reale, all'arco delle 24 ore, per arrivare a serie storiche di più anni. Lo stesso si può affermare per la dimensione spaziale. I dati possono interessare il singolo agglomerato urbano, il cantone (regione) fino a comprendere l'intero territorio nazionale e, in alcuni esempi, anche europeo.

Per questo motivo, gli approcci utilizzati differiscono molto tra loro, testimoniando una volta di più l'ampiezza della materia. Il lavoro ha aperto parentesi interessanti, offrendo soluzioni pratiche ai problemi con il fine di presentare i GIS come uno strumento spesso indispensabile per il trattamento dell'informazione. Si è dato largo spazio al tema dell'analisi e della visualizzazione dei dati, considerando centrale il ruolo comunicativo che possono svolgere questi sistemi.

A conclusione dell'esperienza raccolta nel corso del presente lavoro e durante la collaborazione con l'Istituto di Pianificazione dei Trasporti del Politecnico di Zurigo, si ritiene che la pianificazione e il controllo delle reti di trasporto richiedano spesso modelli di dati molto dissimili, a seconda degli aspetti analizzati. L'impiego dei GIS nel settore potrebbe essere facilitato e stimolato utilizzando basi di dati comuni in grado di migliorare l'interoperabilità tra le varie discipline e l'integrazione dell'informazione tra i diversi attori coinvolti nelle fasi di elaborazione e analisi dei dati.



curriculum vitae

Claudia Dolci

Title: Master in Geoinformation Science

Group of GIS and Theory of Errors
Institute of Geodesy and Photogrammetry (IGP)
ETH Hönggerberg
CH-8093 Zürich

Date of Birth: 30. September 1972

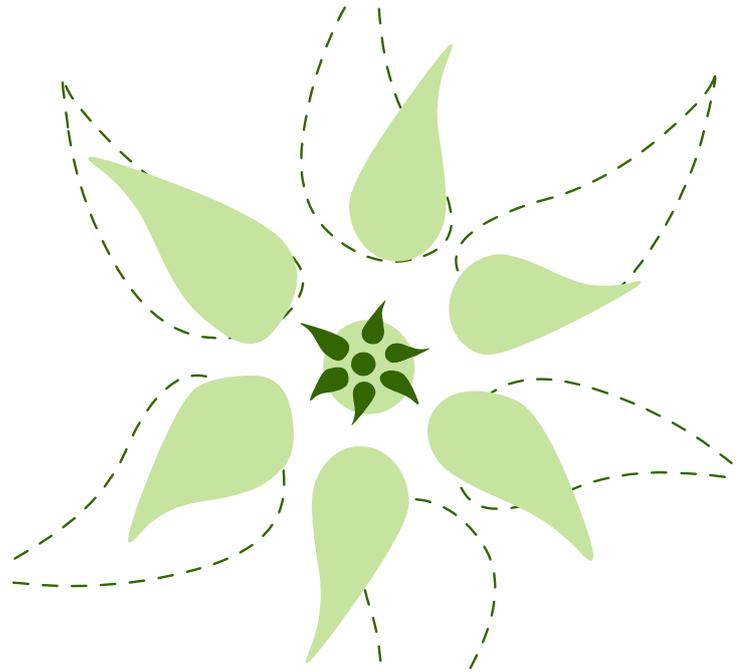
Nationality: Italian

Contact: dolci@geod.baug.ethz.ch

Education and professional experience

- | | |
|-------------|--|
| 2003 – 2008 | Scientific projects for the Group of GIS and Theory of Errors |
| 2003 – 2008 | Didactical assistance in Geographical Information Science |
| 2003 - 2008 | Doctoral student at the Group of GIS and Theory of Errors |
| 1999 - 2001 | Master in Geoinformation Science, Wageningen University and Research Center, the Netherlands Master thesis in GIS (2001): "USING A DIGITAL ELEVATION MODEL AS GEO-DATA SOURCE FOR FORESTRY POLICY" under the supervision of John Stuiver (Center of Geoinformation Science, Wageningen) and Hugo De Vos (Technology and Agrarian Development Department). |
| 1992 - 1998 | Bachelor and Master in Forestry Science, University of Padova, Italy Master thesis on the Eco-certification (1998): "FORESTRY PLANTATIONS IN ZIMBABWE, THE CASE OF STUDY OF THE WATTLE COMPANY", under the supervision of Prof. Davide Pettenella, Economics of Forestry Markets. |





ringraziamenti

Questo lavoro è stato possibile grazie alla collaborazione tra l'Istituto di Geodesia e Fotogrammetria e l'Istituto di Pianificazione dei Trasporti del Politecnico di Zurigo.

Un sentito riconoscimento va al Prof. Alessandro Carosio che ha sempre sostenuto e motivato il mio lavoro, seguendomi con pazienza e competenza e sapendomi trasmettere l'entusiasmo per la materia.

Ringrazio il Prof. Axhausen per aver supervisionato il presente lavoro, proponendo idee e progetti interessanti.

Un grazie a tutti i colleghi del gruppo "GIS e teoria degli errori", sempre disponibili nel dare utili consigli e suggerimenti in caso di bisogno.

Un ringraziamento particolare va agli amici e colleghi Dante, Sarah, Daniela, Fabio e Marco Piras, per la loro incondizionata amicizia e il loro aiuto professionale; ringrazio inoltre Rossella e Karika per aver accompagnato questo lavoro già dai suoi primi passi.

Un sentito ringraziamento va a Marcel Koller, Milena Scherer e Micheal Balmer, senza i quali lo svolgimento di una parte del lavoro non sarebbe stato possibile.

In particolar modo desidero ringraziare i miei genitori che mi hanno accompagnata in questo lungo percorso con tanto amore e allegria, la mia insostituibile sorella Laura e il mio adorato nipote Mattia-Sélim.

Ringrazio Riccardo che ha sempre creduto in me e che mi ha permesso, insieme alla mia dolce Beatrice, di raggiungere questo risultato con un sorriso sulle labbra.

Un grazie speciale va all'intera famiglia De Filippi per il suo sincero affetto e la costante disponibilità.

Uno sguardo va infine a Jean-Sélim, persona di grande cuore, che ha arricchito le nostre vite come esempio di impegno, professionalità e rispetto per il prossimo.

