

DISTRIBUZIONE PUNTUALE DEI FLUSSI DI TRAFFICO SIMULATO

Roberto GABRIELLI (*), Alessandra GUIDAZZI (*), Raffaele MISEROCCHI (*)
Marco Antonio BOSCHETTI (**), Vittorio MANIEZZO (**), Matteo ROFFILLI (**)

(*) Servizio Pianificazione territoriale, Provincia di Forlì-Cesena
e-mail: {gabrielli.roberto, guidazzi.alessandra, raffaele.miserocchi}@provincia.fc.it
(**) Scienze dell'Informazione, Università di Bologna
e-mail: {boschett, maniezzo, roffilli}@csr.unibo.it

Riassunto

La gestione e la pianificazione del territorio richiedono sempre di più una conoscenza puntuale dei principali parametri di interesse al fine di ottimizzare al meglio la distribuzione delle risorse e la loro fruibilità da parte dei cittadini. Uno degli aspetti più importanti riguarda sicuramente la gestione dei flussi di traffico che sono alla base di qualsivoglia ottimizzazione quantitativa delle risorse. Essendo quanto mai difficile ottenere una conoscenza globale perfetta dei flussi di traffico reali, il pianificatore spesso fa uso di simulazioni e previsioni dei flussi di traffico ottenute tramite appositi pacchetti applicativi che combinano una conoscenza, anche parziale, delle matrici origine-destinazione con la rete viaria per inferire possibili scenari. Un limite intrinseco di questi applicativi risiede nel produrre una granularità di dettaglio minima dei flussi simulati non sufficiente per analizzare quantitativamente aree di territorio relativamente piccole con intervalli di confidenza accettabili sui dati prodotti. Questo in gran parte è dovuto o a intrinseche mancanze nelle matrici origine-destinazione a disposizione o ad assunzioni necessariamente grossolane nei modelli simulativi ad agenti.

Alla luce di queste considerazioni, in questo lavoro presentiamo un modello innovativo di simulazione e ottimizzazione dei flussi di traffico in grado di fornire simulazioni quantitativamente consistenti anche per aree estremamente piccole – finanche al singolo numero civico – che è stato validato su un caso d'uso reale: la rete stradale della provincia di Forlì-Cesena. Alla base del modello vi è un innovativo utilizzo della distribuzione dei numeri civici che permette di inferire una distribuzione non isotropa delle informazioni contenute nella matrice origine-destinazione.

L'applicazione è basata sul GIS open source Ertha, disponibile gratuitamente online. La semplicità di utilizzo è garantita da una serie di tool automatizzati in grado di generare i dati necessari a partire da un set minimo di informazioni disponibili presso ogni comune italiano: il grafo stradale, la distribuzione dei numeri civici e il censimento ISTAT. I risultati presentati sono incoraggianti sia dal punto di vista delle previsioni sia per quanto riguarda l'interattività con l'utente finale che riesce in modo semplice ed efficace ad analizzare lo stato attuale del proprio territorio e a generare previsioni consistenti a fronte di modifiche dell'assetto viario.

Abstract

Nowadays managing and planning territorial services require a deep knowledge of the area main parameters of interest, in order to optimize as best as possible the accessibility to local resources. One of the crucial points is the traffic flow simulation and forecast, which gives the basis for any quantitative analysis of the optimization process. Given that gathering the right value for each simulation parameter is too hard, the planning service exploits, when possible, flow simulations and forecasts achieved by means of software suites that combine information regarding the original-destination matrix with the road network. The objective is to produce from the current state possible

future scenarios. One of the many drawbacks of current algorithms is that the scale for which the forecast is statistically valid is too large for analyzing small local areas. The cause should be found either in the quality of the origin-destination matrices or in the many a priori assumptions that any agent-based algorithm must consider in order to converge.

Given this, we present here an application which implements an innovative simulation and optimization approach, able to achieve good results also for small-scale areas ranging from single town to local streets. The application has been validated on a real-world case study, the road network of the province of Forlì-Cesena. At the core of the model, a novel exploitation of the distribution of civic enumeration makes it possible to infer a non isotropic distribution of the traffic flow accordingly with the origin-destination matrix.

The deployed application is interfaced with the Ertha open source GIS, freely available online. Special attention was given to the interaction with the user, by developing several automatic tools able to generate the right configuration of the required data, by starting from basic information available to each municipality: the road network, the civic enumeration, and the ISTAT census data. The results are satisfying both for the quality of the forecasts and for the ease with which the operator can control all basic parameters and generate alternative future scenarios.

Introduzione

La pressante richiesta di sostenibilità ambientale sta ponendo i gestori delle risorse di fronte a problemi organizzativi sempre più complessi. Se fino a qualche anno fa decisioni prese sulla base di considerazioni qualitative del territorio, studiate su carte topografiche statiche, erano sufficienti per una corretta gestione, ora la complessità delle interazioni e degli scenari richiede necessariamente un supporto informativo dinamico ed evoluto. In particolare le pubbliche amministrazioni locali sono sempre più interessate a strumenti di supporto alle decisioni per la pianificazione e il controllo dei processi e delle infrastrutture (reti stradali, reti fognarie, linee telefoniche, idriche, gasdotti, linee di distribuzione della elettricità, riserve idriche, reti di trasporto) che sono attivi nel loro territorio di competenza.

La gestione e la pianificazione del territorio richiedono sempre di più una conoscenza puntuale dei principali parametri di interesse al fine di ottimizzare al meglio la distribuzione delle risorse e la loro fruibilità da parte dei cittadini. Uno degli aspetti più importanti riguarda sicuramente la gestione dei flussi di traffico che sono alla base di qualsivoglia ottimizzazione quantitativa delle risorse. Essendo quanto mai difficile ottenere una conoscenza globale perfetta dei flussi di traffico reali, il pianificatore spesso fa uso di simulazioni e previsioni dei flussi di traffico ottenute tramite appositi pacchetti applicativi che combinano una conoscenza, anche parziale, delle matrici Origine-Destinazione (OD) con la rete viaria per inferire possibili scenari. La soluzione ottenuta dipende inoltre da un numero cospicuo di parametri operativi, i cui valori influenzano in modo determinante i risultati ottenuti, sia globalmente che localmente. Questo aspetto è di solito mascherato negli applicativi proposti sul mercato che richiedono una forte personalizzazione dei parametri da parte dell'utente, rallentando ulteriormente la velocità di elaborazione. Appare scontato che l'ottimizzazione della rete viaria porti implicitamente numerose ricadute benefiche su tutto il tessuto economico-sociale. Ad esempio un miglioramento dei tempi di percorrenza della rete produce una diminuzione delle emissioni nocive, un miglioramento dell'aria, una diminuzione dei costi e in generale un vantaggio competitivo del territorio.

Alla luce di queste considerazioni, il contributo principale di questo lavoro risiede nell'estensione di una metodologia già da noi proposta (Boschetti *et al.*, 2007) per la simulazione dei flussi di traffico veicolare e merci. L'estensione riguarda la possibilità di distribuire i punti di ingresso e di uscita del flusso veicolare non genericamente all'interno delle celle della matrice OD ma puntualmente ed in modo non omogeneo sui singoli nodi stradali. Ciò è permesso inferendo una possibile distribuzione dei punti di ingresso e di uscita prendendo in considerazione la distribuzione dei numeri civici all'interno del grafo stradale. Questa informazione è di solito disponibile presso l'anagrafe cittadina.

Per validare la bontà dell'approccio proposto abbiamo utilizzato dati georeferenziati a livello provinciale relativi alla rete stradale della provincia di Forlì-Cesena (regione Emilia-Romagna). La rete consta di circa 30000 archi stradali e di una zonizzazione ISTAT dell'area di interesse composta da circa 4000 zone ognuna delle quali è rappresentata nella matrice OD sia come origine che come destinazione. La matrice OD è stata rilevata nel 2005. La Figura 1 mostra gli elementi rilevanti del territorio di nostro interesse: il grafo stradale, le zone della matrice OD e la distribuzione dei civici.

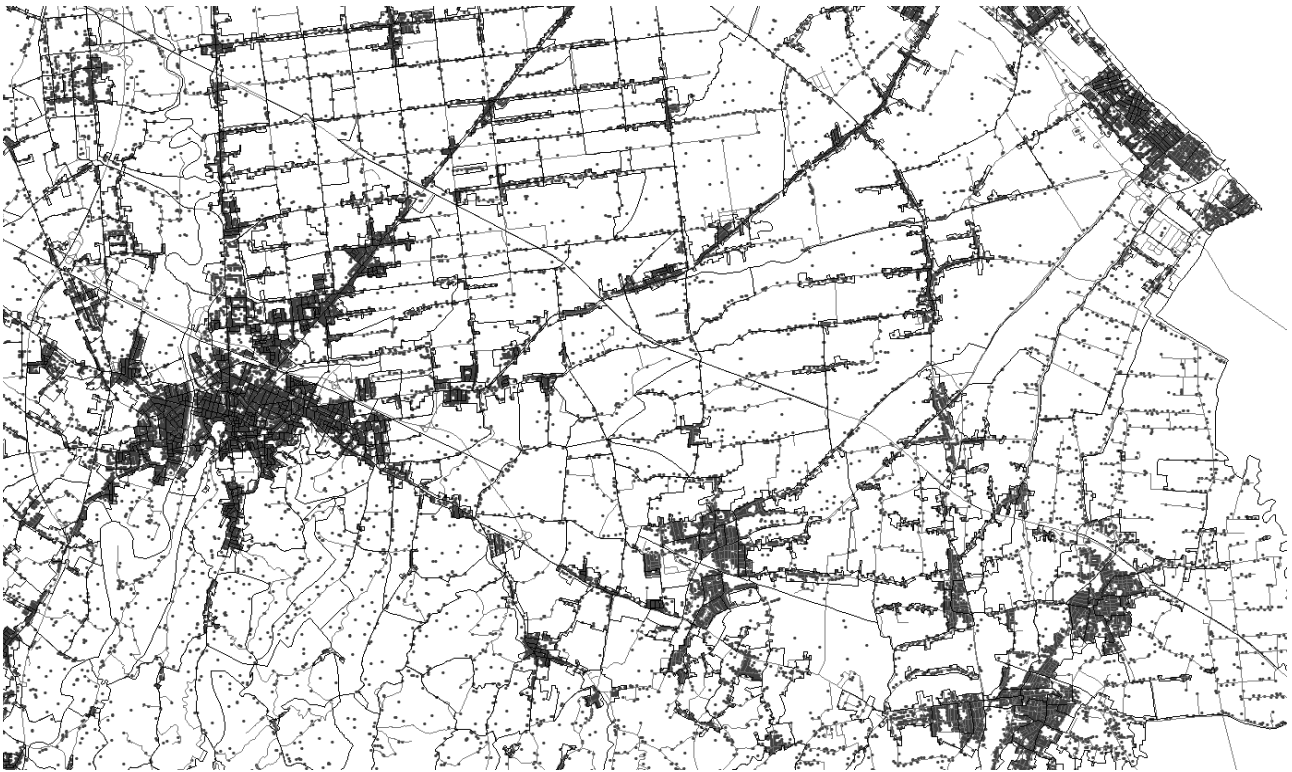


Figura 1 – Gli elementi rilevanti del territorio di nostro interesse: il grafo stradale (rosso), le zone della matrice OD (nero) e la distribuzione dei civici (punti blu).

Formulazione matematica

Dal punto di vista matematico il problema è stato modellato come segue. La rete stradale è stata rappresentata come un grafo $G = (V, A)$, dove $V = V_s \# V_c$ è il set dei nodi e $A = A_s \# A_c$ il set degli archi. A_s è il subset degli archi realmente esistenti and V_s il subset dei relativi nodi terminali. V_c è il subset dei nodi virtuali (ovvero creati artificialmente), ognuno dei quali è associato o ad un'origine o ad una destinazione e A_c è il subset degli archi che connettono i nodi virtuali relativi a origine e destinazione a tutti i nodi in V_s che appartengono a quella particolare zona.

Modellizzazione del traffico

Per ogni arco $(i,j) \in A_s$ sono disponibili diversi parametri fisici come lunghezza, larghezza, capacità, pendenza, tortuosità, etc. Questi parametri sono utilizzati dall' algoritmo di assegnamento per calcolare un costo generalizzato di percorrenza dell'arco che permette in seguito di ottenere un costo minimo di assegnamento.

La soluzione finale deve specificare per ogni arco $(i,j) \in A_s$ una stima del flusso f_{ij} che lo attraversa. Il costo generalizzato c_{ij} è relativo al tempo necessario per attraversare l'arco, in accordo con il principio di Wardrop, ed è funzione del relativo flusso.

La matrice OD è modellizzata come un set indicizzato $\% = [\ell]$ di coppie OD, ognuna delle quali ha associata una richiesta $(\ell)!$. Le richieste sono quindi distribuite sul flusso f_p che attraversa il percorso direzionato $p!$ $\&_\ell$ dove $\&_\ell$ è l'indice del set dei percorsi per la coppia OD ℓ e $\& = \bigcup_{\ell!} \% \&_\ell$. Il risultante problema di assegnamento è il seguente:

$$\begin{aligned}
 \text{(P)} \quad & \min \sum_{(i,j)! \in A} c_{ij}(f_{ij}) && \text{(1)} \\
 \text{s.t.} \quad & \%_p = b_\ell, && \ell! \in \% \quad \text{(2)} \\
 & p! \# \ell \\
 & f_{ij} = \sum_{p! \#} \%_{ij}^p \&_p \leq u_{ij}, && (i,j)! \in A \quad \text{(3)}
 \end{aligned}$$

Nella formulazione, b_ℓ rappresenta la richiesta da origine a destinazione per la coppia OD ℓ , $\%_{ij}^p$ è una costante uguale a 1 se l'arco (i,j) appartiene al percorso p e a 0 in caso contrario, mentre u_{ij} è la capacità teorica dell'arco (i,j) . L'assegnamento deriva perciò dalla ricerca del punto di equilibrio dei flussi pertinenti a differenti coppie OD nel contesto di un modello deterministico a richiesta finita (Florian, Hearn, 1998). L'algoritmo di assegnamento è un'estensione che gestisce gli assegnamenti parziali dell'approccio all-or-nothing, basato su un codice per Min-Cost Multicommodity flow, che è infine decomposto in un sottoproblema di tipo Min-Cost flow (MC_k) per ogni origine $k! \in V_C$. Mentre per ogni arco $(i,j)! \in A_s$, ovvero gli archi reali, i parametri sono disponibili a priori, per gli archi virtuali del subset A_c i parametri devono essere impostati automaticamente. Un modo nativo consiste nell'imporre che ognuno di questi archi abbia capacità infinita e tutti gli altri parametri costanti. In questo modo la percorrenza dell'arco virtuale è non significativa per il percorso origine-destinazione ed ha l'unico scopo di collegare le informazioni sulla sezione ai nodi stradali presenti al suo interno.

Distribuzione puntuale

Un effetto secondario di questa scelta consiste nel fatto che, se gli archi interni alla sezione sono sufficientemente capacitivi, il flusso entrante ed uscente si distribuisce solo ai bordi della sezione minimizzando in questo modo il costo di percorrenza. Una seconda soluzione consiste nell'imporre che il flusso si distribuisca in modo omogeneo all'interno della sezione. Per ottenere questo risultato è sufficiente imporre che la capacità degli archi virtuali non sia infinita ma costante ed uguale al flusso entrante (uscente) diviso il numero di archi entranti (uscenti). In questo modo gli archi che connettono i nodi ai bordi verranno velocemente saturati dal flusso e l'algoritmo in seguito andrà automaticamente ad utilizzare i nodi più interni. Questo approccio evita cadute improvvise del flusso che difficilmente possono essere interpretate se non come anomalie ed imprecisioni dei dati. Nonostante ciò ad un'attenta analisi i flussi risultanti non sono ancora soddisfacenti in quanto una singola sezione può contenere aree altamente abitate o produttive e aree pressoché deserte. Avere flussi continui in aree dove non ci dovrebbero essere può generare erronee deduzioni se la scala di interesse non è a livello comunale ma di singoli quartieri o settori del territorio.

La soluzione che noi proponiamo si basa sull'assunzione che i veicoli partano ed arrivino in prossimità di abitazioni o strutture dotate di numero civico. Per sfruttare questa informazione è sufficiente avere una distribuzione georeferenziata dei punti associati a numeri civici di solito a disposizione dell'ufficio anagrafe che la utilizza per altri scopi. Con questa informazione disponibile è possibile associare agli archi virtuali una capacità proporzionale ai numeri civici associati al nodo reale dell'arco.

L'algoritmo è il seguente:

- 1 associa ogni numero civico ad un arco stradale;
- 2 associa ai nodi terminali di ogni arco esattamente metà dei civici associati all'arco di appartenenza. Se il nodo appartiene a più archi somma i valori dei civici associati;
- 3 calcola la somma dei civici associati ai nodi interni ad ogni sezione;
- 4 per ogni sezione: associa ad ogni arco virtuale una capacità uguale alla somma dei civici diviso il numero di civici del proprio nodo reale.

La soluzione proposta genera flussi di traffico continui e distribuiti in modo conforme al territorio mantenendo la medesima formulazione del problema ed agendo unicamente in fase di pre-processing dei dati. Ovviamente, ove i dati fossero disponibili, la distribuzione delle capacità degli archi virtuali potrebbe essere ulteriormente raffinata utilizzando anche il numero di persone residenti presso ogni numero civico o altre informazioni che possano ulteriormente raffinare la scala di dettaglio.

Caso di studio

I risultati ottenuti utilizzando il plugin di simulazione e previsione flussi di traffico, inserito nel pacchetto applicativo open source Ertha (Ertha project, [http://www.erthaproject.org](#)), che implementa il modello descritto sono stati validati sulla rete della nostra provincia. Abbiamo interfacciato il codice, implementato tutto in C# e C++, con il GIS della provincia di Forlì-Cesena, accedendo direttamente agli shapefile dei dati e ottenendo quindi un'integrazione completa e una totale interoperabilità con l'ArcGis della provincia. La Figura 2 mostra i risultati della simulazione del traffico per un'area di interesse con le tre tipologie di distribuzione: a capacità infinita (sinistra), a capacità omogenea (centro) e a capacità basata sui civici (a destra). L'area rappresenta un comune di piccole dimensioni inserito in un contesto provinciale più esteso e comprende un centro storico con mobilità consentita ridotta, alcune aree residenziali e artigianali e alcune direttrici stradali principali. Come si può notare anche visivamente il flusso ottenuto con la soluzione originale cade bruscamente appena raggiunta la sezione centrale di censimento risultando inadeguato per un'analisi dettagliata a scala locale. La qualità del risultato migliora sensibilmente utilizzando una distribuzione omogenea che spalma i flussi anche all'interno della sezione. Con l'utilizzo dei numeri civici i flussi interni sono ulteriormente incrementati ed emerge una direttiva locale principale (dal quadrante sud-ovest) che convoglia i flussi locali verso il centro storico. Un'analisi quantitativa a posteriori di questi risultati ha messo in evidenza che la direttiva locale è effettivamente utilizzata dai veicoli come ingresso preferenziale verso il centro storico confermando così la bontà del risultato e confortando le aspettative dei pianificatori. In definitiva, le stime così ottenute dell'impatto ambientale degli schemi di mobilità previsti hanno avuto un ruolo centrale nella valutazione dell'accessibilità ambientale e territoriale degli insediamenti e nelle scelte infrastrutturali del piano provinciale. Questo rappresenta un riferimento essenziale per la valutazione delle scelte contenute nel piano strutturale dei comuni controllati. Più specificamente, la previsione di mobilità sottolinea l'esigenza di complementare il sistema infrastrutturale con nuove, più articolate politiche modali (centri logistici, incentivazione all'uso del trasporto pubblico, ecc.), dato che le infrastrutture previste, da sole, non saranno in grado di affrontare efficientemente la richiesta crescente di mobilità nel territorio.



Figura 2 – Risultati della simulazione del traffico per un'area di interesse contenente un centro storico con limitato transito veicoli consentito. Lo spessore delle linee rappresenta in scala non lineare il flusso veicolare ottenuto con le tre tipologie di distribuzione: a capacità infinita (a), a capacità omogenea (b) e a capacità basata sui civici (c).

Riferimenti bibliografici

- Boschetti M.A., Gabrielli R., Guidazzi A., Maniezzo V., Misericocchi R., Roffilli M., (2008), "Simulazione adattiva dei flussi di traffico", Proc. of 1^a Conferenza Nazionale ASITA - Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali
- Ertha project, (2008), <http://astarte.csr.unibo.it/ertha/>, <https://sourceforge.net/projects/ertha>
- Florian M., Hearn D. (1998), "Network Equilibrium and Pricing", *Handbook of Transportation Science*, Hall R.W. (ed), Kluwer Academic Publishers, 6 - 9