

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Gestionale

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Gestionale



Tesi di Laurea Magistrale

**Le Esternalità del Trasporto Automobilistico: Teoria
e Valutazione Economica del Caso Torinese**

Relatore

Prof. Luigi Buzzacchi

Candidato

Stefano Stocco

Correlatore

Giacomo Rosso

A.A. 2017/2018

Sommario

1. Introduzione	1
2. La teoria economica delle esternalità	3
2.1 Il mercato perfettamente competitivo.....	3
2.2 Le esternalità	5
2.2.1 Definizione.....	5
2.2.2 Classificazione delle esternalità.....	6
2.3 Modello in presenza di esternalità.....	8
2.3.1 Modello con due individui.....	8
2.3.2 Un caso particolare: I pure public goods	10
2.4 Soluzioni tradizionali al modello delle esternalità	11
2.4.1 Limitare, Tassare, Diritto di proprietà	11
2.4.2 Soluzione per i beni pubblici: equilibrio di Lindahl	13
2.4.3 I due approcci tradizionali: tassa (Pigou) e diritti di proprietà (Coase).....	14
2.5 Le vittime dell'esternalità.....	15
2.6 Il first best e il second best	16
2.7 Il problema della quantificazione del danno	17
3. Le esternalità dei trasporti.....	21
3.1 Inquinamento atmosferico	22
3.1.1 Inquinamento locale.....	22
3.1.2 Inquinamento globale	25
3.2 La congestione.....	31
3.3 Altre esternalità	33
4. La valutazione dei costi esterni del trasporto automobilistico	34
4.1 Approccio teorico per l'internalizzazione delle esternalità	34
4.2 Metodi per la stima dei costi esterni.....	38
4.2.1 I costi esterni dell'inquinamento locale	38
4.2.2 I costi esterni dell'inquinamento globale.....	43

4.2.3 I costi esterni della congestione	46
5. Road Pricing.....	52
5.1 Tipologie di Road Pricing	52
5.2 Effetti del Road Pricing.....	55
5.3 Esperienze internazionali	56
5.3.1 Oslo, Singapore, Londra, Stoccolma, Milano.....	57
5.3.2 Confronto dei diversi schemi.....	60
6. Caso studio di Torino	62
6.1 Evoluzione della Z.T.L.....	62
6.2 Ingressi in Z.T.L.	63
6.3 Analisi delle esternalità sulla situazione attuale.....	66
6.3.1 Congestione nella Z.T.L.	66
6.3.2 Inquinamento nella Z.T.L.	68
6.4 Valutazione economica delle esternalità sul caso di Torino	79
6.4.1 Impatto economico della congestione.....	79
6.4.2 Impatto economico dell'inquinamento	80
6.5 Applicazione del Road Pricing a Torino	84
6.5.1 Congestion Charge a Torino	85
6.5.2 Pollution Charge a Torino.....	87
6.5.3 Congestion Pollution Charge a Torino	88
7. Conclusioni	90
APPENDICE A.....	93
APPENDICE B.....	95
APPENDICE C.....	97
C.1 Analisi per la valutazione della congestione.....	97
C.2 Analisi per la valutazione dell'inquinamento	98
APPENDICE D.....	104
D.1 Costo della congestione	104

D.2 Costo dell'inquinamento locale	104
D.3 Costo dell'inquinamento globale.....	107
Bibliografia	109

1. Introduzione

È ormai opinione diffusa che il P.I.L. non sia un buon indicatore del benessere della società. Esso, infatti, non considera i costi, spesso intangibili o non misurabili, che le diverse attività umane generano sull'ambiente e sulla società e che, inevitabilmente, impattano sul benessere degli individui (Malagoli, 2009).

Tra i diversi effetti provocati dall'attività umana quello dei costi esterni della mobilità è sicuramente uno dei più importanti da tenere in considerazione. In questa categoria ricadono tutti i costi sociali generati dall'utilizzo dei mezzi di trasporto. Quando ci si mette alla guida, infatti, sono molti gli effetti recati su terzi individui: i principali sono la congestione e l'inquinamento, quest'ultimo traducibile in danni sanitari e ambientali.

L'interesse sull'esternalità dei trasporti è diventato oggi un tema di grandissima importanza, dovuto alle dimensioni crescenti del fenomeno dei trasporti e alle molte interconnessioni che tale settore ha con l'intero sistema economico (Danielis, 2001).

La tesi ha come fine quello di affrontare tali tematiche, presentando le possibili soluzioni messe in atto in diversi ambiti e fornendo anche una stima e valutazione relativa al caso di Torino. Tale lavoro si inserisce in uno studio di fattibilità più ampio, che ha coinvolto FULL, centro di ricerca interdipartimentale del Politecnico di Torino, e 5T, ente per la gestione della mobilità in Piemonte. Lo scopo è stato quello di combinare conoscenze economiche, urbanistiche e trasportistiche di queste due entità, in modo da valutare l'applicazione del *Road Pricing*, una delle più comuni soluzioni al tema delle esternalità, nel comune di Torino.

Il *Capitolo 1* presenta il tema delle esternalità, definendole sia da un punto di vista concettuale che analitico. Successivamente, si valutano le diverse soluzioni perseguite per limitare tale fenomeno e, in particolare, si analizzano i due principali pensieri, quello di *Pigou* e quello di *Coase*.

Il *Capitolo 2* si concentra sulle esternalità del trasporto automobilistico. Questo infatti costituisce il tema principale della tesi. Qui vengono analizzate le diverse categorie di esternalità dei trasporti, principalmente inquinamento locale, inquinamento globale e congestione. In tale contesto si fornisce una panoramica delle soluzioni, presenti e future, ricollegandole alle idee dei due autori precedentemente citati. Vengono poi presentate, in linea generica, le altre esternalità, tra cui l'inquinamento acustico, gli incidenti e i danni alle infrastrutture.

Il *Capitolo 3* presenta i principali metodi di valutazione dei costi esterni. Questo è un tema delicato, dovuto alla difficoltà nel fornire una stima, sia per i molteplici impatti che si generano sia per la complessità nel valutare i rapporti causa-effetto con gli eventi originati. In particolare, uno degli effetti più difficili da quantificare riguarda il surriscaldamento globale, provocato in parte dalle emissioni delle autovetture.

Il *Capitolo 4* si concentra sul *Road Pricing*: esso costituisce una delle possibili soluzioni attuate da molte città di grandi dimensioni per ridurre il traffico e le molteplici esternalità. Viene presentata una classificazione delle possibili politiche che possono essere intraprese e, nella parte finale del capitolo, si analizzano i principali casi internazionali.

Il *Capitolo 5* analizza, invece, il caso di Torino. Si valuta la situazione attuale, ovvero la presenza della Z.T.L. nel centro della città, e si fornisce una stima di inquinamento e congestione di tale zona. Oltre che una valutazione quantitativa in termini di emissioni e livelli di congestione raggiunti, si è effettuata anche una stima in termini monetari, in modo da evidenziare l'impatto economico che tale fenomeno genera sulla collettività. La parte finale del capitolo analizza le possibili applicazioni del *Road Pricing* nella città. Nell'analisi qui condotta si sono, volutamente, tralasciati temi di indubbia importanza, i quali sono rientrati nello studio di fattibilità condotto. Lo scopo qui è stato concentrarsi sulle esternalità, tralasciando molti fattori da tenere in considerazione in uno studio completo.

2. La teoria economica delle esternalità

In questo capitolo si va ad affrontare la teoria delle esternalità: studiando il mercato competitivo come condizione efficiente, si vede come nella realtà questo requisito non venga rispettato: ecco che si originano i fallimenti di mercato.

Uno di questi sono le esternalità, le quali saranno analizzate; in seguito si procederà col valutare anche le diverse possibilità per riportare l'equilibrio a una soluzione efficiente. In questi casi, infatti, potrà risultare conveniente un intervento da parte di un regolatore.

2.1 Il mercato perfettamente competitivo

Dalla teoria economica è noto che, dato un insieme di risorse, inteso come vettore dei beni consumati dagli individui a cui si uniscono quelli prodotti dalle imprese, si definisce allocazione Pareto ottimale (detta anche Pareto efficiente) una ripartizione in cui non è possibile aumentare l'utilità di un individuo senza peggiorare il fabbisogno di altri soggetti.

Una riallocazione per essere Pareto efficiente deve essere *welfare improving*, ovvero deve generare l'aumento del benessere del singolo senza peggiorare quello altrui.

Una volta ottenuta una soluzione paretiana, essa risulta essere ottimale, poiché non genera uno spreco di risorse.

Il risultato ottenuto non assicura però che vi sia una situazione equa. Infatti, è possibile ottenere più di una soluzione Pareto efficiente, e ad ognuna delle diverse possibilità corrisponde una distribuzione diversa delle risorse: è quindi importante andare a valutare le alternative a disposizione e scegliere quella adatta, non solo considerando l'efficienza, ma anche l'equità di quella determinata condizione.

Proseguendo, è bene definire due teoremi molto importanti, noti come il primo e il secondo teorema fondamentale dell'economia del benessere, i quali successivamente verranno smentiti quando si tratteranno le esternalità.

Il primo afferma che, sotto opportune assunzioni, l'equilibrio concorrenziale di tutti i mercati è un ottimo paretiano, ovvero una configurazione in cui il benessere sociale, dato dalla somma del surplus del consumatore e del surplus del produttore, è massimizzato.

Questo teorema non fa altro che andare a formalizzare quanto già teorizzato da Adam Smith attraverso la metafora della *mano invisibile del mercato*: in un mercato perfettamente competitivo ogni individuo e ogni impresa cerca di massimizzare la propria utilità, ma nonostante questo la soluzione che si ottiene da questi comportamenti individuali è Pareto efficiente, cioè non solo efficiente dal punto di vista individuale, ma anche da quello collettivo.

Quello che è importante sottolineare è che vengono poste assunzioni molto stringenti affinché questo sia verificato: in particolar modo, si considerano condizioni ideali, ovvero inesistenza dei costi di transazione, informazione perfetta e mercati perfettamente competitivi. Inoltre, altre ipotesi sono poste sulla funzione di utilità dei consumatori e sulle scelte che vengono fatte da questi. Una delle ipotesi più stringenti però, smentita successivamente dal tema delle esternalità, è che il sistema economico è completo, ossia che esiste un mercato per ogni commodity e che in tutti i mercati i soggetti sono *price takers*¹.

Molti autori, tra cui Arrow e Debreu (1954) hanno constatato come le condizioni al contorno per dimostrare questo teorema siano molto stringenti al punto da essere inverosimile che si verifichino in un contesto reale. Quella descritta dal teorema del benessere rappresenta quindi una situazione ideale. Nella realtà si riscontrano una serie di limitazioni.

Il secondo teorema del benessere, invece, va a rispondere al problema sottolineato già precedentemente, che nasce dall'osservazione che le soluzioni Pareto efficienti possono essere eque o meno. Esso afferma che, attraverso una redistribuzione della commodity numeraria, è possibile selezionare l'equilibrio raggiunto nel mercato concorrenziale. Con questo secondo teorema, quindi, si può affermare che tramite una redistribuzione sotto forma di trasferimento di denaro, sussidi e imposte, è possibile ottenere un'allocazione delle risorse efficiente ed equa.

Questi due teoremi del benessere sono logicamente e formalmente consistenti, ma non dicono nulla circa la verità delle ipotesi fatte. Come afferma infatti Karl Polanyi (1977), modificando la nozione di efficienza, intesa per esempio come quella condizione dove l'intera popolazione raggiunge un livello minimo di benessere, allora le conclusioni a cui si giungeranno saranno diverse, ma comunque logicamente e formalmente corrette.

È importante quindi, oltre che valutarne formalmente la correttezza, comprenderne la verità empirica di queste affermazioni, cercando di andare a capire quali sono le motivazioni che portano a non rispettare queste conclusioni nel mondo reale.

Nel successivo paragrafo si valuterà come questi risultati, in determinate situazioni reali, sono raggiungibili solo con un opportuno intervento da parte dello Stato.

2.2 Le esternalità

2.2.1 Definizione

Definire il concetto di esternalità ha sempre portato a delle contrapposizioni tra diversi autori, e in particolar modo alcuni tendono ad allargare molto il contesto, includendo la maggior parte dei fallimenti di mercato (Bator and Francis, 1958). Una definizione condivisa sulle conseguenze delle esternalità è però possibile darla: siamo in presenza di esternalità quando, raggiunto l'equilibrio in un mercato competitivo, l'allocazione ottima delle risorse non è rispettata, non raggiungendo quindi l'ottimo paretiano (Baumol and Oates, 1988).

Come visto precedentemente, infatti, in presenza di un mercato perfettamente competitivo l'allocazione delle risorse risulta ottima. Quando questo però non viene rispettato, si parla appunto di fallimenti del mercato: uno di questi sono le esternalità. Andando più nel dettaglio si possono individuare due condizioni affinché si sia in presenza di esternalità:

La prima condizione è che la funzione di utilità² di un soggetto include delle variabili reali, ovvero variabili non monetarie, i cui valori non dipendono dall'individuo stesso, ma da un terzo; quest'ultimo, nel prendere le sue scelte, non tiene in considerazione dell'effetto che reca sul benessere degli altri.

Risulta doveroso sottolineare come colui che reca danno agli altri non ha quello come scopo ultimo, ma nel massimizzare la propria funzione obiettivo il suo consumo impatta, positivamente o negativamente, sul benessere altrui.

¹ Un soggetto si definisce *price-takers* quando non è in grado con le sue decisioni di influenzare il prezzo di mercato.

² Si fa genericamente riferimento a funzione di utilità, benché sia più corretto chiamarla funzione di produzione nel caso in cui sia un'impresa a subirne l'esternalità.

La seconda condizione, invece, afferma che l'individuo il cui consumo, o produzione, influenza il benessere altrui non paga o riceve un compenso di un ammontare pari al costo o beneficio generato sugli altri.

Questa seconda affermazione è importante, in quanto genera la conseguenza sottolineata già nella definizione, ovvero che, non essendoci un prezzo per le esternalità, l'allocazione delle risorse risulta sub-ottimale. È bene sottolineare, però, che alcuni autori preferiscono indicare solo la prima condizione come definizione di esternalità. Infatti, in alcuni casi sono già presenti delle tasse che fanno cadere la condizione 2, ma queste imposte portano a una riduzione delle esternalità, non a una loro eliminazione. Si discuterà ampiamente su ciò: far pagare per l'esternalità recata sugli altri è una soluzione al problema, non una condizione.

In conclusione, quindi, l'esternalità può essere definita come “una relazione economica diretta fra due o più soggetti, non mediata da un prezzo di mercato, in base alla quale un soggetto registra effetti positivi o negativi non dipendenti da una sua scelta economica” (Malerba,2007). Se il mercato economico fosse perfetto, tutti gli scambi tra produttore e consumatore avverrebbero nel mercato, con un sistema dei prezzi che li regola.

Le esternalità rientrano tra le tipologie dei fallimenti del mercato, in quanto esse producono degli effetti distorsivi sull'economia, la quale non raggiunge delle posizioni efficienti ed eque. In queste situazioni ove il mercato non riesce a raggiungere l'ottimalità, può essere quindi necessario un intervento pubblico, che vada a regolare l'allocazione delle risorse in modo da convergere all'efficienza.

2.2.2 Classificazione delle esternalità

Una prima suddivisione che viene fatta è quella di esternalità positive e negative. Si è in presenza di esternalità positive quando le azioni di un soggetto influenzano il benessere di altri individui portando quest'ultimi a beneficiare dell'attività del primo. Esempio classico di un'esternalità positiva è la ricerca scientifica, il cui costo è affrontato dal singolo, ma i benefici ricadono sulla collettività.

Si è invece in presenza di esternalità negative quando la produzione o il consumo di un individuo impatta negativamente sul benessere altrui. Questo è l'effetto di cui si discuterà ampiamente, poiché in tema di trasporti si incontrano esternalità negative. Esempio classico di tale esternalità è l'inquinamento: esso viene generato dal singolo,

che può essere un'automobilista o una fabbrica, ma tutti vengono danneggiati dal suo comportamento.

Un secondo tipo di classificazione è fatta sulla base del bene che viene consumato o prodotto. A questo proposito è necessario definire il concetto di beni escludibili e rivali. I beni sono rivali se il consumo da parte di un individuo lo preclude ad altri. Qualora il bene non rientrasse in questa categoria, si parla quindi di beni inesauribili. Sono invece escludibili i beni dove un soggetto, grazie a un determinato diritto di proprietà, ha la capacità di escludere altri dal consumo. I beni non escludibili sono infine quelli dove è impossibile, o troppo costoso per il singolo individuo, impedirne l'utilizzo.

Sulla base di queste definizioni si può identificare una matrice 2X2 descritta in *Tabella 1*, che va a classificare tutte le possibili tipologie; ciò serve per poter poi valutare su quali beni vanno a impattare le diverse esternalità. Si definisce quindi bene privato (*private goods*) il bene ove il consumo di esso da parte di un individuo impedisce il consumo ad altri. I beni né escludibili né rivali sono definiti *pure public goods*³. L'esempio classico che viene fatto nei manuali di economia di quest'ultima classe è la difesa nazionale: tutti possono usufruirne e il consumo da parte di un soggetto non lo impedisce ad altri. Quando il bene non è rivale ma è escludibile si parla di *club goods*. In questo caso si può pensare, ad esempio, al cinema: qui infatti, il consumo da parte di un individuo non va a inficiare quello altrui, ma l'accesso è consentito solo ad un numero ristretto di individui. Infine, un bene rivale ma non escludibile è definito *common pool resources*. In questa classe rientrano le risorse naturali esauribili, come legno e pesci: sono infatti risorse a libero accesso, dove però il consumo di una nuova unità da parte di un soggetto lo impedisce ad altri.

Tabella 1: Suddivisione dei beni in base alle due caratteristiche fondamentali

	NON RIVALI	RIVALI
NON ESCLUDIBILI	(PURE) PUBLIC GOODS	COMMON POOL RESOURCES
ESCLUDIBILI	CLUB GOODS	PRIVATE GOODS

Poiché è molto difficile che un bene non sia allo stesso tempo rivale ed escludibile, spesso si indica con *bene pubblico impuro*, per distinguerlo quindi dai *beni pubblici*

³ Il primo a definirli così i beni pubblici puri fu Samuelson, Paul A. "The pure theory of public expenditure." *The review of economics and statistics* (1954): 387-389.

puri, quelli che presentano parzialmente, entrambi o solo uno dei due criteri sopra citati.

Sulla definizione di bene pubblico però vi sono state delle controversie: infatti, alcuni tendono ad identificare con beni pubblici i beni rivali non escludibili, beni pubblici puri quelli non escludibili e non rivali e con beni pubblici locali quelli non rivali escludibili. Questo tipo di classificazione si ricollega quindi al concetto di beni pubblici impuri, in quanto comunque tutte e tre le categorie hanno la caratteristica di essere “pubblici”.

In base a questa classificazione che è stata fatta si possono identificare le diverse esternalità che si generano. Di seguito nella *Tabella 2* si ha quindi una suddivisione. L’esternalità, pubblica o privata, si presenta solo nel caso di bene non escludibile.

Tabella 2: Classificazione delle esternalità ove esse si generano

	NON RIVALI	RIVALI
NON ESCLUDIBILI	PUBLIC EXTERNALITY	PRIVATE EXTERNALITY
ESCLUDIBILI	CLUB GOOD	PRIVATE GOOD

Nel caso di beni privati non vi è alcun tipo di esternalità, in quanto il meccanismo dei prezzi riesce a compensare gli effetti che si producono sugli altri. Allo stesso modo nei beni *club goods* l’inefficienza generata può essere compensata facendo pagare l’accesso ai *club goods*, i quali per la loro natura sono usufruibili da un numero ristretto d’individui.

2.3 Modello in presenza di esternalità

2.3.1 Modello con due individui

È possibile dimostrare⁴ che in presenza di esternalità la condizione di allocazione Pareto efficiente delle risorse non è rispettata nel mercato competitivo.

Il punto cruciale del modello è il valore della variabile reale: con tale terminologia si vuole indicare il bene che scaturisce dall’attività di produzione di un’impresa o dal consumo o dall’acquisto da parte di un individuo. È una delle variabili della funzione obiettivo dell’individuo che la genera, ma che non porta a un costo diretto monetario per chi esercita quella determinata attività. Per colui che la genera, la sua azione modifica il benessere degli altri, senza che ci sia una operazione equivalente sul

⁴ Nell’*Appendice A* è rappresentato il modello che va a dimostrare ciò che qui viene descritto.

mercato, tramite un compenso monetario. Dal punto di vista matematico quindi, la derivata della funzione obiettivo degli altri individui rispetto al livello della variabile reale che viene generata non da parte loro risulta essere diversa da zero. È questa una delle condizioni infatti per poter identificare un'esternalità.

Il modello sviluppato, nel quale sono state fatte delle dovute ipotesi, va a confermare la teoria sottostante: qualora la variabile reale vada a influenzare negativamente la funzione obiettivo altrui, all'equilibrio si genera un livello di tale variabile superiore rispetto a quello che si avrebbe nel punto di ottimo sociale⁵.

Nel momento in cui invece all'aumentare della variabile l'utilità degli altri individui anch'essa aumenta, si ha un livello inferiore rispetto all'ottimo paretiano.

Questa differenza è dovuta al fatto che l'individuo, nel prendere le sue decisioni, massimizza la propria funzione di utilità, senza considerare gli effetti generati sugli altri. Massimizzare la propria utilità per via analitica significa quindi trovare il livello ottimo della variabile reale, ove l'utilità marginale⁶ è pari a zero. Se invece l'individuo avesse come obiettivo la massimizzazione del benessere sociale, si sceglierebbe come livello ottimo della variabile quel punto in cui si avrebbe la massimizzazione dell'utilità sociale, intesa come somma delle singole utilità⁷. In questo secondo caso sarà quindi la somma delle utilità marginali a essere posta uguale a zero.

Questa discordanza tra profitto privato e benessere sociale nella letteratura viene spesso definito come il problema del *free riding*. Infatti, se consideriamo il caso delle esternalità positive, si intende con *free rider* colui che beneficia dell'acquisto di un bene da parte di un soggetto, senza che paghi un compenso per questo beneficio. Viceversa, se consideriamo le esternalità negative, si intende con *free rider* colui che, pur causando una diminuzione di utilità su terzi individui, egli non paga loro un compenso per il danno recato.

È bene sottolineare come, seppur si generano delle esternalità negative, ovvero quando si influenza negativamente il benessere altrui, il livello di questa variabile reale nel punto di ottimo sociale non risulta essere zero. Esso, per raggiungere l'equilibrio

⁵ Con ottimo sociale si intende quella situazione dove si va a massimizzare il surplus collettivo, il quale risulta essere anche un ottimo paretiano

⁶ Con utilità marginale si intende la derivata della funzione di utilità rispetto alla variabile che si sta considerando, in questo caso la variabile reale. La funzione di utilità è assunta essere concava, quindi con derivata seconda minore di 0, ragion per cui qualora l'utilità marginale fosse posta uguale a 0, si è in un punto di ottimo.

⁷ Si può considerare l'utilità sociale come somma delle singole utilità poiché si è fatta l'ipotesi di quasi linearità delle preferenze individuali.

paretiano, deve essere tale per cui il benessere marginale di colui che genera l'esternalità sia pari al costo marginale che si produce sugli altri individui.

Questo concetto è un punto fondamentale su cui riflettere: basti pensare per esempio alla produzione d'inquinamento; secondo la teoria economica quindi, il livello di emissioni non deve essere pari a zero, ma rispettare le condizioni sopra citate.

Uno degli obiettivi sarà appunto riuscire a quantificare in maniera corretta il danno generato.

2.3.2 Un caso particolare: I pure public goods

Precedentemente, nel modello presentato in appendice, si è visto come il livello ottimo di consumo o produzione dell'esternalità è posto in quel punto dove il benessere marginale di chi genera l'esternalità è pari al costo marginale di chi la subisce; si sono però considerati due individui, fino a ora. Qualora gli individui fossero plurimi i ragionamenti risulterebbero analoghi.

Ci si concentra quindi sui *pure public goods*, ovvero quei beni né rivali né escludibili. In questo momento si vuole considerare solamente esternalità positive, volendo quindi discutere il caso in cui un individuo paghi per una unità del bene pubblico, ma poi di quel bene ne beneficia la collettività. Seguendo il ragionamento fatto nel precedente modello, si può dimostrare come il risultato ottimo Pareto efficiente è in quel punto dove il benessere marginale della collettività, dato dalla somma delle utilità marginali di tutti gli individui, è pari al costo marginale che l'individuo singolo deve pagare per poter usufruire di una unità in più del bene pubblico. (Samuelson,1954)

Anche in questo caso però, la soluzione socialmente ottima non corrisponde a una condizione ideale per il singolo individuo che acquista il bene pubblico. Egli infatti ha lo scopo di massimizzare il proprio benessere marginale, non quello della collettività: la soluzione individuale quindi sarà in quel punto dove il benessere marginale del singolo è pari al suo costo marginale. Questo porta ad acquistare un numero inferiore di beni pubblici, portando a una caduta di utilità per la collettività. Anche qui quindi si presenta il problema del *free rider*.

Si riscontra però un risultato molto interessante in questo modello: se si considerano utilità marginali diverse tra gli individui, si vede che nel punto di equilibrio, solo l'individuo che ha l'utilità marginale maggiore andrà ad acquistare il bene pubblico, gli altri invece non contribuiscono a esso in alcun modo.

2.4 Soluzioni tradizionali al modello delle esternalità

Come visto in precedenza, l'allocazione delle risorse in presenza di esternalità risulta inefficiente.

È necessario, quindi, individuare il comportamento degli individui e influenzarlo, in modo da poter raggiungere l'ottimo sociale; questo può essere ottenuto attraverso un set di incentivi, i quali hanno lo scopo di portare sia alla massimizzazione dei profitti da parte delle imprese sia alla massimizzazione delle utilità individuali. Per far ciò quindi sono necessarie una serie di misure di *policy*, in quanto il mercato se lasciato agire indipendentemente non porta a una soluzione ottima. Definendo *externality good* i beni che, se consumati o prodotti, generano esternalità sugli altri, i possibili approcci sono di seguito presentati.

2.4.1 Limitare, Tassare, Diritto di proprietà

Limitare

In questo modo si va a limitare, attraverso un livello minimo se si tratta di esternalità negative o massimo in presenza di esternalità positive, il quantitativo di *externality good*.

Come visto nel modello, è possibile, per via teorica, identificare il punto di ottimo di *externality good* per poter raggiungere la massimizzazione del benessere sociale. In questo caso quindi la soluzione è imporre questo determinato livello. Se pur facile da comprendere, l'implementazione non è spesso possibile. Infatti, sarebbe necessario controllare la produzione o il consumo di ogni individuo; tale monitoraggio può risultare molto difficile e costoso, ragion per cui questa soluzione in letteratura è sempre stata poco discussa.

Tassare

Con questo metodo si vuole tassare colui che genera degli effetti sugli altri individui: una tassa positiva, infatti, porta a un livello inferiore di *externality good*, mentre un'imposta negativa, la quale può essere identificata come un sussidio, genera un aumento dell'*externality good*.

Questo approccio risulta essere più semplice da implementare, ed è stato discusso ampiamente in letteratura, rientrando sotto il concetto di tassa pigouviana (Pigou, 1932). Considerando ora le esternalità negative, questa soluzione consiste nell'imporre una tassa per ogni unità di bene prodotto o consumato che genera un costo sugli altri.

Per raggiungere l'ottimo sociale, la tassa pigouviana deve essere posta pari al costo marginale sociale, definito d'ora in avanti *esternalità marginale*. Questo processo viene detto "internalizzazione delle esternalità", in quanto il singolo individuo paga, considerando esternalità negative, per il costo che genera sugli altri; viceversa, se l'individuo generasse un'esternalità positiva, dovrebbe ricevere un sussidio.

Nel momento in cui le imprese o gli individui devono decidere quanto produrre o quanto consumare, si raggiunge la posizione di equilibrio considerando non solo i costi abituali per la produzione o il consumo, ma anche la componente di costo data dalla tassa pigouviana. Sulle vittime, come si dirà successivamente, il danno che ne deriva causato dall'esternalità fornisce il corretto incentivo per raggiungere il livello ottimale di azioni difensive intraprese.

È importante sottolineare che quello da tassare è il bene che genera direttamente delle esternalità sugli altri individui. Infatti, se si pensa al caso dell'inquinamento delle autovetture, quello da tassare non sono le autovetture, in quanto la presenza o meno di queste non genera un effetto sugli altri, ma l'inquinamento stesso è da tassare, in quanto è esso che influenza il benessere degli altri.

Un'alternativa, analoga a quella appena presentata, è quella non di tassare l'esternalità, bensì fornire un sussidio per la sua riduzione. In questo caso si ottiene un risultato che replica l'utilizzo della tassa.

Diritti di proprietà

Di seguito si presenta la terza soluzione per risolvere il problema delle esternalità. È possibile in alcuni casi andare a stabilire un diritto di proprietà sull'attività che genera esternalità e questo rende l'allocatione efficiente. Infatti, secondo il teorema di Coase, qualora siano stati chiaramente definiti i diritti di proprietà, le parti negozieranno in modo tale da raggiungere il livello ottimo di esternalità⁸.

Con diritto di proprietà si vuole intendere la situazione in cui un individuo ha la facoltà di scegliere il livello di *externality good*: il proprietario può richiedere a coloro che generano esternalità un compenso da versare. Se si è in una tale situazione, la soluzione finale è Pareto efficiente.

⁸ Anche in questo, affinché valgano le affermazioni di Coase, è necessario che siano verificate delle ipotesi: in particolare, stabilendo i diritti di proprietà, le parti devono poter negoziare senza alcun costo aggiuntivo, ovvero i costi di transazione e di negoziazione devono essere nulli.

Ipotizzando anche schemi diversi di proprietà, la soluzione che si ottiene è sempre ottima; l'aspetto essenziale è che siano ben noti i diritti di cui si dispone e che vengano rispettati. Quello che cambia, considerando schemi differenti, sono gli effetti di redistribuzione che si generano. Se quindi l'obiettivo non è solo l'efficienza ma anche l'equità, è bene considerare quel determinato schema che possa tenere conto di entrambi gli aspetti.

Una volta che vengono stabiliti chiaramente i diritti di proprietà, è nell'interesse delle parti raggiungere un accordo; ognuno farà i propri interessi, ma il risultato finale porta comunque alla massimizzazione del beneficio congiunto.

In ogni caso, secondo Coase, il governo non necessita di conoscere le preferenze individuali per determinare i corretti incentivi per raggiungere una soluzione efficiente. È però importante aver ben chiaro quali siano i diritti di proprietà, quindi un corretto sistema di leggi che permetta anche di poter agire qualora qualcuno violi il proprio diritto. Le informazioni sui singoli soggetti, però, sono necessarie qualora si voglia una soluzione il più equa possibile.

Come si evince dalla soluzione qui proposta, il problema delle esternalità è dovuto al *missing market*. Con questo si vuole dire che il punto focale dell'esistenza delle esternalità è la mancanza di un mercato competitivo alle spalle: infatti, tra le definizioni date di esternalità, si è detto che l'esternalità è una relazione economica diretta, la quale ha degli impatti su altri soggetti senza uno scambio di denaro. Nel momento in cui dovesse venire a esserci il mercato, il singolo consumatore potrà scegliere, dato il prezzo, la quantità di esternalità che vuole subire. Il problema non è dovuto, quindi, al malfunzionamento del mercato, bensì a una sua mancanza, la quale viene eliminata stabilendo un diritto di proprietà.

2.4.2 Soluzione per i beni pubblici: equilibrio di Lindahl

Come analizzato precedentemente, si è visto che coi beni pubblici il singolo, all'equilibrio, acquista una quantità del bene pubblico inferiore a quella ottimale. Lindahl ha fornito una soluzione per risolvere questo problema: quest'ultimo infatti dice che è possibile contribuire a un risultato ottimale se il singolo individuo contribuisce al finanziamento del bene pubblico in misura proporzionale al vantaggio che trae da questo.

Questo tipo di soluzione, però, ha una serie di limitazioni: in *primis* sarebbe necessario che ogni consumatore rivelasse l'utilità che deriva dal consumo del bene pubblico; questo andrebbe contro l'istinto naturale dell'individuo, che lo porta a comportarsi da *free rider*, godendo opportunisticamente del vantaggio generato senza contribuire al suo finanziamento.

Inoltre, siccome ogni individuo ha un'utilità marginale differente, bisognerebbe anche far pagare tariffe diverse: fare discriminazione di prezzo di questo tipo può essere molto complicato.

Altro limite è che il bene pubblico è per sua natura un bene condiviso dalla collettività. In molti casi riuscire di impedire a un individuo di usufruire di tale bene, qualora non abbia contribuito al suo finanziamento, può essere molto difficoltoso.

2.4.3 I due approcci tradizionali: tassa (Pigou) e diritti di proprietà (Coase)

Analizzando più nel dettaglio le proposte fornite da entrambi, le strade per portare a una soluzione efficiente sono diverse. In particolare, nel primo caso si tende a voler aggiustare il prezzo, nel secondo i diritti di proprietà.

Nella visione di Pigou, quindi, il fallimento deriva dal fatto che i prezzi non sono efficienti. Essi, incorporando solamente i costi privati e non i costi sociali generati sugli altri individui, portano a degli incentivi distorti. La sua visione quindi è incentrata su un *fallimento del mercato*.

Al contrario, Coase prende i prezzi per dati, stabiliti: ciò che porta a inefficienza è la mancanza totale del mercato sulle esternalità, mancando il diritto di proprietà su quei determinati beni. L'idea di quest'ultimo quindi è incentrata principalmente sulla *mancanza del mercato*.

Ciò che va a differenziare questi due approcci è il modo in cui viene concepito l'intervento dello Stato: per Pigou l'intercessione deve essere fatta valutando i costi che si generano su terzi e imponendo su questi una tassa, mentre Coase vede l'intervento dello Stato *a priori* in quelle situazioni dove vi è l'assenza di un mercato. Di seguito si rappresentano le principali critiche che vengono fatte a queste due teorie.

Nel caso di tassa pigouviana, lo Stato assume una funzione regolatrice, imponendo che ogni individuo paghi per il danno sociale generato, sempre ipotizzando esternalità negative. Da un punto di vista informativo, questo può avere dei grossi limiti. Infatti,

in molti casi è difficile, se non impossibile, conoscere il danno che viene creato dal singolo individuo. È necessario quindi avere delle misurazioni del danno accurate per poter raggiungere una soluzione efficiente, e ciò può essere impedito dal problema delle asimmetrie informative.

La critica basata sulla teoria di Coase è che ipotizza costi di transazione nulli: qualora si sia in presenza di esternalità invece, spesso i costi di transazione sono elevati, dovuti al fatto che la risorsa può appartenere a molti soggetti, se si tratta di bene pubblico, oppure può essere molto difficoltoso identificare le parti coinvolte.

Un'ulteriore critica che può essere fatta al modello di Coase è che, in presenza di beni pubblici, risulta difficile stabilire un diritto di proprietà.

2.5 Le vittime dell'esternalità

Sul trattamento di coloro che subiscono l'esternalità, la letteratura è sempre stata confusa e contraddittoria. In particolare, alcuni propongono una compensazione pari al costo subito, altri invece, come Coase, pensano che le vittime debbano, in certe circostanze, essere tassate. Quello che sicuramente può essere detto è che, a parte in rarissimi casi, le vittime non devono essere tassate e la compensazione porta a un risultato efficiente solo quando il numero di soggetti coinvolti è limitato.

In particolar modo, utilizzare una tassa per ricompensare le vittime dal subire l'esternalità ha due importanti controindicazioni. La prima è che, in molte situazioni, per compensare il danno subito dalle esternalità si prendono una serie di azioni correttive: nel momento in cui, però, si è sufficientemente ricompensati, si distrugge l'incentivo a ricorrere alle azioni correttive, compromettendo quindi l'efficienza in tali mercati. Inoltre, un secondo problema che si incontrerebbe è che venir ricompensati porta ad attrarre un numero maggiore d'individui che vorrebbero essere remunerati per l'esternalità subita. Le vittime ricompensate, qualora siano delle imprese, useranno il denaro ricavato per ridurre il costo dei loro prodotti, portando quindi a un eccessivo livello di consumo dovuto al calo dei prezzi, soluzione non più efficiente.

Coase è ancora più duro però: egli ritiene che le vittime delle esternalità, oltre che non essere ricompensate, devono anche a loro volta subire un'imposta, definita *Higher Pigouvian Fee*, in quanto la tassa pigouviana si genera perché le vittime hanno scelto di essere presenti in un determinato luogo e quindi di sopportare l'esternalità.

Ancora, secondo Bird (1987) il caso in cui si ritiene necessario andare a tassare anche le vittime è quando l'esternalità risulta trasferibile, e quindi in questi particolari casi è possibile trasferire il danno che si creerebbe, identificato come diminuzione del valore di utilità, a una terza parte. In queste particolari situazioni è necessario individuare uno schema d'incentivi corretto che porti a un comportamento efficiente sia al generatore di esternalità, sia alle vittime. Per quest'ultime la tassa dovrà essere pari al costo marginale del danno che si è recato alle parti a cui si è trasferita l'esternalità.

Se è possibile trasferire a diverse parti l'esternalità con effetti diversi, allora quello che si avrà sarà un ventaglio di tasse pigouviane pari al numero di alternative a disposizione. La vittima, che a sua volta sceglie di trasferire a terzi l'esternalità, comportandosi in maniera razionale, la trasmette alla parte a cui corrisponde la più bassa tassa pigouviana, ma a cui corrisponde anche il minor danno possibile. Pure in questo caso, quindi, tassando non solo il generatore ma anche le vittime, si innesca un meccanismo a catena che porta ad un risultato sociale efficiente.

Il punto focale però è rimasto il medesimo, ovvero ogni individuo deve essere tassato con una tassa pari al danno marginale sociale imposto sugli altri.

Risulta subito evidente come, se già risultava difficile l'applicazione di un'imposta in presenza di esternalità non trasferibili, in questo caso è ancora più complesso riuscire a stabilire l'insieme delle possibili tasse applicabili.

2.6 Il first best e il second best

Precedentemente si è visto come il modo per riportare la situazione corrente a una soluzione Pareto efficiente è andare a imporre una tassa pari al costo marginale generato sugli altri: questo tipo di soluzione in economia viene definita *first best* ed è perseguibile qualora si consideri un'economia che rispecchia i teoremi fondamentali del benessere, senza quindi distorsioni, esternalità o tendenze monopolistiche.

Poter soddisfare tutte le condizioni per l'esistenza della cosiddetta *economia di first best* è poco realizzabile: il mondo reale infatti è "imperfetto" e la presenza di esternalità come di altri fallimenti di mercato è la condizione ordinaria.

In un "mondo imperfetto", assume grande rilevanza il *teorema del second best*, elaborato da Lipsey e Lancaster (1956): esso afferma che, qualora si passi dal considerare il singolo mercato al considerare l'economia nella sua complessità, la soluzione di *first best*, intesa come prezzo pari al costo marginale, non è più una soluzione ottimale.

Questo teorema è di notevole rilevanza quando si va ad affrontare il tema delle esternalità: infatti, considerando il sistema economico generale, esso dice che se anche si cercasse di correggere un mercato per riportarlo alla sua soluzione ottimale, questo non porta necessariamente a un miglioramento del sistema nella sua complessità.

Sembra quindi che Lipsey e Lancaster vogliano in un certo modo sminuire l'intervento pubblico mirato al raggiungimento dell'efficienza: infatti, se pur migliorasse il settore dei trasporti pubblici per esempio, tale condizione non porterebbe necessariamente a un aumento del benessere collettivo. Il rischio anzi potrebbe anche essere quello di peggiorare la situazione attuale.

Altri autori però, primi tra tutti Davis e Whinston (1965), sostengono che, qualora i settori non fossero interdipendenti tra loro, allora è possibile raggiungere la condizione ottima di Pareto in un settore senza influenzare gli altri. Ciò significa che se si opta per interventi pubblici con lo scopo di ripristinare condizioni ottimali nei settori devianti, ciò non causerà un peggioramento nell'economia globale. Questo però è vero se si è in una condizione di non interdipendenza: in tutti gli altri casi ciò non è necessariamente verificato.

Considerando quindi un sistema economico formato da più settori connessi tra loro, la soluzione ottima da raggiungere è definita di *second best*; qui per determinare il prezzo ottimale si deve tener conto delle distorsioni che si generano a causa delle interconnessioni presenti tra i diversi settori.

Per determinare la tariffa ottima, bisogna perciò valutare molteplici aspetti e tenere conto delle considerazioni appena citate: si valuterà successivamente come tutto ciò si può concretizzare nel settore dei trasporti.

2.7 Il problema della quantificazione del danno

In precedenza, si è visto come in linea teorica è possibile applicabile la *tassa pigouviana*, per raggiungere una condizione Pareto efficiente.⁹ Le stime però fornite per andare a valutare i costi marginali, come si discuterà ampiamente nei prossimi capitoli, possono determinare un buon punto di partenza, una buona comprensione del fenomeno, ma non possono essere utilizzate senza cognizione di causa come valori assolutamente veritieri. Primo infatti, molti degli effetti considerati sono difficilmente

⁹ Questo in realtà già potrebbe essere smentito, se si va a considerare il teorema del *second best*. Per ora comunque ipotizziamo che questa discordanza tra *first best* e *second best* sia irrilevante.

quantificabili; secondo inoltre, alcuni dipendono anche da eventi futuri di difficile previsione.

Inoltre, un secondo problema che si affronta è che la tassa non dovrebbe dipendere dal danno generato inizialmente, ma dovrebbe essere pari al danno generato se le altre attività fossero poste al livello ottimale. Si prenda in esempio il caso in cui la tassa venisse imposta a seguito dell'installazione di un sistema di controllo dell'inquinamento e di altre attività poste al livello ottimo. La tassa dovrà essere diversa rispetto al livello iniziale ipotizzato, in quanto bisogna considerare l'impatto delle attività intraprese nel frattempo.

A riguardo di queste problematiche viene fornita un'alternativa, come dicono Baumol e Oates (1971). Essi infatti ipotizzano di porre la tassa pari al danno netto generato inizialmente, anche con tutte le considerazioni del caso riguardanti la poca affidabilità di queste misurazioni. A questo punto la tassa, anche se non ottimale, avrà come risultato quello di modificare l'output prodotto e l'aggravio provocato. Qui quindi si può valutare se questo risultato è soddisfacente o meno, e a quel punto si può modificare ulteriormente la tassa, innescando un processo iterativo di continuo aggiustamento fino al raggiungimento di una condizione desiderabile. Non è chiaro, anche in via teorica, se questo porta a una soluzione ottima e un'allocazione efficiente delle risorse.

Ma d'altronde, come abbiamo già visto in precedenza, l'ottimo paretiano è una condizione formalmente corretta ma nella pratica poco raggiungibile. Se si pensa di modificare il concetto di ottimo, inteso come raggiungimento di determinati standard che portano a una condizione accettabile, allora il processo sopra descritto convergerà a una soluzione ottima.

La stima iniziale non risulta essere vincolante, deve solo fornire un punto di partenza. Infatti, dopo l'applicazione della prima tassa, valutando l'output, se tale risultato è migliore rispetto allo standard previsto, si procederà con una riduzione dell'imposta, viceversa si provvederà a un aumento. Iterando questo processo più volte, si arriverà alla situazione desiderata.

Quello che si evince quindi è il "potere" che assume la tassa: essa, qualora fosse posta a una cifra molto alta, avrebbe anche la capacità di azzerare il livello di attività. Questo concetto è noto da tempo, tanto che è riportato nel caso della Suprema Corte McCulloch vs Maryland, (1819) la celebre frase "the power to tax involves the power to destroy".

L'aggiustamento iterativo che è appena stato presentato può includere anche un'ulteriore correzione riguardante lo standard di accettabilità prescelto. Infatti, una volta che si è ottenuto il livello richiesto, questo può essere valutato troppo stringente o meno, quindi può essere necessaria un'ulteriore correzione. Aggiustare il limite imposto non è nient'altro che cercare di approssimare il risultato all'"ideale pigouviano". La revisione di questo avviene poiché implicitamente si sta pensando che vi sia una discordanza tra beneficio e costo marginale, e quindi con un accurato aggiustamento, si può arrivare a ottenere il punto di ottimo desiderato.

C'è di contro da considerare che ogni aggiustamento include dei costi dovuti al cambiamento.

Il pregio dell'utilizzo di questo procedimento, oltre quello di poter portare col tempo a una soluzione quanto meno desiderabile, è la sua economicità: si può infatti affermare che risulta essere l'approccio più economico per raggiungere quel determinato standard.

Infatti, vagliando le possibili alternative, si potrebbe imporre a tutti gli individui la stessa percentuale di diminuzione di esternalità così da raggiungere il risultato desiderabile. Questo però risulterebbe molto costoso, poiché il costo marginale per la riduzione di una unità di esternalità può essere diverso da soggetto a soggetto, causando quindi per alcuni uno svantaggio superiore. Per funzionare, tale tipo di approccio richiede la conoscenza delle funzioni di costo marginale di ciascuno dei soggetti, informazioni difficilmente ricavabili.

Al contrario, l'*unit tax approach* può automaticamente portare a una riduzione d'inquinamento al minimo costo, senza quindi richiedere eccessivi calcoli e informazioni da parte delle autorità. In questo caso, i diversi soggetti adegueranno la loro attività in modo da uguagliare la tassa pari al costo marginale.

È importante sottolineare ancora una volta come l'intervento da parte dello Stato, in questo caso tramite tassazione, è da compiersi qualora si è in presenza di segnali dal mercato che rivelano inefficienza, ovvero la situazione esistente impone un alto costo sociale, e tale costo può essere ridotto limitandone l'attività.

In secondo luogo, quindi, appurato che tale problema esiste, la riduzione del livello di attività per raggiungere lo standard richiesto non deve portare a enormi costi di risorse.

È interessante, passando dalla teoria alla pratica, constatare come la metodologia di intervento qua presentata non si discosta molto dalle diverse misure che molti governi

stanno attuando. Ciò significa appunto che i regolatori hanno messo in atto queste procedure e hanno constatato che funziona.

3. Le esternalità dei trasporti

Tra tutti i beni di consumo, pochi sono tassati tanto pesantemente o regolati tanto intensamente quanto le automobili. Basti pensare alla tassa automobilistica (bollo auto) che negli Stati Uniti in media vale il 18% del prezzo di vendita, o le tasse sul carburante, pari al 20% del prezzo finale (Winston and McConnel, 2003).

Allo stesso tempo però, pochi settori richiedono una rete di infrastrutture ampia e complessa come quello dei trasporti, e ancor meno, come verrà presentato successivamente, causano degli effetti negativi di così grandi proporzioni. Gli impatti che si generano sulla collettività sono molteplici: inquinamento, congestione, incidenti sono solo alcune delle conseguenze che si possono considerare.

Proprio per tali ragioni, negli ultimi anni sta generando sempre più interesse l'analisi degli impatti che il singolo individuo genera sulla collettività quando questo si mette alla guida; a ciò si aggiunge il dato incontestabile del crescente numero di autovetture e delle molteplici interconnessioni che il sistema trasportistico ha con il resto del sistema economico, con l'ambiente sociale e quello ambientale.

Queste ripercussioni, unite al fatto che il trasporto su strada è la modalità predominante tutt'oggi diffusa, ha contribuito alla nascita da più parti della necessità di correggere la distribuzione modale corrente, sottolineando come il profilo dei prezzi dei mezzi di trasporto non favorisce comportamenti socialmente desiderabili: i prezzi per la mobilità frequentemente riflettono solo la componente privata dei costi, non considerando costi o benefici esterni, definiti appunto esternalità. Questa discordanza, come è stato ampiamente discusso nei precedenti paragrafi, crea un'allocatione inefficiente delle risorse, e per riportare la situazione a condizioni ottimali, è richiesto un intervento dello Stato tramite imposte, sussidi o misure regolamentari.

Se sulla necessità di correggere la situazione attuale si tende ad essere in larga misura concordi, ciò che divide è il modo in cui poter identificare e monetizzare le esternalità. In particolare, nell'effettuare una stima, come dice Danielis (2001), è importante identificare le finalità che si vogliono perseguire, che sono principalmente tre:

- cambiare la situazione attuale per raggiungere l'efficienza economica;
- mettere a confronto le diverse modalità di trasporto, in base ai costi che ciascuna di esse genera;
- valutare, in ottica di equità, la distribuzione dei costi e dei benefici.

Nel momento in cui viene fatta un'analisi economica e monetaria riguardante le esternalità, ciò che si evince è che si sta implicitamente ragionando in ottica "pigouviana", cercando, quindi, di risolvere il problema delle esternalità con una tassa che vada a internalizzare i costi. Quest'ultima ha lo scopo di remunerare la "collettività" ed è posta al livello tale da risultare indifferente ai singoli subire l'esternalità e ricevere il compenso o non subire più l'esternalità a seguito della sua eliminazione. Si è cercato in alcuni casi di risolvere il problema anche ragionando in ottica "coasiana": vedremo quindi in dettaglio le due possibili strade perseguibili.

3.1 Inquinamento atmosferico

L'inquinamento atmosferico è da sempre l'esempio di esternalità negativa riportato nei manuali di microeconomia.

Esso viene suddiviso in inquinamento locale e inquinamento globale. Il primo è quello che genera problemi a chi si trova nei pressi dell'area inquinata, il secondo invece è quello che ha un impatto su tutti indistintamente, poiché causa il surriscaldamento globale.

3.1.1 Inquinamento locale

Effetti sull'ambiente circostante

Un automobilista, nel momento in cui si mette alla guida, genera un costo sociale sugli altri individui, siano anch'essi degli automobilisti o dei semplici residenti.

Le sostanze inquinanti emesse dall'auto (anidride solforosa, diossido di azoto, ozono, ossido di carbonio, ecc.) possono colpire gli organi del corpo umano, quali vie respiratorie e polmoni, ma anche cuore e cervello. In particolar modo il rilascio di CO nell'aria riduce l'ossigeno nell'atmosfera, causando difficoltà respiratorie e malattie cardiovascolari; l'emissione di HC (idrocarburi) e NO_x (ossidi di azoto) porta alla formazione di ozono, il quale causa problemi alle funzioni polmonari, principalmente nei bambini e negli asmatici.

Un altro inquinante è il PM_{2.5} (particolato fine), formato da particelle molto fini capaci di raggiungere il tessuto polmonare; è stato studiato che vi è una relazione causale tra l'emissione di tale particolato e il livello di mortalità (Dockery et al. 1993; Schwartz 1994).

Il PM₁₀, infine, è un particolato di dimensioni maggiori del precedente: per questo motivo le particelle possono essere inalate e penetrare solo nel tratto superiore

dell'apparato respiratorio, causando problemi a esso. Le conseguenze di questo particolato sono però molto meno dannose rispetto al suo "parente" stretto.

Esistono però altri effetti causati dall'inquinamento delle autovetture.

In particolare, esso causa danni alle abitazioni, dovuto al fatto che i particolati e il pulviscolo sporcano le facciate. Di maggior rilievo, però, è la corrosione delle pareti esterne delle abitazioni causate dagli inquinanti acidi, quali NO_x e SO₂. Questi ultimi danni originano un costo esterno solo agli abitanti delle case intaccate; si tratta, quindi, di un disagio limitato ad un gruppo più ristretto di individui.

Si hanno però anche dei danni all'agricoltura, alle foreste e ad altri ecosistemi dovuti al deposito di acidi e all'esposizione di ozono e SO₂.

Contromisure messe in atto

Vista la crescente importanza che ha assunto questo tema, hanno cominciato a diffondersi un po' in tutta Europa una serie di misure preventive. Nel *Capitolo 5* si presenterà una delle più importanti, ovvero quella relativa al *Road Pricing*. Di seguito, invece, vengono riportati ulteriori rimedi per poter limitare il fenomeno delle esternalità riguardanti l'inquinamento locale.

Le modalità mediante le quali è possibile una riduzione delle emissioni sono principalmente tre:

1. utilizzare nuove tecnologie che riducono le emissioni per ogni litro di carburante consumato;
2. diminuire i chilometri percorsi;
3. migliorare il consumo medio di carburante attraverso, per esempio, una guida più lineare

Uno dei primi interventi attuati è quello in America con la *Clean Air Act* (ma anche in altre parti del mondo con provvedimenti simili), che consisteva nell'intervenire sul primo punto della lista andando ad imporre un *grams-per-mile standards* sulle emissioni delle automobili. Veniva quindi richiesto di produrre auto che avessero un quantitativo massimo di emissioni di CO, NO_x e HC. Questo provvedimento aveva un impatto sui produttori di auto, i quali non erano i diretti generatori di esternalità; producendo, però, auto più ecologiche, le emissioni si sono ridotte e la qualità dell'aria è, quindi, migliorata.

L'applicazione di norme sempre più stringenti ha fatto in modo che, nonostante la continua crescita del *VMT (Vehicle miles traveled)* degli ultimi 30 anni, le emissioni

di inquinanti locali scendessero drasticamente. Ciò grazie anche al fatto che con il tempo le autovetture più vecchie, alle quali non era applicato alcun limite in termini di standard sulle emissioni, sono sparite dalla circolazione, lasciando il posto a veicoli nuovi meno inquinanti.

Si è cercato, inoltre, di incentivare l'utilizzo di auto di ultima generazione e più ecologiche tramite l'uso di un'imposta sull'auto stessa, denominata comunemente bollo auto. Quest'ultimo dipende da alcuni parametri; nel caso italiano, per esempio, dalla potenza del veicolo e dal tipo legislativo (Euro 0,1, 2, ...). In aggiunta a ciò, per determinate categorie di auto, come le elettriche, si è esenti dal pagamento; per altre ancora, come per le G.P.L., si è esentati per un periodo di tempo di circa 5 anni. Dipendendo dal tipo legislativo e dalla classe inquinante, il bollo ha lo scopo di spronare all'utilizzo di auto meno vecchie e meno inquinanti.

Le norme e tasse sopra citate forniscono un miglioramento *a priori* delle emissioni delle autovetture; è importante, però, cercare anche di far detenere agli automobilisti un comportamento efficiente in modo che producano la quantità ottima desiderata di inquinante. Trattandosi infatti di esternalità negativa, come discusso precedentemente, gli automobilisti tendono ad inquinare un quantitativo maggiore di quello che farebbero qualora dovessero pagare per le esternalità prodotte. Affinché si comportino in maniera efficiente, è necessario influenzare i chilometri percorsi, portandoli ad effettuare la quantità desiderata in linea con gli standard che si vogliono raggiungere. Su questo ultimo aspetto, dunque, si sono mosse molte città applicando politiche di *Road Pricing*, di cui si parlerà successivamente.

Un provvedimento che l'Unione Europea sta studiando nell'ultimo periodo, il quale rispetta le idee qua descritte, è l'applicazione di un nuovo bollo, che potrà avvenire entro il 2026. Con questa nuova tassa, infatti, cambieranno i parametri di calcolo, che saranno la classe inquinante dell'autoveicolo e i chilometri percorsi. Questo tipo di provvedimento richiederà l'uso di nuove tecnologie, come l'installazione di una scatola nera in ogni veicolo, così da poter registrare i chilometri effettuati. Ciò potrà sicuramente risultare efficace per determinare una riduzione dell'inquinamento, dal momento che influenza non più soltanto l'acquisto di determinate categorie di veicoli, ma ne condiziona anche il comportamento *a posteriori*, causando in molti casi una diminuzione del VMT.

Non da ultimo, le regolamentazioni stradali, come per esempio i limiti di velocità, hanno come scopo, oltre quello di ridurre gli incidenti, anche quello di influenzare la guida delle persone e renderla meno discontinua, così da generare un consumo e, quindi, un inquinamento inferiore.

3.1.2 Inquinamento globale

Effetti sull'ambiente circostante

Con l'accezione di inquinamento globale si vuole indicare l'emissione di CO₂ e, con un effetto inferiore, di N₂O E CH₄ che porta al surriscaldamento globale e a cambiamenti climatici. Secondo una stima del Dipartimento di Energia degli U.S.A., il 50% dell'anidride carbonica prodotta negli Stati Uniti è generata dalle autovetture, una percentuale molto elevata.

Il primo effetto negativo che possiamo riscontrare è l'aumento del livello del mare: relativamente a questo sono necessarie misure preventive per poter limitare i danni alle abitazioni e alle infrastrutture presenti sulla costa. Il costo per la protezione risulta facilmente calcolabile, ma altri effetti dovuti all'aumento del livello del mare, come il rischio di inondazioni, sono difficilmente quantificabili. Gli abitanti delle isole o delle coste, infatti, risentono di questo fenomeno e spesso sono costrette anche a trasferirsi, affrontando quindi dei costi privati.

Un secondo effetto dovuto al surriscaldamento globale è l'aumento delle temperature medie: questo significa che, se da un lato si è assistito ad una diminuzione del consumo di energia per riscaldare, dall'altro è aumentato il consumo per i condizionatori durante il periodo estivo. Nei modelli che cercano di catturare i costi generati, bisognerà valutare l'impatto di questi due trend opposti.

Le ripercussioni sull'agricoltura sono anch'esse piuttosto rilevanti; si stima si aggirino attorno al 10% degli effetti totali. L'aumento di piovosità in alcune zone e i cambiamenti climatici hanno un effetto sulla resa dei raccolti e spesso obbligano gli agricoltori a cambiare prodotti coltivati.

Il cambiamento della temperatura e del livello di umidità possono portare in alcune zone a una domanda di acqua superiore all'offerta, con danni molto alti sul benessere sociale di quelle zone.

Gli impatti sulla salute sono anch'essi un tema di cui tenere conto. In questo caso il primo effetto riguarda il cambiamento delle temperature: esiste infatti un trend opposto, dovuto al fatto che l'aumento delle temperature d'estate porta ad un aumento del livello di mortalità, mentre un aumento delle temperature d'inverno porta ad una diminuzione della stessa, non essendoci più temperature molto rigide. Nei modelli di stima dei costi bisognerà considerare questo trend opposto e valutare l'effetto netto sulla mortalità.

Ciò che sicuramente ha un effetto negativo dovuto ai cambiamenti climatici che si sono consolidati è il diffondersi di malattie tropicali, come per esempio la malaria, soprattutto in zone africane.

Il surriscaldamento globale impatta anche sull'ecosistema, con un aumento del rischio di estinzione per determinate specie di animali. Oltre che sul suolo, l'acidificazione del mare a causa dell'aumento di anidride carbonica ha conseguenze sull'ecosistema marino. Se pur di grande attenzione, nei modelli utilizzati questo tipo di effetto viene spesso poco considerato per la difficoltà oggettiva nello stimare il costo generato. Alcuni considerano solo l'estinzione di un limitato gruppo di specie, catturando, quindi, solo una parte del costo dovuto agli effetti sull'ecosistema.

L'aumento di eventi estremi, quali cicloni tropicali, tempeste, siccità e tifoni sono tutti effetti dovuti al surriscaldamento globale. Questi eventi estremi sono anch'essi molto difficili da quantificare; inoltre, grazie alle nuove tecnologie presenti, si è assistito a un miglioramento delle misure preventive che ha portato a una diminuzione delle morti causate da questi.

Sono stati presentati finora i principali effetti del surriscaldamento globale. Si parla di inquinamento globale poiché ogni individuo, mettendosi alla guida, contribuisce in piccola parte al generarsi di tutti questi effetti, senza dover pagare per il danno recato sugli altri.

Contromisure messe in atto

I problemi che si sono riscontrati e che derivano dall'inquinamento globale hanno dapprima interessato gli esperti e le sfere scientifiche, successivamente governi, enti e organizzazioni, e ora anche le singole persone che hanno appreso le gravi conseguenze determinate dal surriscaldamento globale. Se pur si è sottolineato che le cause, i rischi e il procrearsi dei diversi disastri sono difficilmente quantificabili e prevedibili, è chiaro che una soluzione deve essere la riduzione dei cosiddetti *gas serra*.

Tale effetto sicuramente si tiene conto quando si vuole applicare il *Road Pricing* in una città, in quanto rappresenta una delle esternalità. Di seguito si presentano due delle diverse “terapie” che sono state o vengono tutt’oggi utilizzate a livello mondiale.

1. Il protocollo di Kyoto e la teoria Coasiana

In tema di surriscaldamento globale, diversi paesi decisero di redigere il protocollo di Kyoto, grazie al quale i paesi aderenti si ponevano degli obblighi che avevano come punto focale la riduzione dell’inquinamento globale. In particolare, i punti fondamentali del trattato erano:

1. riduzione delle emissioni;
2. scadenza temporale per il conseguimento degli obiettivi;
3. ricorso a strumenti di mercato per raggiungere i target fissati.

Il punto su cui si desidera focalizzare l’attenzione è proprio quest’ultimo, per i suoi stretti legami ad un teorema già precedentemente dimostrato.

Il protocollo, infatti, impegnava ciascun paese a rispettare dei target prefissati (es. UE 8% e USA 7%), ma questa riduzione si intendeva come riduzione “netta”, interpretata quindi come bilancio tra i gas serra emessi e quelli assorbiti. L’assorbimento è possibile grazie a determinate opere pubbliche o private, che possono eliminare e immagazzinare i gas serra utilizzando appositi assorbitori, per esempio piante e alberi. L’aspetto del tutto innovativo di questo trattato è nella definizione del *Clean Development Mechanisms*: infatti uno stato o un’azienda, compiendo delle opere che hanno come scopo l’abbattimento dei gas serra, accumula dei *crediti di carbonio*. Questi hanno un valore di mercato, che varia in base al numero di crediti generati e al prezzo dei crediti, il quale dipende a sua volta dall’andamento del mercato.

Una volta ottenuto un credito, esso può essere venduto sul mercato e comprato da un paese o un’azienda che altrimenti non riuscirebbe a rispettare il target imposto dal protocollo di Kyoto. In questo modo, colui che inquina dovrà comprare un credito, pagando un prezzo per l’esternalità prodotta; viceversa colui che compie un’opera, la quale ha come scopo ultimo l’eliminazione di gas serra, riceverà un compenso tramite questo sistema.

Lo scopo del trattato è stato quello di creare un sistema globale ed efficiente che permetta di assegnare un valore alle emissioni di gas serra.

Il punto focale da evidenziare è che il protocollo di Kyoto è uno degli esempi, non tanti a dir la verità, in cui sono state applicate le idee di Coase riguardanti i diritti di proprietà. Egli, come detto precedentemente, affermava che bisogna sopperire alla mancanza del mercato stabilendo dei chiari diritti di proprietà. Il problema qui risiede

nel fatto che si assiste a un eccessivo utilizzo dell'atmosfera, il luogo dove gli inquinanti vengono depositati e dove tutti abbiamo un libero accesso.

Per riuscire ad ottenere un uso efficiente dell'atmosfera, quindi, bisogna privatizzarne l'utilizzo, allocando qui i diritti di proprietà. Quello che si instaura è il diritto ad utilizzare il deposito dell'atmosfera, che può essere acquisito tramite l'acquisto di *crediti di carbonio*.

Usata nel protocollo di Kyoto, questa metodologia è poi stata ulteriormente applicata da vari paesi, sotto il nome di *Emissions Trading System* (ETS). Il principio è rimasto lo stesso: si permette alle industrie al di sotto della soglia di inquinamento concessa di cedere il vantaggio accumulato a industrie che emettono più del dovuto, regolando questo scambio tramite il meccanismo dei prezzi.

È stata quindi esplicitata una delle possibili metodologie per poter ottenere un uso efficiente e responsabile delle risorse.

2. Carbon pricing e la teoria Pigouviana

Diversi governi e diverse nazioni stanno seguendo un'altra modalità per la riduzione di CO₂, tramite la fissazione di una tassa per le emissioni. Il "price on carbon" serve appunto a riportare il costo del danno al responsabile. Invece che avere uno Stato che decida chi può inquinare e quanto, la tassa dà un segnale economico e lascia agli inquinatori la decisione di ridurre le emissioni o continuare ad inquinare e pagare per questo. Baumol e Oates, come già riportato nel precedente capitolo, hanno dichiarato come l'utilizzo di una tassa sia la modalità più economica e flessibile che si possa utilizzare.

In questo caso la tassa viene posta sulle emissioni, o più comunemente sul contenuto di carbonio nel combustibile fossile. La differenza sostanziale rispetto al caso precedente della ETS consiste nel fatto che non è stabilita fin da subito la soglia a cui si vuole arrivare, ma si stabilisce *a priori* il prezzo del carbonio. Solo una volta che le imprese prenderanno le loro decisioni, allora si potrà valutare a quale livello di emissioni si è giunti.

Un'ulteriore alternativa alla tassazione delle emissioni è quella di fornire un sussidio per la riduzione di queste. Ciò spesso viene messo in atto dagli Stati in modo da finanziare le attività di riduzione degli inquinanti.

Confronto tra le due alternative

La scelta su quale dei due approcci utilizzare dipende da ogni singolo paese anche in base alle relative circostanze in cui essi si trovano. La *Figura 1* di seguito riportata tratta dallo *State and Trends of carbon pricing 2018*, mostra gli stati del mondo nei quali è stata adottata una delle due tipologie per ridurre le emissioni, ovvero l'ETS e la tassa sul carbonio.

Come si evince da questa rappresentazione, l'Europa risulta utilizzare molto la metodologia ETS, anche se molti paesi hanno già optato per l'utilizzo di entrambe; a seconda del settore su cui si vuole impattare si sceglie per una o per l'altra.

L'America invece è un paese arretrato da questo punto di vista: nonostante qualche città abbia deciso per l'applicazione di queste regolamentazioni, a livello macro per ora si stanno considerando delle soluzioni, ma non è ancora avvenuta una scelta a livello formale. È da sottolineare come in realtà gli U.S.A non avevano nemmeno aderito al protocollo di Kyoto quando esso era in vigore. Solo l'Argentina e il Sud Africa hanno optato per l'opzione unica della *carbon tax*, mentre Australia e Nuova Zelanda hanno optato entrambe per l'applicazione della ETS.

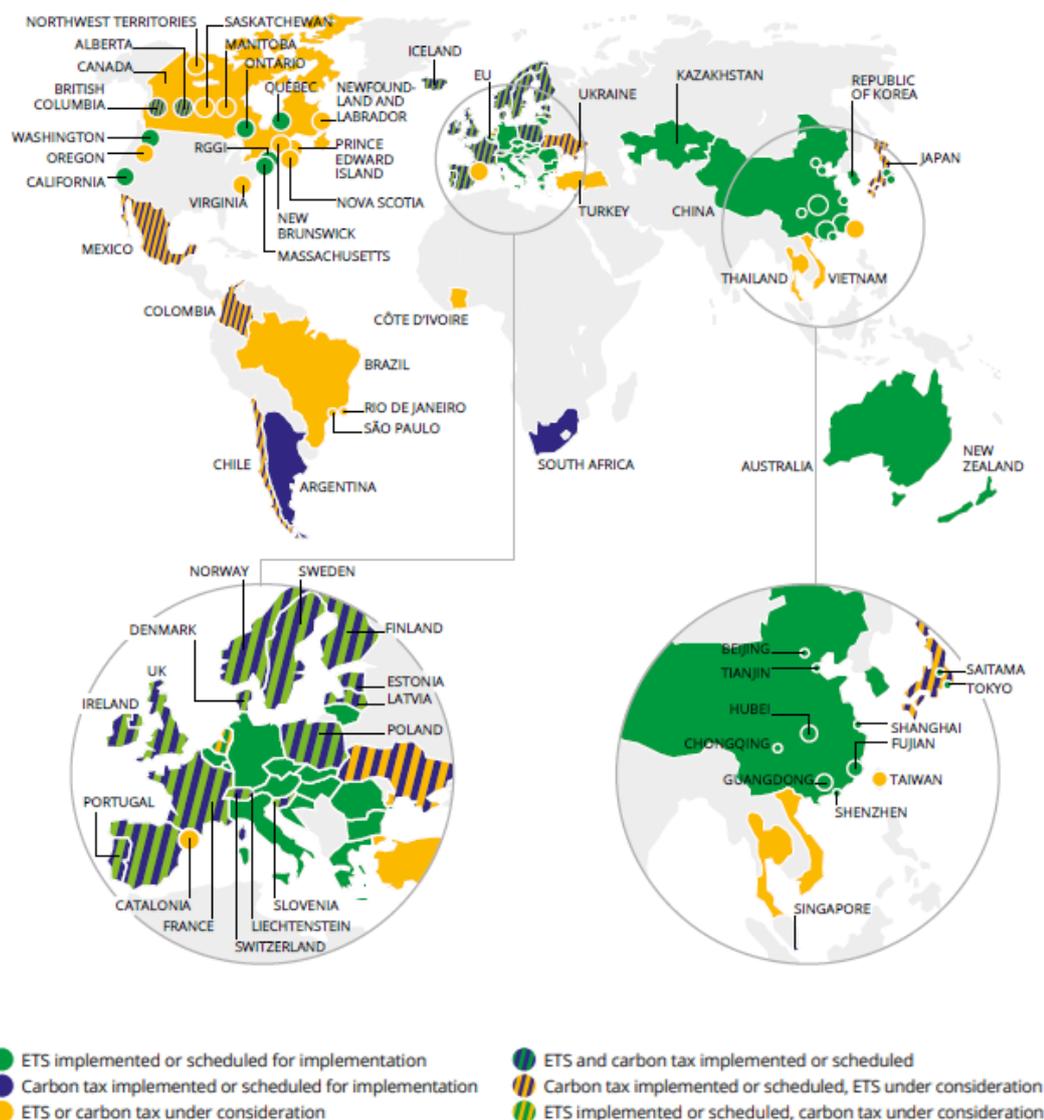


Figura 1: Rappresentazione delle iniziative mondiali per la riduzione di emissioni di CO2.
 Fonte: State and Trends of Carbon Pricing 2018, Washington DC, May 2018

Per concludere l'analisi e tornare al tema del trasporto automobilistico, questo tipo di misure preventive funziona a livello macro, ma l'applicazione al settore dei trasporti può risultare più complessa. In particolare, l'approccio "coasiano" non è perseguibile, in quanto richiederebbe un numero di transazioni elevatissimo, dato il numero spropositato di automobilisti, ragione per la quale nel settore delle automobili si tende a utilizzare un approccio incentrato sull'applicazione di una tassa.

3.2 La congestione

Effetti

La congestione è un'altra tipologia di costo esterno che si genera nel momento in cui più individui competono per l'uso di una strada, la quale ha una capacità limitata. In primo luogo, nel momento in cui un individuo decide di immettersi in una strada, e se essa è sufficientemente trafficata, il tempo che impiegano gli altri individui per percorrerla aumenta, ragion per cui si parla appunto di esternalità da congestione. Esistono infatti numerosi studi che hanno come scopo quello di assegnare un valore al tempo, definito in inglese *Value of Time (VOT)*, o *Value of Travel Time Savings (VOTTS)*. Questi studi sottolineano come anche il tempo sia una componente di costo, e quindi una componente di esternalità, in molti casi la più importante. Essa infatti rappresenta il mancato guadagno che si sarebbe potuto ottenere se, anziché perdere del tempo in coda, si fosse svolta un'attività produttiva. Nel caso di congestione comunque, il VOT rappresenta il 90 % del costo economico della congestione, ma vi sono anche altre componenti, di seguito presentate.

Il VOT o il VOTTS, nella sua stima include generalmente un'ulteriore componente di costo: la sua valutazione viene infatti incrementata di un fattore moltiplicativo poiché si considera lo stress e il disagio provocato dall'essere in coda.

Un altro effetto di minore impatto è la maggiore usura, che porta ad un deprezzamento, che il veicolo subisce qualora si trovi in un'area congestionata.

Si assiste, inoltre, anche ad un aumento del costo operativo per chi si trova in coda, poiché il consumo di carburante aumenta in situazioni di continuo *stop-and-go*.

Altro malessere generato dalle zone trafficcate, che poi si traduce in esternalità, è dovuto al fatto che queste risultano essere poco attendibili rispetto al tempo di attraversamento. Non si può infatti avere una certa previsione del tempo di percorrenza qualora vi sia traffico, ragion per cui le persone tendono a partire ancora prima del previsto per poter essere puntuali e ciò genera di conseguenza un costo per congestione maggiore.

Esistono ancora altri effetti, generalmente di minore impatto, quali ad esempio l'aumento di incidenti e l'aumento di inquinamento acustico.

Il costo della congestione è, quindi, come le esternalità studiate precedentemente, costituito da una componente interna e una esterna. La componente interna è data

dall'aumento del tempo e dei costi operativi che sopporta l'individuo stesso quando decide di immettersi in una zona trafficata. La componente esterna, invece, è costituita dagli stessi tipi di costi, sopportati però dagli altri operatori e dovuti al fatto che il primo è entrato nel sistema.

Rimedi

Per ciò che riguarda le possibilità con cui risolvere il problema della congestione, si fa riferimento al capitolo successivo, ove si discuterà il *Road Pricing*. La congestione è un fenomeno locale, che ha impatto su un territorio più o meno ampio, riguardante principalmente le aree urbane e metropolitane in cui vi è un elevato flusso di veicoli; è bene quindi valutare ogni singola situazione e, ove necessario, si può ipotizzare l'inserimento di una tassa che abbia lo scopo di ridurre la congestione, in quanto porterebbe gli individui o a spostarsi in strade meno congestionate o a cambiare il modo di trasporto. Ciò che sicuramente è importante in questo tipo di valutazioni è cercare di prevedere il comportamento futuro degli individui e di valutare se questo nuovo scenario possa generare dei miglioramenti.

3.3 Altre esternalità

Quelle analizzate precedentemente sono solo alcune delle esternalità che si generano e, di conseguenza, maggiormente considerate quando si vuole optare per una nuova *policy*. Di seguito è presente un elenco di tutte le altre principali esternalità che sono state analizzate nei diversi studi:

- Costo per gli incidenti: rappresenta i costi sociali derivanti da un incidente. Tale tipo di costo dipende, oltre che dall'incidente stesso, anche dalla polizza assicurativa scelta. Le principali componenti degli *accident costs* sono danni materiali, costi amministrativi, costi per le cure e costi dovuti alla mancata produzione.
- Inquinamento acustico: il rumore provocato dalle auto costituisce un'altra esternalità, in quanto genera un fastidio, tradotto poi in danno economico, subito dalle persone che si trovano nei pressi del rumore. Si è dimostrato che quest'ultimo può provocare anche effetti negativi sulla salute. Si possono verificare infatti danni all'udito se si superano gli 85 dB, mentre sopra i 60 dB possono verificarsi reazioni nervose, con conseguente aumento della frequenza del battito cardiaco, aumento della pressione del sangue e sbalzi ormonali; in più è possibile l'aumento del rischio di malattie cardiovascolari.
- Costo delle infrastrutture: si genera un aumento dei costi per le riparazioni e la manutenzione delle infrastrutture indotto da un elevato livello di traffico.
- Altri costi: danni all'ecosistema e alla biodiversità, inquinamento del suolo e dell'acqua, danni alla natura e al paesaggio.

4. La valutazione dei costi esterni del trasporto automobilistico

Questo capitolo, una volta esaminati i diversi tipi di esternalità generate dal trasporto automobilistico, ha lo scopo di valutare, in termini monetari, il danno economico generato. Questo in particolare sarà molto utile successivamente, in quanto i valori qui riportati verranno anche usati nel *Capitolo 6* per la stima dei costi esterni relativi alla Z.T.L. di Torino. In prima analisi viene fornito l'approccio teorico del problema, tramite l'analisi dei costi marginali privati ed esterni.

Questo tipo di approccio però, risulta poco perseguibile dal punto di vista pratico, ecco ragion per cui le valutazioni economiche verteranno sulla stima dei costi esterni totali. È importante sottolineare come le diverse metodologie di valutazione dei costi qui presentate sono stime mediate, che possono fornire un ottimo punto di partenza, ma che dovrebbero a loro volta essere accompagnate da delle misurazioni locali. Queste infatti includono variabili del singolo territorio o città in esame. Ultima precisazione da fare è quella relativa alle esternalità riportate: si è scelto di concentrare lo studio a soli due ambiti, quello dell'inquinamento e della congestione. Dal lato pratico comunque, queste due componenti sono quelle più rilevanti e costituiscono i due motivi principali che hanno spinto alcune città all'applicazione del *Road Pricing*.

4.1 Approccio teorico per l'internalizzazione delle esternalità

Quantificare il danno economico è importante qualora si voglia inserire una tassa che abbia, come già visto, lo scopo di "internalizzare le esternalità".

Di seguito, in via teorica, si dimostra come valutare il livello di tassa ottimale in presenza d'inquinamento. Nella *Figura 2* è rappresentata la situazione; con D si indica la curva di domanda. Tale curva in sé rappresenta i benefici marginali privati (BM_P), assunti decrescenti con l'aumento del numero di veicoli. CM_P rappresenta invece i costi marginali privati: essi sono dati principalmente dal carburante e dal tempo necessario per percorrere la strada. La curva dei costi marginali privati è crescente, poiché all'aumentare del traffico cresce il tempo impiegato per percorrere un determinato arco. Assumiamo per semplicità tutti gli individui uguali, così che la curva dei costi marginali privati è uguale a quella dei costi medi privati (CM_{eP}). Ogni individuo a questo punto prende le sue decisioni razionali e all'equilibrio il livello di

traffico è T^* , dove i benefici marginali sono pari ai costi marginali. Se si andasse oltre il livello T^* , il beneficio marginale sarebbe inferiore al costo marginale, perciò nessun nuovo individuo si immette nel traffico.

Il livello di Traffico T^* risulta quindi essere il punto di ottimo individuale, ma non massimizza il surplus collettivo. Si ipotizza, quindi, la presenza di costi dell'inquinamento: nel precedente capitolo si è visto come questo provoca una serie di effetti collaterali che ledono il benessere degli individui. Il costo marginale dell'inquinamento aumenta all'aumentare del traffico, dovuto al fatto che a minori velocità i motori risultano meno efficienti dal punto di vista energetico e ambientale, causando quindi un aumento delle emissioni. Con CM_T si vuole indicare il costo marginale totale, dato dalla somma tra il costo marginale privato e il costo marginale esterno. Guardando la figura, si evince che nel punto T^* si ha una perdita di benessere sociale, poiché i costi marginali totali sono maggiori dei benefici marginali: l'area CBA rappresenta proprio questa perdita. La soluzione di ottimo sociale invece è posta in T^{**} , dove quindi il costo marginale totale uguaglia il beneficio marginale. Questo punto può essere raggiunto imponendo una tassa t^* , pari al costo marginale esterno. In questo modo si riporta l'equilibrio al punto di ottimo sociale.

Dal modello si vede come gli automobilisti, nel prendere le proprie decisioni, non tengono in considerazione i costi marginali esterni.

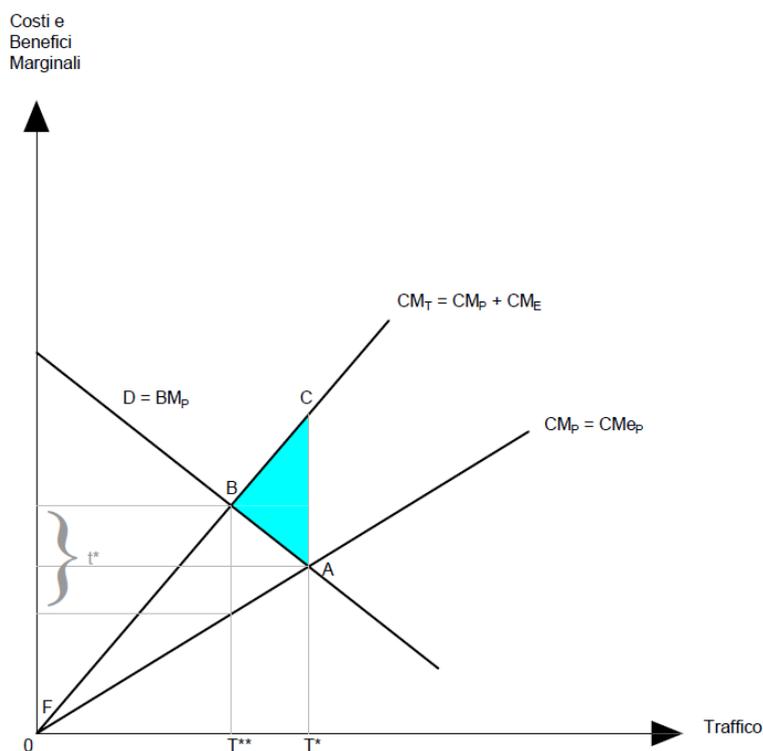


Figura 2: Valutazione dell'imposta ottima sull'inquinamento atmosferico

Come presentato in via teorica, l'approccio di porre la tassa pari al costo marginale esterno viene definita soluzione di *first best*. Nella realtà questo tipo di approccio, però, risulta poco perseguibile.

Prima limitazione è dovuta all'esistenza di distorsioni nei mercati dei servizi sostitutivi: considerando l'ambito dei trasporti, se nel settore, ad esempio, del trasporto alternativo su autobus non fosse rispecchiato il principio del "prezzo pari al costo marginale", allora la soluzione efficiente in quello delle autovetture non sarebbe più quella di *first best*. I settori sono molteplici, le distorsioni si accumulano e, quindi, la soluzione da perseguire si allontana ulteriormente da quella teorica.

In aggiunta a ciò, un'ulteriore limitazione è data dalla difficoltà nello stimare la posizione e la pendenza delle curve descritte nel modello precedente. Esistono, infatti, una serie di asimmetrie informative, in particolare relativamente alla curva dei costi marginali esterni.

A livello teorico, inoltre, si è ipotizzato uguaglianza delle curve di costo marginale, cosa non vera qualora si considerino individui diversi. Non da ultimo, il livello di traffico dipende anche dal luogo, dal tempo e dal tipo di autovettura, perciò sarebbe necessaria una discriminazione di prezzo complessa e difficile da attuare.

Per tutti questi motivi la letteratura si è concentrata sulla stima dei costi esterni medi o totali, inteso come danno recato sugli altri individui, abbandonando, quindi, il concetto di costo marginale. Questo metodo permette di conoscere il costo “nascosto” che genera il settore dei trasporti e può essere usato, in prima approssimazione, per determinare la tassa da imporre.

Anche i diversi meccanismi per trovare la tassa ottima sono stati rivisitati e, come è stato presentato da Baumol e Oates (1971), queste stime servono come punto di partenza, ma l’aspetto cruciale su cui concentrarsi è valutare i cambiamenti della domanda *ex-post* in modo da innescare un processo iterativo di aggiustamento della tassa, così da raggiungere il livello desiderato.

Il ragionamento appena presentato sull’inquinamento risulta essere molto simile anche quando si affronta il tema della congestione. La congestione è una delle esternalità, ma rimane interna al solo settore dei trasporti. Infatti, la “perdita” di tempo che ne deriva, impatta solo coloro che sono alla guida, e non l’intera comunità come può essere nel caso dell’inquinamento. In *Figura 3* si presenta, in via teorica, il fenomeno che va a verificarsi. Si vede come il funzionamento sia analogo a quello presentato per l’inquinamento: le maggiori differenze sono dovute al fatto che fino al livello T_0 non vi è alcun effetto sugli altri automobilisti, in quanto la strada si ritiene a “flusso libero”. Oltre una certa soglia, aumenta il costo marginale privato CM_P , poiché sale il tempo di attraversamento, ma cresce anche il costo marginale sociale CM_T , poiché aumenta il tempo di attraversamento degli altri individui. D è sempre la curva di domanda. T^* rappresenta il punto di ottimo privato, mentre T^{**} l’ottimo sociale. La tassa quindi dovrà essere sempre pari alla differenza tra il costo marginale privato e quello sociale, identificata anche qui con t^* . Lo scopo, come anche per l’inquinamento, non risulta essere quello di annullare del tutto l’esternalità, ma portarla a un livello efficiente, dove i costi marginali sociali sono pari ai benefici marginali.

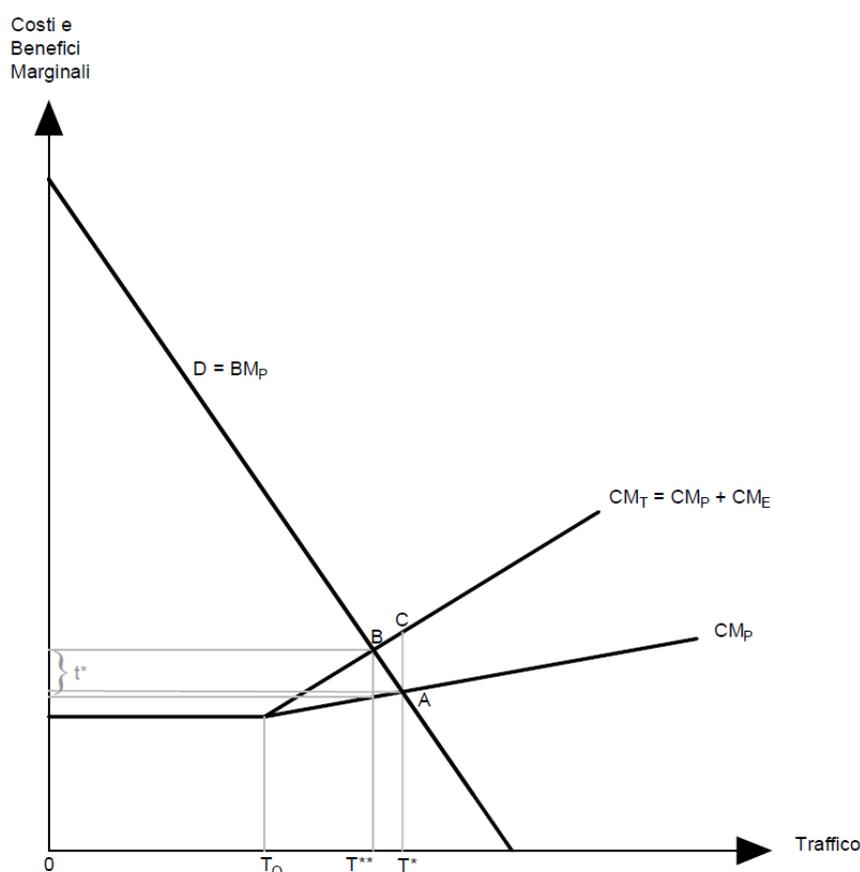


Figura 3: Valutazione dell'imposta ottima sulla congestione

4.2 Metodi per la stima dei costi esterni

4.2.1 I costi esterni dell'inquinamento locale

Per ciò che concerne l'inquinamento locale, riuscire a quantificare in termini monetari il danno generato sugli altri, in modo da mettere in atto delle azioni correttive, richiede l'utilizzo di modelli sofisticati e complessi.

Un approccio *bottom-up* ha il vantaggio di poter stimare il costo marginale distinguendo le diverse situazioni del traffico, grazie al fatto che utilizza un alto numero di variabili in input. Lo svantaggio però è che risulta essere molto costoso e difficile aggregare l'informazione qualora lo si utilizzi per la stima di variabili nazionali. Ecco ragioni per cui in alcuni casi si preferisce un approccio semplificato *top-down*.

Una delle procedure più diffuse è quella sviluppata all'interno dei progetti ExternE, l'Impact Pathway Approach (IPA), un approccio *bottom-up*, il quale rappresenta il

processo di formazione del danno economico delle esternalità attraverso una serie di step. Nella *Figura 4* essi vengono rappresentati.

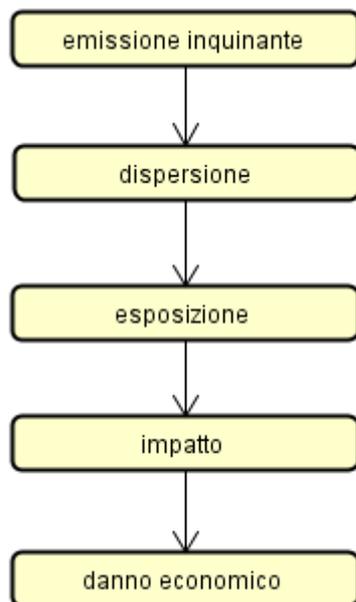


Figura 4: Impact Pathway Approach IPA

Fonte: Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., ... & Cox, V. (2014). Update of the handbook on external costs of transport: final report for the European Commission: DG-MOVE

A ognuno dei passi corrisponde una serie di dati in input e dati in output.

Emissione inquinante

Nella prima fase si identifica la quantità d'inquinanti emessa dalle autovetture. È importante distinguere tra inquinanti primari, prodotti direttamente dalla combustione del carburante, e secondari, i quali si formano a causa di reazioni tra i componenti emessi. I dati in entrata necessari sono il flusso di veicoli e i fattori di emissione delle diverse categorie di autovetture, proprio perché a ogni categoria corrisponde un diverso impatto. Il risultato di questa fase sarà quindi la quantità d'inquinante emessa.

Dispersione

Una volta che l'inquinante è stato emesso, è necessario valutare come esso si disperde nell'ambiente. In questa fase quindi servono dei modelli di dispersione atmosferica, che utilizzano come valori in entrata dati meteorologici, come per esempio la velocità del vento e la sua direzione. Questi tipi di modelli sono molto complessi da realizzarsi e difficilmente reperibili. In una determinata zona arriva l'inquinamento di tutte le aree circostanti ed in più una componente di inquinamento che deriva da aree più distanti,

qualora il vento soffiasse in quella direzione: i modelli cercano, perciò, di catturare questo fenomeno.

Il risultato di questa fase sarà, per ogni area geografica impattata, la concentrazione d'inquinante, espressa come $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Esposizione

Qui si vuole valutare l'entità della popolazione e dell'ecosistema esposto al rischio dell'emissione. È importante distinguere gli inquinanti in *corto raggio*, che vanno ad impattare coloro che si trovano nelle vicinanze della fonte dell'emissione, e *lungo raggio*, come per esempio l'ozono, che può intaccare la salute di soggetti anche a distanze considerevoli. Lo scopo, se si pensa agli effetti sulla salute, è identificare il numero d'individui che verranno a contatto con l'inquinante.

Vengono utilizzati dei modelli che ricevono come valori in input la densità della popolazione e altri dati geo-morfologici; quest'ultimi servono per valutare l'esposizione sull'agricoltura e sul territorio. Il fattore sicuramente di maggiore rilevanza che deve essere disponibile è la densità della popolazione suddivisa nelle diverse aree geografiche di impatto. Viene spesso fatta una distinzione tra zona rurale e zona urbana, dove quest'ultima ha dei valori maggiori di esposizione dovuti alla maggior concentrazione di cittadini in queste zone.

Impatto

In questo caso, avendo precedentemente calcolato l'entità dell'esposizione, si può determinare l'impatto inteso come numero di morti premature, danni alla salute e all'ambiente che derivano per ogni unità di inquinante emessa. Qui si fa uso di modelli epidemiologici per studiare le cause che possono portare al sorgere di malattie che inducono, in casi estremi, alla morte. Questi modelli cercano di determinare la relazione causale che sussiste tra le malattie e le emissioni. Gli inquinanti in questo caso devono essere suddivisi in base alla loro capacità di provocare effetti dannosi sugli organismi: si parla infatti di tossicità *acuta* se è sufficiente una breve esposizione per l'insorgere della malattia, mentre si definisce *cronica* se è necessaria un'esposizione più lunga. È necessario, inoltre, suddividere la popolazione in categorie, poiché a ognuna corrisponde un impatto differente. Una classificazione tipica è quella di suddividere in 3 categorie: da 0 a 14 anni, da 15 a 65 e oltre 65. Una volta che si sono individuate tutte le possibili terne inquinante, malattia e classe di individuo, è possibile identificare il numero di morti/malati a causa dell'inquinamento atmosferico. Uno dei metodi più diffusi per questa stima è quello *dose-risposta*. Esso

stima il numero di morti/malati utilizzando tre variabili: il numero d'individui esposti all'inquinamento, il livello di concentrazione dell'inquinante emesso e il coefficiente dose-risposta. Questo coefficiente assume valori diversi per ogni terna considerata ed esprime un valore percentuale: per ogni aumento unitario di emissioni, indica l'aumento percentuale di morti/malati causati dall'inquinante stesso.

Danno economico

Ultimo punto riguarda il calcolo del valore monetario per ognuna delle malattie che si sono generate. Pochi studi sono stati condotti per calcolare il valore monetario dovuto alla generazione di malattie quali attacchi d'asma, bronchite cronica e altre meno dannose. La maggior parte si sono concentrati sulle malattie che portano alla morte in quanto, se pur con una probabilità inferiore di verificarsi, hanno sicuramente un impatto molto più rilevante e quindi rappresentano anche la componente principale del costo esterno causato dall'inquinamento. Uno dei modi per stimare questi costi, seguito da Desaignes et al. (2011), è determinare il valore medio di un anno di vita, in inglese *mean value of a life year (VOLY)*. Altro approccio invece, seguito questa volta da Brandt et al. (2010), è quello di stimare il valore statistico della vita, in inglese *value of a statistical life (VSL)*, utilizzando poi un fattore scalare per le diverse categorie d'individui.

Le stime compiute fanno uso di questionari sottoposti agli individui con lo scopo d'identificare la loro *willingness-to-pay (WTP)*¹⁰. Sulla stima della WTP si è discusso ampiamente in letteratura: essa viene abitualmente effettuata tramite intervista. La WTP può essere ottenuta tramite: meccanismo d'asta, dove si suggeriscono valori sempre più elevati così da determinare la disponibilità massima, tramite referendum chiuso in cui si suggerisce una cifra che il rispondente accetta o rifiuta, o ancora tramite la scelta da un elenco fissato di valori.

Una volta che si sono ottenute le interviste, è necessario andare ad aggregare i dati e trovare la media o la mediana della WTP.

I valori ottenuti sono differenziati almeno per nazione, proprio per riflettere le differenze che sussistono, quali l'attitudine al rischio, il livello di reddito e il diverso valore della moneta. Alcuni hanno preferito evitar questa suddivisione per questioni

¹⁰ Per le stime dei danni in termini monetari si utilizza la WTP, in base alla quale si stabilisce direttamente quanto gli individui sono disposti a pagare per ridurre determinati inquinanti con lo scopo di migliorare la qualità della vita.

etiche, sarebbe come dare un valore economico diverso alla vita spostandosi da regione a regione: in questi casi, quindi, si è optato per utilizzare i valori medi europei.

Una volta ottenuto il valore economico della vita o della malattia, si può calcolare il costo dell'inquinamento atmosferico da traffico inteso come prodotto tra il numero di morti/malati a causa dell'inquinamento e il costo della vita o malattia appena calcolato.

Risultato

Ciò che si ricava dal processo IPA è il costo per ogni unità d'inquinante emesso (€/tonn).

Quelli di maggiore importanza sono il costo del PM_{2.5} e NO_x per la quantità che viene emessa, ma soprattutto per il danno che generano.

I valori, usati successivamente per l'analisi del caso di Torino, sono presi dal progetto *NEEDS* (2008) per quanto riguarda NO_x, COV e SO₂, invece il valore di PM_{2.5} e PM₁₀ è stato estrapolato dallo studio *IMPACT* (2008). Si è scelto questo tipo di fonti poiché, a differenza di altri studi, comprende tutti gli Stati europei, compresa l'Italia, e, inoltre, considera non solo gli effetti sulla salute, ma anche quelli sul territorio, come i danni all'agricoltura e agli edifici. I valori del PM_{2.5} per ogni Stato europeo sono suddivisi in tre aree: urbana, non urbana e metropolitana. Questo poiché anche all'interno dello stesso Stato si è voluto distinguere tra zone a bassa, media o alta concentrazione di individui, a cui corrispondono valori diversi di esposizione e quindi anche di impatto economico.

Questi valori sono, come già accennato, espressi per unità d'inquinante emesso. Per valutare quindi il costo generato dal singolo individuo bisogna moltiplicare ancora per il fattore di emissione del singolo veicolo.

Successivamente quindi si studierà un'applicazione di questa metodologia al caso di Torino. Di seguito una presentazione dei valori italiani e di altre due nazioni europee, utile per constatare le differenze che sussistono tra i valori dei diversi stati (*Tabella 3*).

Tabella 3: costi esterni dei principali inquinanti, espressi in €/tonn (prezzi del 2008)

	PM2,5			PM10			NOX	COV	SO2
	METROP	URBANA	NON URBANA	METROP	URBANA	NON URBANA			
ITALIA	426.700	137.900	77.700	170.700	55.100	31.100	9.500	1.100	8.700
FRANCIA	453.800	146.100	90.800	181.500	58.400	36.300	10.500	1.400	9.900
GERMANIA	430.500	138.800	83.900	172.200	55.500	33.600	12.700	1.400	10.900

Fonte: Delft, C. E., & Infrac, F. I. (2011). External costs of transport in Europe. Update Study. Retrieved May, 8, 2013.

4.2.2 I costi esterni dell'inquinamento globale

Per poter andare a valutare il costo esterno dell'inquinamento globale, anche in questo caso la procedura viene denominata Impact Pathway Approach e segue una serie di step consecutivi:

1. Primo punto, per ogni categoria di veicoli si individuano i chilometri percorsi.
2. Trovati i chilometri percorsi, questi si moltiplicano per il fattore di emissione di CO₂ (g/km), il quale varia a seconda della categoria che si sta considerando.
3. Si aggiunge un certo ammontare al valore precedente, dovuto al fatto che altri componenti, come per esempio N₂O e CH₄, contribuiscono al surriscaldamento globale. Per valutare l'impatto di questi si usa il *Global Warming Potential (GWP)*, definito in italiano come il Potenziale di Riscaldamento Globale, ed esprime "la misura con la quale la molecola di un certo gas contribuisce all'effetto serra; l'indice si basa su una scala relativa che confronta ogni gas con il biossido di carbonio, il cui GWP ha per definizione il valore 1."¹¹ Con questo tipo di metodologia quindi, rapportando tutto all'anidride carbonica, è sufficiente valutare il costo monetario di quest'ultima. Alcuni autori, però, ritengono questo procedimento non corretto. Watkiss (2005) calcola separatamente il costo per la CO₂ e il CH₄, e vede che il rapporto tra questi due non rappresenta il GWP del metano.
4. Una volta trovato l'ammontare totale di biossido di carbonio, si moltiplica per il fattore di costo esterno (€/tonn), stimando così il valore economico del danno dovuto all'effetto serra. La produzione di anidride carbonica però deriva dal consumo di carburante, ed infatti il costo esterno è espresso in €/Litro. È necessario trasformarlo in €/vkm (*euro/veicolo * chilometro*), usando i dati sul consumo medio di carburante.

L'approccio utilizzato nella stima dei costi è simile a quello presentato per l'inquinamento locale. Prima si valuta l'*impatto fisico* dovuto ai cambiamenti climatici, e poi lo si tramuta in *danno economico*.

La stima dei costi nel caso d'inquinamento globale richiede sicuramente modelli molto complessi e in alcune situazioni anch'essi risultano insoddisfacenti.

Per il costo relativo all'aumento del livello del mare si valutano i chilometri persi. Per l'impatto sull'agricoltura si stimano i costi o benefici generati su produttori o

¹¹ www.arpalombardia.it

consumatori, mentre per gli impatti quali i danni all'ecosistema e alla salute umana risulta più complesso fornire una stima.

Primo problema che si affronta è dovuto al fatto che si ha una bassa conoscenza dell'impatto fisico, non sapendo fornire una chiara relazione causale tra surriscaldamento globale e i fenomeni che si verificano. Inoltre, molti degli eventi con cui si ha a che fare, produrranno gli effetti in un orizzonte temporale a medio lungo termine e questo amplifica ancora di più l'incertezza delle stime.

Per questi motivi alcuni studi, come per esempio UNITE o ExternE, hanno preferito indicare il costo esterno generato come *avoidance cost* o *mitigation cost*. In questo caso il costo per l'inquinamento globale si determina andando a valutare l'opzione meno cara per portare le emissioni a un livello accettabile. Questo approccio sicuramente risulta più utile quando si vogliono attuare nuove *policy* per riportare il livello di emissioni ad un target prestabilito. Da un lato può essere più facile fornire delle stime per il *mitigation cost*, ma dall'altro stabilire il target corretto per il quale si considera accettabile il livello di CO₂ prodotta è molto complesso.

Questo approccio è stato utilizzato in diversi studi: primo tra tutti fu usato nel protocollo di Kyoto, poiché qui era posto un limite da dover raggiungere e quindi era facile, basandosi su tale limite, calcolare il costo. Dopo la fine del protocollo di Kyoto, si è cominciato a utilizzare un nuovo target, questa volta posto dalla *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, che ha fissato la soglia del riscaldamento globale a massimo 2°.

Altri invece hanno optato per seguire la prima strada, andando quindi a determinare i *damage cost*.

In questo tipo di stime si forniscono almeno altri due valori, uno superiore e uno inferiore, a seconda che si siano o meno considerati anche effetti e rischi a lungo termine. Alcuni preferiscono differenziare i costi anche in base all'*equity weights*. Con quest'ultimo termine si vuole indicare il peso che le diverse regioni hanno rispetto all'impatto complessivo. Sarebbe infatti necessario assegnare pesi diversi per ogni regione, cosa che però è molto complicata da stimare.

Confrontando i risultati circa l'utilizzo di questi due approcci, si può constatare come coloro che hanno optato per il *damage cost* sono giunti a conclusioni molto differenti tra loro; questo può essere attribuito appunto alla difficoltà nello stimare i costi generati.

Al contrario, l'approccio *avoidance cost* è più coerente, a patto che il target stabilito sia il medesimo.

Le ricerche più recenti considerano delle stime sistematicamente superiori del costo per grammo dell'anidride carbonica rispetto ai precedenti studi. Questo principalmente va attribuito al fatto che nelle versioni aggiornate si sono considerati più rischi, più effetti, e si è fatto uso di modelli più dettagliati.

Risultato

In base a tutte queste considerazioni si riportano i valori che verranno utilizzati per l'analisi sul caso di studio di Torino (*Tabella 4*). Essi sono espressi per ogni unità di CO₂ aggiuntiva emessa, espressi quindi come €/tonn.

Tabella 4: valori espressi in €/tonn di CO₂ suddivisi in valori mondiali e europei e classificati per i diversi anni di applicazione

ANNO DI APPLICAZIONE	VALORI MEDI MONDIALI	VALORI MEDI EUROPEI
2005	20	97
2015	25	122
2025	29	148
2035	27	137
2045	28	143
2055	40	196

Fonte: Delft, C. E., & Infras, F. I. (2011). External costs of transport in Europe. Update Study. Retrieved May, 8, 2013.

Alcune considerazioni sui dati sopra riportati:

- Per le stime più recenti si è adottata una logica di *avoidance cost*: infatti, finché in vigore, si è utilizzato come target quello stabilito dal protocollo di Kyoto, successivamente invece quello stabilito dalla Commissione UE che si è posta come obiettivo l'abbattimento dal 20 al 30 % rispetto al 1990. Potendo quindi stabilire dei limiti, è risultato più facile utilizzare questa logica.
- Per i valori a lungo termine invece si è optato per una logica a *damage cost*. Questa scelta prima di tutto è dettata dal fatto che non esistono obiettivi di *policy* posti a così lungo termine. Inoltre, gli studi negli ultimi tempi sono migliorati e hanno sottolineato un costo esterno più alto per la presenza di effetti non lineari e inaspettati nel lungo termine. Non avendo nessun tipo di target da utilizzare nel lungo termine, si opta per questo secondo approccio; si

fa una proiezione dei futuri business, ipotizzando anche trend in crescita per quei paesi in via di sviluppo che sicuramente produrranno un maggior quantitativo di anidride carbonica rispetto ad oggi, e in base a queste proiezioni si cerca di stimare il danno generato. Negli scenari futuri si ipotizza un aumento delle emissioni di CO₂.

- I valori dovrebbero essere considerati anche in questo caso differenti da regione a regione, anche perché i target e, quindi, i *mitigation cost*, sono differenti di luogo in luogo; quelli presentati precedentemente sono valori medi, validi come guida per l'intera Comunità Europea.

4.2.3 I costi esterni della congestione

La congestione può presentarsi in due situazioni diverse, a cui seguono di conseguenza anche modellazioni differenti. La *bottleneck congestion*, modellata per la prima volta da Vickrey (1963), descrive quella situazione in cui un gruppo d'individui desidera attraversare un determinato luogo nel medesimo momento. È data una specifica capacità del *bottleneck*, misurata come massimo flusso che può attraversare il nodo (*veicoli/ora*). L'istante di attraversamento desiderato è il medesimo e la capacità è limitata, perciò all'equilibrio si verifica una coda, crescente prima e poi gradualmente decrescente con lo scorrere del tempo. In questa condizione qualcuno, per evitare di dover aspettare troppo tempo in coda, deciderà di partire in anticipo o in ritardo. Altri invece supporteranno la coda, arrivando però puntuali. In entrambi i casi le persone subiscono un costo generato dall'essere in ritardo/anticipo o dal dover perdere del tempo in coda.

Il secondo tipo di modellazione rappresenta invece la *flow congestion*. Questa fu proposta per la prima volta da Pigou (1920) e rappresenta l'effetto del superamento della capacità di un collegamento stradale. Per studiare queste situazioni si ricorre a una serie di modelli che mettono in relazione la velocità con il flusso dei veicoli. Per la modellazione è necessario avere informazioni anche sulle strade che vanno a congiungersi, poiché esse influenzano le condizioni del collegamento che si sta studiando.

Di seguito, quindi, si analizzano i modi in cui poter andare a valutare il costo esterno generato sugli altri, così da quantificare il danno economico prodotto.

Anche in questo caso sono stati compiuti molti studi a riguardo: l'approccio base, però, utilizzato dalla maggior parte, è quello di andare a valutare il tempo perso tenendo conto delle caratteristiche flusso-velocità delle strade.

Il procedimento per stimare il *marginal congestion cost*, inteso come il cambiamento dei costi esterni su tutti i trasportatori quando un nuovo utente entra nel sistema, è il seguente:

1. Classificazione della strada: si determina il tipo di strada, che può essere urbana/metropolitana/interurbana, e si identifica il numero di corsie a disposizione. Le caratteristiche infatti influenzano molto il livello di congestione che si verifica.
2. Curve flusso-velocità: qui si va a stabilire la funzione flusso-velocità, che descrive la relazione che sussiste tra velocità media nella strada e flusso di macchine. Nelle strade urbane la coda spesso è causata dai *bottleneck* alle intersezioni. Esistono però modelli, come quelli di Newbery e Santos (2002) che per questioni di semplicità considerano le curve flusso velocità su un'area più ampia: questi sono un'ottima alternativa in termini di *cost efficient* perché, se pur perdono il dettaglio riguardante le singole strade e intersezioni, sono molto più semplici da implementare.
3. Valutazione del VOT. Diversi studi sono stati fatti riguardo alla valutazione del tempo perso. I valori essenziali per effettuarne una stima sono il modo di trasporto, la lunghezza e lo scopo del viaggio (lavoro, scuola, piacere, sport, ecc.), nonché anche caratteristiche personali del singolo individuo. Nelle stime fatte, si distingue sempre tra valore del tempo in condizioni di flusso libero e in situazione di congestione, in genere dal 50% al 150% superiori. Questo è infatti dovuto al fatto che si considerano anche gli effetti indesiderati di essere in coda, quali lo stress, l'aumento del consumo di carburante, ecc.
4. Calcolo del costo esterno marginale: in questo caso, una volta che si hanno i valori che derivano dal punto 3 e dal punto 4 è possibile calcolare il costo esterno marginale, inteso come il costo esterno che grava sugli altri automobilisti quando un nuovo soggetto si inserisce nel sistema. Di seguito si presenta la formula:

$$MEC(Q)_{CONG} = \frac{VOT \cdot Q}{v(Q)^2} \cdot \frac{\partial v(Q)}{\partial Q}$$

VOT: valore del tempo (€/veh · hour)

Q: livello di traffico corrente (veh/hour)

v(Q): funzione flusso-velocità (km/hour)

Risoluzione del problema: congestion fee

A questo punto, qualora lo scopo fosse quello d'individuare il costo esterno marginale, il processo finirebbe qui. Se però lo scopo fosse quello d'identificare la tariffa ottima da applicare per poter ottenere la massimizzazione del surplus collettivo, allora bisogna proseguire con i seguenti punti:

5. Stima dell'elasticità della domanda: in questo caso si vuole vedere come varia la domanda di trasporto in base alle diverse tariffe che vengono applicate. Si discuterà successivamente riguardo l'elasticità della domanda. Essa rappresenta la variazione della domanda, in questo caso di trasporto (intesa come numero di veicoli che transitano su quella specifica strada) rispetto ad un aumento del prezzo per quella strada. La relazione tra prezzo e domanda è mediamente inversamente proporzionale, perciò i valori di elasticità sono negativi. Qua è bene considerare che i diversi soggetti presenti in una strada congestionata reagiscono diversamente alle possibili tariffe, e queste differenze dipendono maggiormente dai motivi del viaggio, dalle alternative a disposizione, dalla densità del traffico, ecc. Ciò che si consiglia è di utilizzare stime locali, poiché si hanno condizioni diverse in ogni luogo; qualora non fosse possibile fornire una stima, i valori più frequenti vanno da -0,35 a -0,25.
6. Calcolo della tariffa ottima: è possibile, tramite modelli iterativi, calcolare la tariffa ottima, corrispondente al punto dove il beneficio totale viene massimizzato. Come è noto dalla teoria, il punto di ottimo è pari a quel livello dove il costo esterno marginale è pari alla *fee* da dover pagare.

Precedentemente si era identificato con MEC il costo marginale esterno, che rappresentava il costo che un automobilista in più generava sugli altri. Con MSCP (*marginal social congestion cost prices*) si vuole intendere sempre un costo esterno marginale, ma qui è inteso in una particolare condizione, ovvero quella che si genera dopo aver stabilito una tassa da pagare per l'accesso a quella strada: all'equilibrio, affinché si raggiunga una posizione efficiente la tassa è uguale al costo marginale, Recentemente, si sono modificate le terminologie, definendo *Market Marginal Congestion Cost (MMCC)* la quantificazione dei costi esterni in condizioni di equilibrio senza aver preso alcuna azione correttiva; con *Efficient Marginal Congestion Cost (EMCC)* invece, si indicano i costi esterni marginali nella situazione in cui è stata messa in atto un'allocazione efficiente tramite l'utilizzo di una *congestion charge*.

Uno degli errori più comuni è quello di utilizzare i MMCC e non gli EMCC per stabilire la tassa ottima da imporre. Questo è sbagliato, in quanto la tassa porterà a una modifica delle abitudini mutando la condizione di equilibrio; è in base al cambiamento stimato che si deve valutare il livello di tariffa da imporre.

Diversi studi sono stati compiuti per trovare la EMCC. Di seguito sono stati riportati i valori per diverse località (*Figura 5*): da questo grafico si evince come la grandezza della città, che può essere valutata tramite il numero di abitanti, non è una caratteristica significativa che va a influenzare il valore dell'EMCC

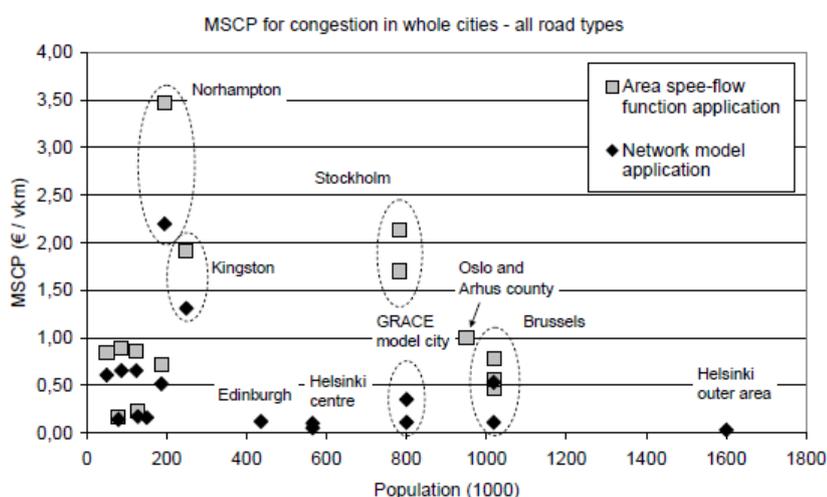


Figura 5: MSCP in aree urbane in base ai valori tratti da differenti studi

Fonte: Compilation to €2,000/vkm using UNITE, 2002c; TRENEN-II-STRAN, 1999; GRACE, 2006a; Newbery and Santos, 2002; Prud'home and Kopp, 2006. MC-ICAM, 2004.

Analizzando i risultati ottenuti nei tanti modelli, diversi in base ai valori delle variabili utilizzate, si può constatare comunque che in media la quantità, ovvero il numero di veicoli che transitano nella strada congestionata, è diminuita di circa il 50% dopo l'applicazione della tassa.

Per ciò che riguarda le stime effettuate, è importante sottolineare che sono richiesti una serie di studi e assunzioni sui parametri in gioco, che possono ledere la correttezza dei risultati; in particolare, le variabili difficili da valutare sono:

- Il valore del tempo (VOT) che richiede di tradurre il tempo perso nonché la riduzione di affidabilità in termini monetari. Su questo esistono una serie di studi che hanno fornito dei valori attendibili (UNITE, HEATCO, INFRAS/IWW).

- Funzione flusso-velocità, che descrive l'effetto di una auto immessa in più sul sistema di trasporto totale, essenziale poi per la stima del costo esterno generato. Tale funzione dipende dalle caratteristiche delle infrastrutture, condizioni meteo, alternative di viaggio, regolamentazioni (controllo velocità, ecc.) e dalle abitudini degli automobilisti. È raccomandato l'utilizzo di stime locali; in mancanza di queste, può essere utilizzata la "EWS curve" stimata dalla "Recommendations for the Economic Appraisal of Roads" come punto di partenza, in quanto si è utilizzato un ricco campione per calibrarla. Si hanno però delle difficoltà nel comprendere l'andamento di questa funzione quando il flusso di veicoli raggiunge la capacità della strada: qui, infatti, l'aggiunta di un ulteriore veicolo può causare sia un aumento che una riduzione del flusso di veicoli. Il criterio tradizionale prevedeva infatti un approccio deterministico per la stima della relazione che sussiste tra velocità e flusso, mentre le teorie moderne stanno optando per un approccio stocastico. Nella stima della tassa comunque, una regola qualitativa è quella di mantenersi sempre al di sotto del livello di capacità, preso come limite.
- Elasticità della domanda, che ha invece lo scopo di valutare la reazione degli utilizzatori a seguito dell'imposizione di una tassa. Anche qui la raccomandazione è di utilizzare variabili locali, poiché l'elasticità dipende da parametri quali il tipo di trasporto scelto, il momento in cui si effettua, la destinazione, il motivo, il reddito, ecc. La precisione e la bontà del modello dipendono molto dai parametri che sono stati utilizzati per catturarne l'elasticità.

Di seguito vengono riportati i valori di EMCC che verranno impiegati nelle valutazioni successive (*Tabella 5*). Essi sono stati calibrati direttamente per l'Italia e sono suddivisi in base al tipo di strada e alla condizione di congestione in cui ci si trova.

Tabella 5: EMCC, espressi in €/vkm (centesimi di euro su veicolo per chilometro) per le diverse tipologie di strada e le diverse condizioni di congestione

REGIONE	TIPO DI STRADA	Free flow	Near capacity	Over capacity
METROP	AUTOSTRADA	0,0	26,8	61,5
	STRADA PRINCIPALE	0,9	141,3	181,3
	ALTRE STRADE	2,5	159,5	242,6
URBANA	STRADA PRINCIPALE	0,6	48,7	75,8
	ALTRE STRADE	2,5	139,4	230,5
RURALE	AUTOSTRADA	0,0	13,4	30,8
	STRADA PRINCIPALE	0,4	18,3	60,7
	ALTRE STRADE	0,2	42,0	139,2

Fonte: Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., ... & Cox, V. (2014). Update of the handbook on external costs of transport: final report for the European Commission: DG-MOVE.

5. Road Pricing

Una delle possibili metodologie per l'internalizzazione delle esternalità è il *Road Pricing*: questo consiste in un'iniziativa messa in atto da diverse città dove viene imposta una tassa per l'utilizzo di una determinata infrastruttura stradale; lo scopo è modificare le abitudini degli automobilisti così da raggiungere obiettivi prefissati.

I fondi che derivano dall'imposizione di una tariffa vengono poi utilizzati per diversi scopi; Se essi sono destinati alla manutenzione e al miglioramento delle strade, si ha coincidenza tra coloro che pagano e coloro che ne beneficiano; diverso è invece quando essi sono utilizzati per il trasporto pubblico. Quest'ultimo caso si verifica quando si vuole incentivare l'utilizzo dei mezzi pubblici a discapito di quelli privati.

In altri casi, invece, i finanziamenti vanno a vantaggio degli automobilisti, in quanto usati per il miglioramento e la manutenzione delle strade.

È bene sottolineare ancora una volta come la scelta di una tariffazione ottima non è definitiva, ma è necessario un monitoraggio continuo. Prefissando un target, infatti, si valuta se tale obiettivo sia stato raggiunto e, qualora così non fosse, si aggiorna la tassa.

Le valutazioni per la tariffa ottima dipendono da variabili difficilmente prevedibili *ex ante*: l'elasticità della domanda, come anche la scelta del modo di trasporto, sono alcuni degli aspetti la cui stima può essere molto diversa da quella che si misura *ex post*. Solo attraverso una valutazione successiva, si possono ottenere dei valori maggiormente attendibili. Sulla scelta delle variabili da monitorare, esistono in letteratura una serie di indicatori che possono aiutare a riconoscere i benefici di tale iniziativa; in particolare, Curacao Project (2009) propone i seguenti indicatori: efficienza, equità, ambiente, schema finanziario, sicurezza, salute, vivibilità e uso del suolo. Essi sono tutti aspetti da tenere in considerazione.

5.1 Tipologie di Road Pricing

Tra le diverse scelte di *policy* che possono essere intraprese, è importante sottolineare come ciò che cambia da una all'altra è l'obiettivo che ci si pone. Al variare di quest'ultimo, infatti, si andrà a colpire una precisa classe di automobilisti, stimolando in loro un comportamento diverso e più efficiente per la comunità intera.

Una prima differenza che si incontra riguarda l'applicazione della tassa. Le possibili varianti sono:

- *Road Toll*: in questo caso la tassa viene imposta su determinati tratti della rete stradale, come anche tunnel e ponti. Il flusso di cassa che si genera viene successivamente impiegato per il miglioramento del servizio offerto. Una variante, che rientra sempre in questo primo gruppo consiste negli *High Occupancy Tolls*, ovvero corsie a pagamento per i veicoli a “bassa occupazione”, mentre gratuite se si viaggia in 2 o più persone. Con questa tipologia, si cerca d’incentivare la condivisione del mezzo, riducendo quindi il numero di veicoli sulla strada. Spesso accanto alla *High Occupancy Toll*, vi è la corsia gratuita per tutti. Quest’ultima è più congestionata e richiede un tempo di percorrenza maggiore, di conseguenza costi superiori¹². Qualora lo svantaggio che ne deriva optando per questa strada sia inferiore alla tassa da dover versare per usufruire della corsia a pagamento, allora l’automobilista opterà per questa. È una regolamentazione meno pervasiva di altre, in quanto si lascia all’individuo stesso la facoltà di scegliere.
- *Cordon Toll*: in questo caso si designa un cordone della città, ovvero un’area circoscritta, entro la quale è richiesto il pagamento. Questo tipo di applicazione viene usata principalmente nelle zone dove vi è un’elevata congestione nel centro urbano. Si opta per un pagamento all’ingresso, lasciando, quindi, a coloro che si muovono all’interno del cordone il beneficio di transitare gratuitamente, oppure si prevede una *fee* anche per gli spostamenti interni.

Una seconda divisione che può essere fatta è in base al profilo tariffario prescelto. Spesso, per questioni di semplicità, si opta per un’imposta *flat*. In altri casi, invece, si preferiscono delle tariffazioni che variano in base alle diverse categorie interessate (*Price Discrimination*). Le prime due categorie che vengono di seguito presentate hanno lo scopo di colpire le principali esternalità precedentemente studiate. La terza invece è una nuova modalità che può essere impiegata solo tramite l’utilizzo di più moderne tecnologie di rilevazione.

Le diverse tipologie sono:

- *Congestion pricing*: qui il profilo tariffario dipende dal livello del traffico. La soluzione efficiente imporrebbe una tariffa pari al livello di traffico presente in quel momento: tale modalità, per questioni di complessità, viene difficilmente perseguita, ragion per cui si opta per una discriminazione più semplificata. Si tende a far variare la tariffa in base alle

¹² Si è visto nel Capitolo 4 come valutare il tempo in termini monetari.

fasce orarie, dividendole tra più e meno congestionate. In secondo luogo si tiene conto del periodo dell'anno, poiché il livello di traffico dipende anche da questo. L'imposizione di un prezzo discriminato ha come scopo quello d'incentivare l'utilizzo della strada in fasce orarie e periodi meno congestionati, così da rendere il flusso di traffico più costante e, quindi, efficiente. Inoltre, in linea generale, una tassa porta a una riduzione del flusso totale di individui, poiché l'elasticità del numero di veicoli al variare del prezzo è mediamente negativa.

- *Pollution pricing*: qui la discriminazione viene fatta in base alla categoria del veicolo, valutando quindi per ogni gruppo il quantitativo di emissioni. In questo caso la riduzione dell'inquinamento è lo scopo primario: il fine è, perciò, quello di incentivare l'utilizzo di automobili meno inquinanti. In alcuni casi si è optato per un'applicazione di questo tipo. Altre città, però, hanno preferito applicare una *congestion charging*, poiché questa porta a una riduzione del traffico e, di conseguenza, anche a una diminuzione delle emissioni.
- *Distance-based pricing*: in questo tipo di tariffazione l'importo è pari alla distanza percorsa. Questa modalità può essere applicata a un'area circoscritta o anche senza limitazioni. Si è visto come, parlando di bollo auto, la tassa ottima avrebbe come parametro la distanza percorsa. È infatti nato negli ultimi anni un dibattito, noto come PAYD (*pay as you drive*), in cui l'idea è di far pagare agli automobilisti imposte dipendenti dai chilometri percorsi, i quali rappresentano la variabile di maggior impatto nella generazione di esternalità. I costi imposti alla collettività vengono attribuiti direttamente a chi li genera, innescando, di conseguenza, un processo efficiente, poiché questo tipo di tariffazione provoca una riduzione di domanda di mobilità e un utilizzo di mezzi alternativi (trasporto pubblico). Il problema principale di questa tariffazione risiede nella complessità d'implementazione: avere un rilevatore dei chilometri percorsi per ogni autovettura richiede sicuramente uso di tecnologie innovative e, tutt'oggi, i costi per usufruirne sono maggiori dei ricavi che ne deriverebbero.

5.2 Effetti del Road Pricing

In prima analisi, gli effetti causati dal *Road Pricing* riguardano le due principali esternalità, ossia la congestione e l'inquinamento. In questo caso, infatti, una qualsiasi delle diverse tipologie porta a una riduzione di tali esternalità; a seconda della scelta fatta, una delle due verrà ridotta maggiormente. Gli effetti, però, sono molteplici, e per alcuni di questi l'impatto ha segno ambiguo (Small et al., 2007). In letteratura si ritrovano diverse stime; le principali conseguenze sono:

- Congestione sul sistema di trasporti in tutta l'area urbana: questo tipo d'impatto si verifica principalmente quando si opta per una *cordon toll*. In questo caso alcuni individui, anziché pagare per l'attraversamento del cordone, cambieranno il loro percorso, evitando le zone a pagamento. Di conseguenza il rischio è che si crei congestione in aree fuori dal cordone. Un secondo effetto, invece, si genera sui mezzi di trasporto pubblico: una politica di *Road Pricing*, infatti, porterà alcuni soggetti a cambiare la loro modalità di trasporto, ricorrendo ai mezzi pubblici. Su questi, di conseguenza è bene considerare la capacità del servizio pubblico e valutare se un aumento degli utenti creerebbe problemi a tale sistema.
- Effetti sulle infrastrutture: i costi di manutenzione e gestione delle infrastrutture stradali dipendono dai volumi di traffico. Una nuova regolamentazione, perciò, porta a una modifica di tali costi, in aumento o in diminuzione a seconda della maggiore o minore intensità del traffico in una zona¹³.
- Effetti sulle attività commerciali: questo è uno degli aspetti di cui tener conto quando si vuole progettare una nuova *policy*. I principali impatti riguardano le attività situate all'interno dell'area oggetto di limitazione, ma anche le attività all'esterno ne risentono, soprattutto se tale politica ha un forte impatto sul comportamento degli individui. In questo caso è difficile stabilire il segno di questi effetti: in prima analisi, infatti, si tende a dire che, a causa di una diminuzione del traffico, i negozi vedranno diminuire il volume delle proprie vendite, poiché alcuni individui rinunceranno ad accedere alla zona oggetto di tassazione. Si deve però considerare che molti individui cambieranno solo mezzo di trasporto e non rinunceranno ad entrarvi.

¹³ Le zone interne al cordone subiranno una diminuzione del traffico di autovetture, quelle esterne un aumento.

In aggiunta si è sempre considerata un'elasticità della domanda negativa. Per specifiche categorie d'individui, però, tale affermazione non è veritiera: queste infatti trarranno vantaggio dalla tassazione, poiché il beneficio che ne ricavano (minor inquinamento, minor congestione, ecc..) è superiore alla tassa da pagare. I soggetti in questione saranno incentivati a entrare nella zona a pagamento, avendo un'elasticità negativa¹⁴. I negozi che forniscono prodotti che interessano a questa specifica categoria, trarranno dei vantaggi.

- Effetti sui valori immobiliari: in letteratura si è analizzato come l'introduzione del *Road Pricing* possa avere degli effetti anche sul valore immobiliare della zona interessata. In particolare (vedi ad esempio per il caso milanese Percoco, 2014a) alcuni hanno visto come l'effetto è un rialzo del valore. Questo perché le zone interessate saranno soggette a minor congestione e inquinamento, portando a dei benefici per coloro che ci vivono. Si deve però tenere in considerazione anche il tipo di politica scelta e la classe di individui che viene colpita da tassazione: se infatti l'imposta colpisce anche gli abitanti della zona interessata, questo avrà plausibilmente un impatto negativo sul valore degli immobili.
- Effetto distributivo: il *Road Pricing*, come qualsiasi politica pubblica, porta a uno spostamento di benessere tra diverse categorie d'individui. In *primis*, ipotizzando una tariffa *flat*, si generano effetti diversi a seconda della categoria colpita, in quanto i cittadini meno abbienti saranno colpiti maggiormente dalla tassa imposta. In secondo luogo, come già analizzato, si hanno impatti diversi in base alla locazione delle attività commerciali, essendo alcune all'interno e altre all'esterno del cordone. È bene quindi valutare in maniera accurata questi effetti e pianificare interventi futuri con lo scopo di migliorare il benessere dei cittadini più colpiti dalla regolamentazione.

5.3 Esperienze internazionali

Da decenni il *Road Pricing* è ormai pratica comune in molte parti del mondo. All'inizio vi era una certa resistenza da parte delle forze politiche, ma gli studi teorici compiuti hanno dimostrato come tale regolamentazione fosse un'efficace soluzione alla congestione e ai problemi collegati (City of Stockholm, 2006).

¹⁴ In letteratura, i beni con elasticità negativa vengono definiti beni di Giffen.

Le differenze tra le diverse città dipendono sia dalla morfologia urbana che dagli obiettivi posti.

5.3.1 Oslo, Singapore, Londra, Stoccolma, Milano

Oslo

Oslo rappresenta uno dei primi esempi di applicazione del *cordon pricing*. Lo scopo iniziale era principalmente la raccolta di fondi, ma col tempo ci si è accorti dei benefici che ne derivavano e, quindi, si sono aggiornati gli obiettivi in modo da porsi anche dei target ambientali e di traffico. Inizialmente si instaurò una tariffa fissa per tutte le 24 ore; successivamente ciò è stato modificato e si è deciso di fare discriminazione sia in base al momento della giornata (momento di picco e non), sia in base alla categoria del veicolo. Le auto elettriche sono esenti dal pagamento, mentre le diesel hanno l'imposta maggiore. La soluzione scelta è, quindi, un ibrido: una *congestion-pollution charge*.

L'area prescelta non percorre l'intero confine della città: questo perché non si voleva far credere che tale normativa servisse per finanziare i miglioramenti di Oslo ai danni delle comunità adiacenti. Allo stesso modo, però, non si è optato per un'area limitata, poiché in questo caso sarebbe stato necessario un investimento troppo oneroso. Si evince, perciò, come molti sono gli aspetti da valutare in sede di attuazione, in *primis* l'opinione pubblica e i costi per il progetto.

Singapore

Anche Singapore costituisce uno dei primi esempi di applicazione del *Road Pricing*. In questo caso le motivazioni sono nate dopo la crescita esponenziale di questa città. Lo spazio a disposizione era poco e, di conseguenza, il traffico andava a costituire un serio problema. Si è avviata, dunque, una politica di *Road Pricing*, facendo non solo pagare l'accesso al centro della città, ma anche a strade e autostrade attorno a Singapore.

Lo scopo, infatti, era incentivare l'uso del trasporto pubblico, molto sviluppato ed efficiente. Lo schema tariffario era basato su una tassa variabile a seconda della fascia oraria, la quale si aggiorna trimestralmente in modo da rispettare precisi target di velocità¹⁵. Tale tariffa dipende, oltre che dalla fascia oraria, anche dal luogo e dal tipo di veicolo, quest'ultimo in base allo spazio che occupa sulla strada. L'uso di una tecnologia di questo tipo è permesso grazie all'implementazione dell'ERP (*Electronic*

¹⁵ Si è visto nel Capitolo 2 come variando la tassa si va a variare la domanda di traffico e, quindi, la velocità di percorrenza. Si cerca di calibrare tale tassa in modo da raggiungere il target prestabilito.

Road Pricing), un sistema che richiede *smartcard* posizionate sulle autovetture stesse e che segnalano il credito restante. Dopo ogni passaggio sotto gli appositi varchi viene decurtata la cifra corrispondente.

A Singapore si sta, inoltre, studiando una nuova possibile modalità di pagamento, che potrà entrare in vigore dopo il 2020¹⁶, definita ERP 2.0. Il pagamento non avverrà a seguito del passaggio sotto il varco, ma dipenderà direttamente dalla distanza percorsa: ciò è permesso grazie all'uso di tecnologie di navigazione satellitare, adottando, dunque, un *distance-based pricing*.

Londra

La prima applicazione venne fatta nel 2003, a cui seguì una revisione sul prezzo tariffario nel 2005, poi nel 2011 e infine nel 2014. Anche in questo caso si è optato per un *cordon toll*. Tale realizzazione è avvenuta a causa di ingenti livelli di congestione nella capitale inglese; inoltre, i guadagni derivati sarebbero serviti per poter finanziare gli investimenti nel settore dei trasporti. Lo schema prevede il pagamento non solo per l'ingresso, ma anche per tutti i viaggi all'interno dell'area. In tal modo si disincentivano anche i movimenti interni al cordone. Dopo la prima applicazione si proseguì iterativamente con una fase di aggiornamento dell'imposta, si valutarono i risultati ottenuti e si cercò di aggiornare la tariffa per avvicinarsi maggiormente al target prefissato. L'aumento della tassa servì per diminuire ulteriormente i volumi di traffico, ritenuti ancora eccessivamente alti. Inoltre, col tempo le abitudini dei consumatori si sono modificate, cambiando l'elasticità della domanda di questi, ragion per cui spesso un aggiornamento può ripristinare le condizioni di efficienza¹⁷.

A Londra la *congestion charge* è attiva solamente nella fascia centrale del giorno e sono esclusi i week-end e i giorni festivi. Il risultato è stato quello sperato: Londra ha diminuito i volumi di traffico e le zone "liberate" sono state utilizzate per finanziare opere pubbliche quali piste ciclabili, aree pedonali e trasporti pubblici.

Stoccolma

Anche a Stoccolma si è deciso di attuare una *cordon toll*, ma si è optato per una politica molto più stringente: si richiede, infatti, il pagamento per ogni attraversamento del cordone in ambedue le direzioni. Questo ha un effetto ancora maggiore sulla riduzione del traffico. Le tariffe variano in base al momento della giornata, la quale è divisa in

¹⁶ <https://www.straitstimes.com/singapore/transport/electronic-road-pricing-turns-20-in-april-notable-milestones-over-the-years>

¹⁷ Su questo infatti molti studi hanno sottolineato come vi sia una differenza tra elasticità della domanda a medio e a lungo termine

tre categorie: fascia di punta, fascia intermedia e fascia di “morbida”, per un totale di 12 ore di attivazione. Poiché si paga ogni attraversamento, vi è una tariffa massima per giornata. Venne sperimentata l’applicazione dello schema e in seguito a un referendum, nel quale prevalsero i voti favorevoli, lo si applicò. All’inizio le “clean cars” vennero escluse dal pagamento. Successivamente, però, vennero incluse anche quest’ultime. Il motivo risiedeva nella congestione che andavano a creare ugualmente, seppur non producessero inquinamento.

Milano

La prima applicazione di *Road Pricing* a Milano fu definita *Ecopass*, il che sottolinea il principale problema che si voleva risolvere con questo nuovo schema, l’inquinamento; quest’ultimo era molto presente a causa delle condizioni geoclimatiche avverse che rendono difficoltosa la dispersione del particolato. La scelta effettuata da Milano rientra, perciò, nella fattispecie della *pollution charge*. Venne riscontrato che il traffico era il maggior responsabile dell’inquinamento; si definì, per questo motivo, uno schema tariffario in grado di classificare i pagamenti in base alle emissioni delle diverse autovetture¹⁸. Per alcune l’ingresso era gratuito, mentre per altre, come le diesel euro 0, il prezzo era massimo, 10 euro. Ai residenti era concesso uno sconto e l’orario di applicazione era tra le 7:30 del mattino e le 7:30 del pomeriggio, dal lunedì al venerdì. A seguito dell’applicazione, si registrò un calo sia della congestione che dell’inquinamento, grazie alla riduzione del numero di veicoli e alla sostituzione di quelli molto inquinanti. A lungo andare il problema che si riscontrò è che molti automobilisti, avendo ridotto la tassa da pagare a seguito di un nuovo veicolo più ecologico, erano più incentivati a entrare, perciò l’impatto sulla congestione cominciò a decrescere mano a mano. Si propose un referendum, nel quale si chiedeva se si era d’accordo nell’espandere il pagamento a tutte le categorie di veicoli: i fondi raccolti sarebbero stati utilizzati per promuovere una mobilità sostenibile. Prevalsero i voti favorevoli, perciò l’*Ecopass* fu sostituita dalla nuova *Area C*, e qui non vi era più discriminazione basata sulle emissioni. Si decise, però, di vietare l’ingresso ai veicoli più vecchi e inquinanti. Le conseguenze di entrambe le iniziative, *Ecopass* e *Area C*, furono una riduzione del traffico, aumento della velocità del trasporto pubblico e miglioramento della qualità dell’aria. L’*Area C*, identificabile ora

¹⁸ In particolare, la classificazione era fatta sulla base delle emissioni di PM₁₀, l’inquinante che creava maggiormente problemi.

come una vera e propria *congestion charge*, portò a una diminuzione maggiore dei volumi di traffico rispetto alla precedente *pollution charge*.

5.3.2 Confronto dei diversi schemi

Come si è visto, le applicazioni possono essere diverse, in base alle motivazioni perseguite. In particolare, Milano, nella sua fase precedente, è stata l'unica ad aver avuto come scopo iniziale la riduzione dell'inquinamento. Ci si è accorti però, in un secondo momento, che la riduzione di congestione non era così marcata come in altre applicazioni, perciò anche in questo caso si è passati a una *congestion charge*. Si è abbandonata una differenziazione per categoria, optando per una tariffa *flat*. L'uso di una tariffa uniforme, a Milano come anche a Londra e Oslo nella sua prima fase, ha lo svantaggio di ridurre i volumi maggiormente nelle ore di "morbida" e meno in quelle di punta. Questo perché le ore di punta sono le più "interessanti" per gli automobilisti e per poter disincentivare l'uso dell'autovettura serve una tariffa superiore. Ragionando, invece, da un punto di vista economico, all'aumentare del traffico i costi marginali sociali di congestione che il singolo genera sugli altri soggetti sono superiori, e quindi, per internalizzare i costi, bisogna imporre una tariffa superiore. Secondo questo principio hanno operato sia Singapore che Stoccolma. Uno degli aspetti negativi di questa seconda opzione è l'instaurarsi di un incentivo maggiore a spostarsi nei momenti in cui la tassa è inferiore. Ciò in realtà riduce la congestione, a patto che le ore di "morbida" non diventino congestionate, ma incentiva di meno al cambiamento modale (trasporto pubblico). Se si vuole ottenere principalmente una riduzione delle emissioni, la discriminazione temporale è meno efficace.

Si evince, inoltre, come alcuni paesi abbiano optato per una tassazione a seguito del primo ingresso nella giornata, altri tassino tutti gli attraversamenti in entrata e uscita dal cordone, e altri ancora tassino il primo ingresso o il primo spostamento all'interno dell'area delimitata. Queste differenze portano a incentivi diversi: nel primo caso infatti si riducono il numero di veicoli entranti, ma si lascia liberamente la possibilità di muoversi all'interno. Tali spostamenti, seppur generano congestione, non sono soggetti a pagamento, quindi in ottica d'internalizzazione si crea una situazione inefficiente. Tassare, perciò, anche gli spostamenti riduce sia i veicoli entranti sia quelli circolanti. Nell'ultimo caso, infine, si tassano tutti gli attraversamenti del cordone. Anche in questo caso non si toccano gli spostamenti interni, ma al contrario di prima si fornisce un ulteriore incentivo: si riducono infatti il numero di viaggi per ogni veicolo. Con questo schema alcuni soggetti sono portati a non prendere la

macchina e altri sono portati a ridurre il numero di viaggi e quindi i chilometri che si percorrono. In ottica di congestione e inquinamento, ciò che conta non sono tanto il numero di veicoli transitanti, quanto il numero di viaggi e chilometri che essi effettuano.

Un'ultima differenza riguarda gli orari di attivazione del *Road Pricing*. Alcuni hanno optato per un orario ridotto, altri per l'intera giornata. Il prolungamento a tutta la giornata ha lo scopo di colpire più persone. Le prime e le ultime ore della giornata, però, non sono spesso congestionate, perciò si rischia che debbano subire la tassa anche coloro che non contribuiscono a generare traffico: questo in ottica di esternalità può contribuire a un risultato poco efficiente e sicuramente non equo, a maggior ragione nel caso in cui la tassa sia unica per l'intera giornata. Inoltre, qualora la tassa fosse attiva per le 24 ore, è bene che la città sia dotata di mezzi di trasporto pubblici per tutto l'arco della giornata. Se così non fosse, si taglierebbe fuori dalla città una fetta di popolazione, non potendo nemmeno ricorrere al trasporto pubblico.

In conclusione, come si è visto, non esiste un'unica soluzione. Ogni situazione va analizzata da sé, valutando il contesto attuale e i possibili cambiamenti riguardanti le scelte degli individui. I principali fattori da valutare sono l'elasticità della domanda di trasporto su autovetture al variare della tassa, ma anche l'elasticità incrociata della domanda di trasporto pubblico. Parte dei soggetti infatti passeranno al trasporto pubblico. Infine, si deve considerare anche la modifica dei percorsi, in quanto si creerà traffico nel perimetro del cordone. Non da ultimo, bisogna valutare l'equità della soluzione scelta, in modo da non generare disparità troppo stringenti.

6. Caso studio di Torino

Attualmente, a Torino è presente una zona a traffico limitato, attiva in una fascia oraria stabilita. Lo scopo dello studio di fattibilità condotto è quello di valutare i benefici di una possibile applicazione del *Road Pricing* a Torino. In tale contesto, ci si concentrerà sull'ambito delle esternalità, valutando la situazione attuale, i danni in termini monetari e le possibili alternative a disposizione. Alcuni temi, che in uno studio completo devono sicuramente essere presi in esame, verranno tralasciati.

6.1 Evoluzione della Z.T.L.

A Torino esiste già una forma di regolamentazione che limita il traffico dei veicoli in un'area circoscritta, definita *Zona a Traffico Limitato*.

La prima applicazione della Z.T.L. si ebbe nel 1994. Vennero stabiliti i confini (1,03km²) e le ore di attivazione, quest'ultime rimaste fino a oggi immutate (7:30-10:30 dal lunedì al venerdì). Successivamente alla prima implementazione si posero delle telecamere negli ingressi principali della città per rendere il controllo più efficace. Quest'ultimo viene effettuato solo nei punti di ingresso, perciò si può liberamente uscire e circolare all'interno della Z.T.L. anche nelle ore di attivazione. Col tempo i varchi monitorati aumentarono ulteriormente, e tutt'oggi quasi la totalità delle strade in ingresso sono fornite di telecamera.

La restrizione messa qui in atto aveva lo scopo di limitare gli ingressi di autovetture nelle ore di punta mattutine, in modo da diminuire il numero di veicoli in ingresso e, quindi, la congestione.

In seguito, però, per contrastare l'inquinamento atmosferico, nel 2004 venne introdotta una nuova limitazione; si delimitò un'area più ampia rispetto alla precedente, definita Z.T.L. ambientale, all'interno della quale era attivo il divieto di transito per i veicoli precedenti agli Euro 3, dalle 7:00 alle 19:00.

Tale vincolo si inserisce in un disegno più ampio, dove il filo conduttore è limitare l'uso di veicoli ad alte emissioni: in aggiunta, infatti, nel 2010 si è inserito il divieto in tutta l'area urbana per i veicoli diesel Euro 0,1,2 con più di 10 anni e benzina euro 0 dalle 8:00 alle 19:00.

Tali restrizioni, unite ad una serie di iniziative che avevano lo scopo di incentivare l'uso di mezzi pubblici e forme di mobilità alternative, hanno portato sia a una diminuzione dell'inquinamento che della congestione.

Nel 2010 vennero allargati i confini, i quali coincisero con il perimetro della Z.T.L. ambientale. Si passò, quindi, da un'estensione di 1,03 km² a circa 2,58 km².

Oggi, gli orari di attivazione della Z.T.L. sono rimasti immutati, ma i varchi di controllo posti sul confine sono 27. All'interno, sono situate ulteriori 11 telecamere, che controllano principalmente il transito nelle strade adibite al trasporto pubblico. In suddette strade, infatti, è vietato il transito di autovetture dalle 7:00 alle 20:00 tutti i giorni, compresi i festivi.

Esistono, però, una serie di categorie a cui è concesso l'ingresso anche nelle aree di attivazione della Z.T.L. Alcune classi di individui possono accedervi gratuitamente, altre possono versando un compenso e altre ancora hanno il diritto, gratuito o tramite compenso, di entrarvi e parcheggiare.

In particolare, in tema di inquinamento, la Giunta Comunale ha deciso di rilasciare fino al 27 giugno 2019 un permesso gratuito di circolazione per i veicoli elettrici puri, senza alcun vincolo di immatricolazione e di residenza¹⁹. In aggiunta, per i residenti e le società presenti nella zona delimitata, è concesso uno sconto sul permesso di circolazione qualora posseggano delle auto ibride/elettriche o bifuel uguali o superiori all'Euro 3. Queste iniziative hanno lo scopo di incentivare l'uso di auto ecologiche, anche considerando le nuove norme restrittive imposte dalla Comunità Europea in tema di emissioni.

6.2 Ingressi in Z.T.L.

Non si hanno dati a disposizione riguardanti gli ingressi antecedenti al 1994, momento in cui entrò in vigore la Z.T.L. È noto che si è assistito a una diminuzione di questi, in quanto per alcuni non è possibile l'accesso e per altri solo tramite compenso.

Prima di procedere con le stime riguardanti le esternalità, si fa un'analisi degli ingressi attuali, così da poter valutare se la restrizione vigente fornisce già un incentivo corretto alla riduzione di inquinamento e congestione.

¹⁹ <http://www.comune.torino.it/trasporti/ztl/>

In prima analisi, si vanno a rappresentare gli ingressi totali. Tali dati comprendono tutte le categorie di veicoli senza alcuna differenziazione. Tramite un incrocio coi dati riguardanti i permessi, si è potuto valutare la percentuale di autobus presenti sul totale degli ingressi, andando a stornare tale valore per avere solamente gli ingressi di mezzi propri²⁰. Di seguito si presentano, quindi, i dati raccolti, suddivisi in ingressi mezzi privati e mezzi pubblici. Si è presa la media degli ingressi nei giorni feriali del 2018 (gennaio, febbraio, marzo, aprile), in modo da avere dati medi aggiornati. La suddivisione temporale è ogni 30 minuti: tale scelta è stata fatta per poter evidenziare il traffico a inizio e fine Z.T.L., ma allo stesso tempo non rendere i dati troppo dispersivi.

Nella figura seguente si rappresentano i dati raccolti (*Figura 6*). Gli ingressi medi totali risultano essere 92.590, di cui 89.908 mezzi privati e 2.682 mezzi pubblici. Si era misurato, infatti, che il 2,90 % degli ingressi totali avevano un permesso riservato al trasporto pubblico. Nell' *Appendice B* sono riportati i dati che fanno riferimento a tale grafico. Qui è presente anche una rappresentazione degli ingressi nei diversi mesi del 2018. Grazie a tale analisi si è potuto constatare che l'andamento nei diversi mesi dell'anno è il medesimo, ciò che varia sono il numero totale di ingressi, soggetto a stagionalità a causa delle festività presenti durante l'anno.

²⁰ Per problemi di privacy, si è potuto avere i dati relativi ai permessi per un solo giorno, il 17 Maggio 2018. Di conseguenza, si è estratta la percentuale di autobus presenti sul totale e si è utilizzato tale valore sugli ingressi totali.

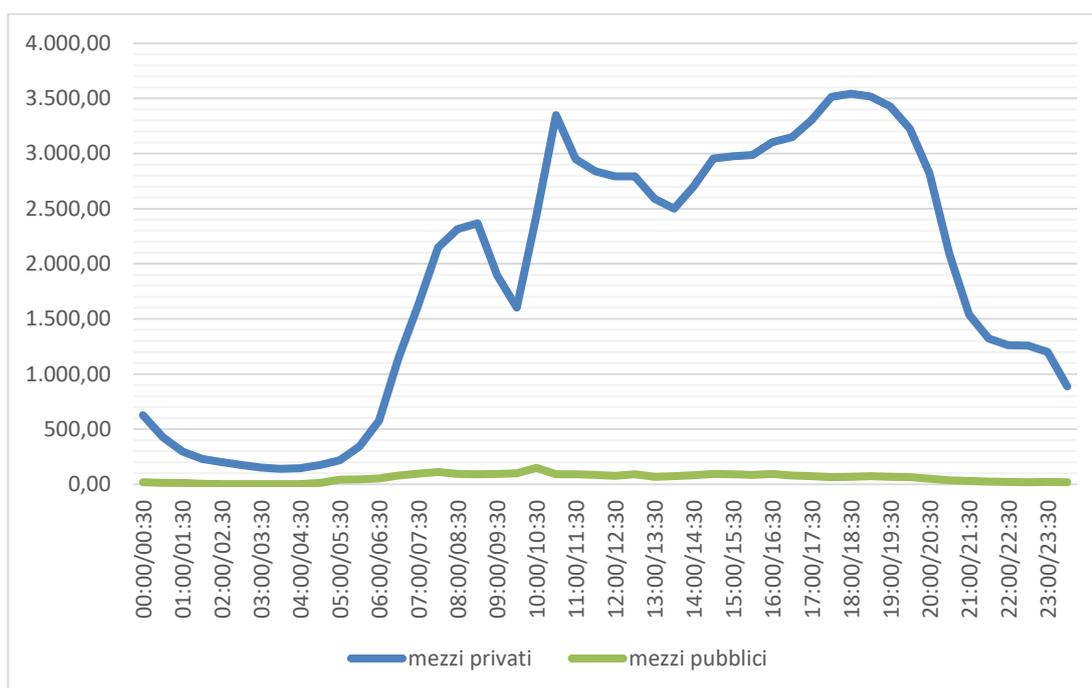


Figura 6: Ingressi medi 2018, espressi come veicoli/mezz'ora, divisi in mezzi pubblici e mezzi privati

Come si può evincere dal grafico, l'attuale regolamentazione influisce già molto sul traffico. A causa di questa infatti, il punto di massimo assoluto è alle 10:30 del mattino, quando il divieto di circolazione termina. È presente comunque un punto di massimo locale alle 8:30 circa, dovuto al fatto che molti, grazie al possesso di un permesso, hanno la possibilità di entrarvi. La Z.T.L. ha distorto in maniera positiva il comportamento delle persone: in assenza di questa, il picco sarebbe solo uno, situato tra le 8:00 e le 10:00 circa, e questo provocherebbe molta più congestione al mattino di quella che si verifica attualmente.

Ciò che è evidente, perciò, è che alcuni soggetti hanno modificato le loro abitudini, optando per un ingresso nel momento in cui termina il divieto di passaggio. È vero anche, questa volta desumibile da relazioni di anni precedenti, come molti degli automobilisti a seguito dell'inserimento di tale nuova regolamentazione siano passati ai mezzi di trasporto pubblico. Questo è stato reso possibile dall'ampliamento dei servizi offerti dopo gli anni duemila: interventi di ampliamento tranviario, intensificazione del servizio e inserimento di nuove linee. A supplemento di questo, si è aggiunto anche il servizio di *Park & Ride* ai confini della corona che permette di parcheggiare nei pressi del centro e usufruire poi di linee gratuite per chi posteggia in tali zone. Questi e altri servizi hanno consentito a molti individui di optare per il trasporto pubblico. Nel 2010 infatti si stimava che per coloro che avevano accesso alla

zona centrale, il 70% optava per il trasporto pubblico e solamente il 30% per quello privato.

In linea generale, si è visto come la situazione attuale abbia già delle conseguenze positive per ciò che riguarda la riduzione delle esternalità, intese come congestione e inquinamento, in quanto da un lato è diminuito il traffico nelle ore di punta e dall'altro si sono ridotti gli ingressi totali nella giornata e, quindi, le emissioni. Bisogna però valutare se tale soluzione è soddisfacente o meno.

Come è noto dalla teoria economica, imporre una tassa per l'utilizzo della strada ha il vantaggio di lasciare agli individui stessi la facoltà di accedervi pagando o optare per soluzioni alternative in modo da non dover subire l'imposta.

Questo tipo di soluzione, invece, è una soluzione non equa, in quanto impedisce a determinate categorie di individui l'ingresso, nonostante siano anche disposte a pagare un certo ammontare. Vero è che vi sono una serie di possibilità con cui le persone possono entrare pagando. In particolare, qualora si decida di parcheggiare nei parcheggi in struttura, si ha il diritto di ingresso. Questo, però, se ci si vuole fermare. Qualora si voglia solo attraversare, il transito non è a tutti permesso.

Una seconda osservazione riguarda il tempo di attivazione del divieto. Esso è stato scelto proprio per evitare il picco mattutino. Un intervallo così limitato incentiva molti individui a cambiare il momento di ingresso, mentre se lo scopo fosse quello di incoraggiare un uso alternativo per lo spostamento, si possono studiare altre soluzioni che possono portare a risultati più desiderabili. Successivamente si discuterà delle conseguenze derivanti da un'ipotetica applicazione del *Road Pricing* alla città di Torino.

6.3 Analisi delle esternalità sulla situazione attuale

Di seguito, in base ai transiti rilevati nei primi mesi del 2018, si valutano i livelli di inquinamento e di congestione raggiunti. Una volta stabilito ciò, si procederà con la valutazione economica di tali esternalità, utile per ipotizzare l'applicazione di una tassa qualora si optasse per l'applicazione del *Road Pricing*.

6.3.1 Congestione nella Z.T.L.

Come visto precedentemente, la situazione attuale ha portato già a una modifica del comportamento degli individui. Si è cercato, quindi, di comprendere se tale equilibrio

fosse soddisfacente dal punto di vista della congestione. Come noto dalla teoria e indicato nell'*Handbook of estimation of external cost (2008)*, per capire se un arco è congestionato bisogna valutare il rapporto tra il flusso di veicoli e la capacità in una determinata strada. La capacità indica il massimo numero di veicoli che può attraversare un arco nell'unità di tempo (*veh/h*). Tale valore dipende, a sua volta, da una serie di parametri che rendono la strada più o meno scorrevole; i più importanti sono la larghezza utile e il flusso di veicoli per tempo ciclo della rete semaforica. Avendo i dati dei flussi di veicoli (*veh/h*) sulle strade in cui sono presenti le telecamere di controllo, si sono presi i valori di capacità di tali strade, così da valutare il livello di congestione raggiunto nelle porte di ingresso della Z.T.L. Il valore di riferimento utilizzato per il rapporto tra flusso e capacità è 75%. Si ritiene che se dai calcoli viene fuori un valore inferiore, la strada è considerata a flusso libero, se invece è superiore, si presume che si stia verificando già un certo livello di congestione. In *Appendice C.1* sono riportati i risultati raccolti. Di seguito, invece, si riporta un grafico che rappresenta i valori di capacità e di flusso del varco 287 (via Po), uno dei più congestionati (*Figura 7*). Da tale grafico, è chiaro come il livello di traffico sia ben al di sotto della capacità. Come si evince dai calcoli effettuati perciò, non risulta esserci congestione all'interno della Z.T.L. Il valore massimo raggiunto è 71.70%, ancora al di sotto della soglia stabilita. Inoltre, la maggior parte dei valori ottenuti sono al di sotto del 50%. L'occupazione media delle strade risulta infatti essere 15,89%, mentre la media delle occupazioni massime di tutte le strade è 33,39%. Questi risultati danno un segnale importante: infatti, qualora lo scopo dell'applicazione sia ridurre la congestione nella zona centrale della città, in base alla situazione attuale tale problema non è presente.

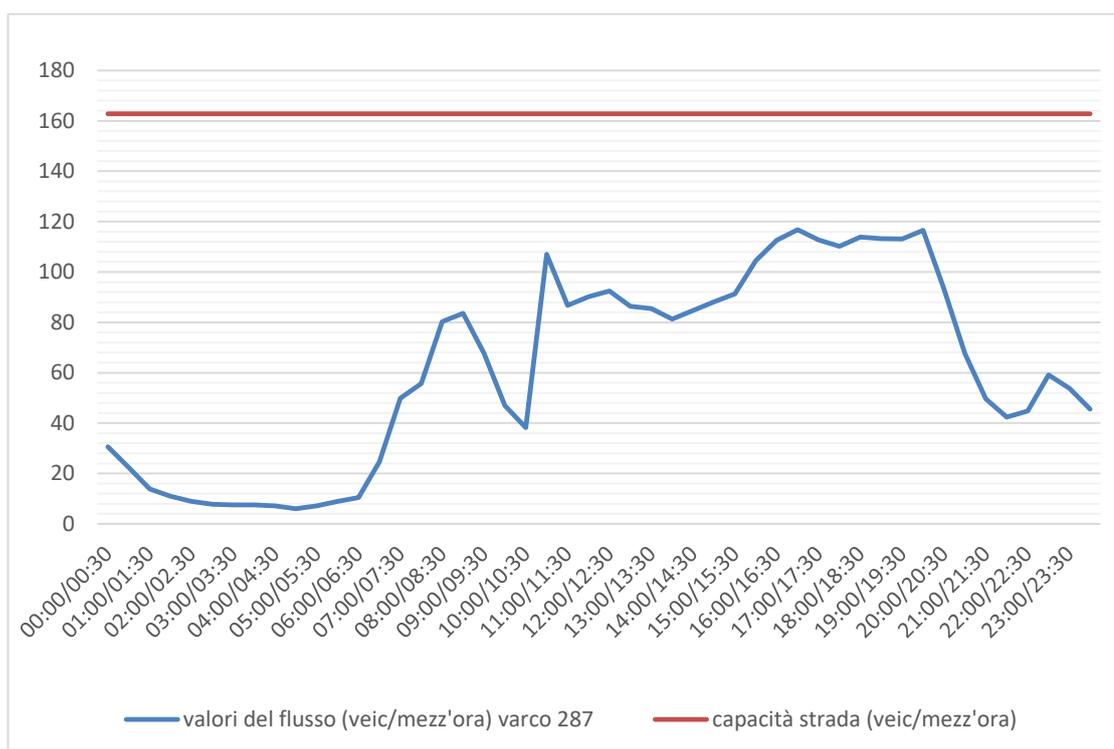


Figura 7: Rappresentazione del flusso di veicoli e della capacità, espressi entrambi in veic/mezz'ora, per uno dei varchi più congestionati, situato in via Po.

Rimanendo in tema di congestione, ciò che si dovrebbe, in aggiunta, valutare è il livello di congestione nelle strade sul confine della Z.T.L. Questi calcoli non sono stati affrontati, ma è giusto farne un accenno. La limitazione messa in atto nel 1994 ha causato sicuramente un aumento del traffico sul cordone nelle ore in cui la limitazione è attiva in quanto qualcuno ha cambiato percorso in modo da evitare la zona centrale. Nel momento in cui si mette in atto una politica di *Road Pricing*, gli scenari possono essere molteplici. Uno di questi è sicuramente un aumento della congestione attorno all'area delimitata. Nella parte finale si andranno a discutere le possibili conseguenze.

6.3.2 Inquinamento nella Z.T.L.

Torino, come molte delle grandi città, deve affrontare quotidianamente il problema dell'inquinamento. Il capoluogo piemontese è in cima alle classifiche, detenendo spesso il primato di città più inquinata d'Italia²¹. In base alla relazione annuale del 2017 condotta da Arpa Piemonte e Città metropolitana di Torino²² si evince come

²¹http://torino.repubblica.it/cronaca/2018/01/27/news/legambiente_torino_e_la_citta_piu_inquinata_d_europa_-187405496/

²²http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/ambiente/dwd/qualita-aria/relazioni-annuali/relazione2017_brochure_A4.pdf

l'inquinamento sia un problema tutt'ora critico per l'area urbana torinese. In particolare, 12 sono gli inquinanti tenuti sotto controllo. Di questi, 7 sono ampiamente sotto i limiti stabiliti e sono monossido di carbonio (CO), biossido di zolfo (SO₂), benzene e metalli (Pb, As, Cd, Ni). Il PM₁₀, invece, costituisce un serio problema per la città: 5 stazioni su 18 hanno superato il limite annuale, mentre il limite giornaliero è stato superato da 14 stazioni su 18. Da indagini statistiche, si è riscontrata una forte correlazione di tale inquinante con la variabilità meteorologica, costituendo quest'ultima la causa maggiore del peggioramento rispetto agli anni precedenti. Uno degli indicatori di maggior rilievo è, infatti, il "numero di giorni favorevoli all'accumulo di PM₁₀". Tale valore nel 2017 è stato pari a 119 giorni, maggiore rispetto all'anno precedente.

La situazione del PM_{2,5} è ancora più grave: il limite annuale è infatti stato superato ovunque ad eccezione di Ceresole Reale e Ivrea. La situazione è peggiorata rispetto al 2016 e questo è da attribuirsi anche in questo caso alle condizioni di dispersione atmosferica sfavorevoli.

Il limite annuale di biossido di azoto (NO₂) è stato superato in 4 stazioni su 19; il valore del benzo(a)pirene è risultato critico per tre stazioni, mentre il valore di ozono (O₃) costituisce un serio problema, soprattutto nei mesi estivi, in quanto si è registrato un superamento del valore limite in tutte le stazioni di controllo.

5 dei 12 inquinanti monitorati costituiscono, perciò, una seria preoccupazione per la città. In particolare, si è assistito ad un peggioramento rispetto al 2016 per PM₁₀, PM_{2,5} e NO₂.

È bene, in aggiunta, considerare che dall'analisi delle serie storiche si evince un rallentamento della tendenza alla riduzione delle emissioni, e anzi, in alcuni casi, le condizioni sono anche peggiorate rispetto agli anni precedenti. Sono necessarie, quindi, una serie di nuove iniziative con lo scopo di migliorare ulteriormente la qualità dell'aria nel territorio torinese.

Ci si concentra ora sulla stazione di controllo *To-Consolata*, situata all'interno dell'attuale Z.T.L. Nella tabella seguente vengono rappresentati gli inquinanti rilevati dalla cella in esame (*Tabella 6*). Per alcuni inquinanti tale cella non prevede alcuna rilevazione, ragion per cui si è optato per considerare il valore medio delle altre celle presenti nella città di Torino. I limiti da rispettare sono, in alcuni casi due, in altri solo uno. In particolare, il primo riguarda il valore medio annuo, il cui valore massimo accettabile è inserito tra parentesi. Il secondo invece riguarda il numero dei giorni in cui viene superato un preciso valore critico, definito per ogni tipo di inquinante. Dalla

tabella si evince come i primi 4 inquinanti superano i limiti stabiliti in almeno uno dei due indicatori. Sicuramente, tale zona è soggetta al problema dell'inquinamento, di conseguenza si possono studiare misure preventive, come può essere il *Road Pricing*, con lo scopo di ridurre tale fenomeno.

Tabella 6: riepilogo dei valori riscontrati nel 2017. I valori tra parentesi indicano il limite oltre il quale si ritiene la zona a rischio causa inquinamento

INQUINANTI	VALORE MEDIO ANNUO	NUMERO DI SUPERAMENTI
PM ₁₀	43 (40) µg/m ³	108 (35)
PM _{2.5}	30 (25) µg/m ³	
NO ₂	59 (40) µg/m ³	1 (18)
O ₃		48 (25)
As	0,7 (6) ng/m ³	
Cd	0,18 (5) ng/m ³	
Ni	3,9 (20) ng/m ³	
Pb	0,01 (0,5) µg/m ³	
C ₆ H ₆	1,7 (5) µg/m ³	
B(a)P	0,8 (1) ng/m ³	
CO	4,5 (10) mg/m ³	
SO ₂	7 µg/m ³	

Fonte: Uno sguardo all'aria. Relazione annuale sui dati rilevati dalla rete metropolitana di monitoraggio della qualità dell'aria

Note: I valori di PM_{2.5} e O₃ sono stati ricavati come media delle altre stazioni di controllo presenti in Torino, in quanto nella zona in esame non è presente un controllo di tale inquinante

Una volta che si è sottolineato il problema dell'inquinamento a cui è soggetta la città di Torino, si cerca di quantificare gli inquinanti emessi dalle autovetture stesse. Non sarà possibile poter confrontare l'inquinamento delle autovetture con l'inquinamento totale, in quanto il primo risulta essere espresso in *mg/km* e non *mg/m³*. Si potranno, però, fare una serie di considerazioni rimanendo all'interno del sistema trasportistico.

La prima analisi riguarda il parco auto piemontese. Tale panoramica ha lo scopo di partizionare le autovetture, così da valutare quelle maggiormente presenti nel territorio. Questa scomposizione è molto utile qualora si abbia lo scopo di andare a definire una *pollution-charge*. I dati che vengono di seguito presentati raffigurano la suddivisione percentuale delle auto immatricolate nel comune di Torino (*Figura 8*). Per i dettagli numerici, si fa riferimento all'*Appendice C2, Tabella II-C*.

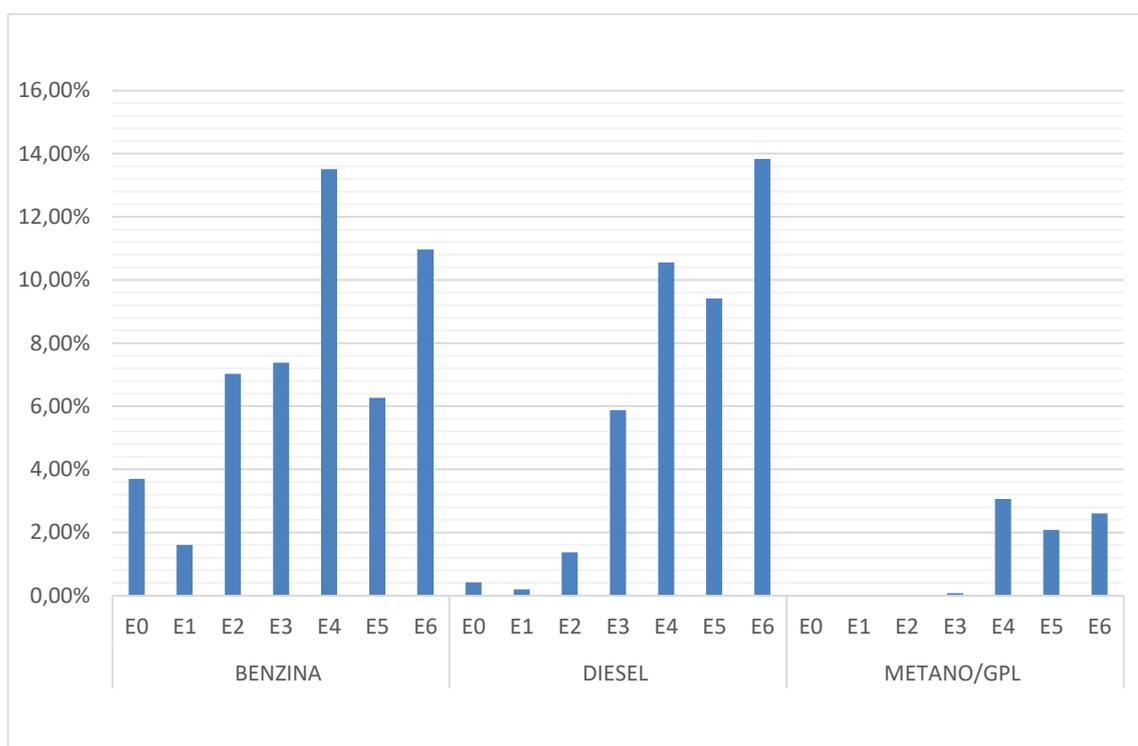


Figura 8: suddivisione percentuale del parco auto nella città di Torino in base ai dati delle auto immatricolate nel 2017.

Come si evince dal grafico, diesel e benzina sono le categorie maggiormente presenti. Le diesel Euro 6 sono le maggiori in assoluto. Le auto benzina, però, in aggregato sono le più numerose. Questo è dovuto al fatto che le auto a gasolio sono concentrate sugli Euro 4, 5 e 6, mentre le auto benzina Euro 0,1,2 e 3 sono ancora presenti in larga misura. Le autovetture metano/gpl, invece, continuano ad avere poco successo, anche se negli ultimi anni si è assistito a una loro crescita. I valori qui presentati hanno lo scopo di presentare una panoramica generale della città. Poco dicono, però, sulla situazione relativa alla Z.T.L., ragion per cui si è optato per un'ulteriore analisi con lo scopo di presentare tale contesto.

È bene considerare che esistono nella città una serie di divieti sui veicoli più vecchi e maggiormente inquinanti. È imposto, infatti, il divieto di circolazione su tutto il territorio comunale per qualsiasi veicolo Euro 0 e per le autovetture diesel fino a Euro 3 dalle 8:00 alle 19:00 dal lunedì al venerdì. Se si è residenti nel comune, però, i possessori di diesel Euro 2 hanno il divieto di transito ristretto dalle 9:00 alle 17:00,

sempre dal lunedì al venerdì²³. Questo tipo di limitazioni ha già permesso una riduzione di queste categorie di autovetture.

A questo punto, quindi, ci si è concentrati solo sulla Z.T.L. di Torino e di seguito si presentano i dati degli ingressi, registrati dai varchi, di un preciso giorno ferialo scolastico predefinito²⁴ (Figura 9). I dati sono anche qua partizionati nelle diverse categorie di autovetture. In *Appendice C.2, Tabella III-C* sono riportati i valori numerici.

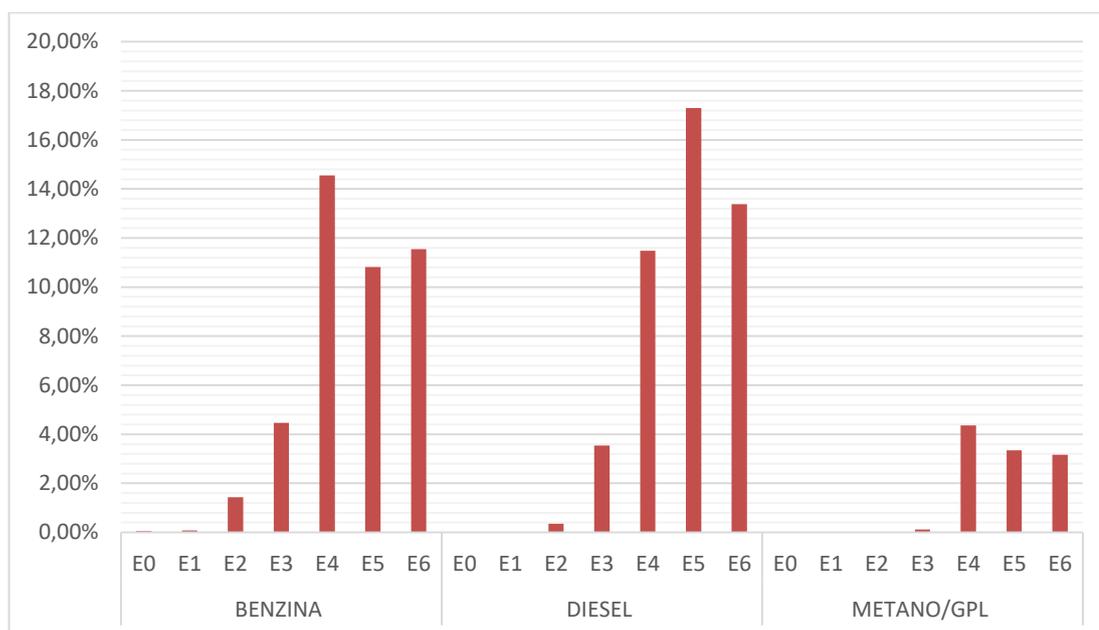


Figura 9: rappresentazione percentuale del parco auto transitante nella Z.T.L. I dati sono stati ricavati dai varchi presenti sul confine.

Rispetto alla panoramica precedente, più generale e meno focalizzata sul centro di Torino, il parco auto entrante risulta essere più rinnovato. Sono quasi totalmente scomparse le auto benzina Euro 0, che prima costituivano una buona parte, ma anche Euro 1 e 2 sono diminuite percentualmente. Questo è dovuto anche alla presenza delle limitazioni attualmente vigenti su tali mezzi. Infatti, dalle 10:30 alle 17:00 è in vigore il divieto di transito nella Z.T.L per tutti i veicoli diesel e benzina con omologazione precedente all'Euro 3²⁵. Le auto registrate facenti parte di queste categorie sono

²³ <http://www.comune.torino.it/trasporti/ztl/nuove-limitazioni-al-traffico-a-partire-dal-7-genn-2.shtml>

²⁴ Anche in questo caso, per questioni di privacy, si sono potuti utilizzare i dati relativi ad un solo giorno, il 17 maggio. Questo è un giorno ferialo scolastico, perciò la volatilità non risulta essere molto elevata.

²⁵ <http://www.comune.torino.it/trasporti/ztl/nuove-limitazioni-al-traffico-a-partire-dal-7-genn-2.shtml>

presumibilmente transitate in orari in cui non è attivo il divieto, hanno un permesso di transito eccezionale o non hanno rispettato le limitazioni imposte.

In aggregato, dai dati registrati si evince che le auto diesel sono quelle che effettuano più ingressi. In ottica di emissioni, tale combustibile è quello che ha un maggior impatto sull'ambiente, come si analizzerà successivamente. Nei casi internazionali presentati nel *Paragrafo 5.3.1*, quando si è applicata una *pollution-charge* nelle città, questa categoria era la più tassata. Di conseguenza, quando si valuteranno le diverse alternative, bisognerà tener conto di tale aspetto.

Infine, le auto metano/gpl hanno mantenuto una percentuale molto simile al caso precedente.

Come ultima analisi, si cerca ora di valutare l'andamento delle diverse categorie su tutto l'arco della giornata. Per questioni di chiarezza, si sono rappresentate due situazioni: da un lato (*Figura 10*) l'andamento in base al tipo legislativo e, dall'altro (*Figura 11*), in base al combustibile. Anche qui si rimanda all'*Appendice C.2, Tabella IV-C e V-C* per i valori numerici. Ecco i risultati:

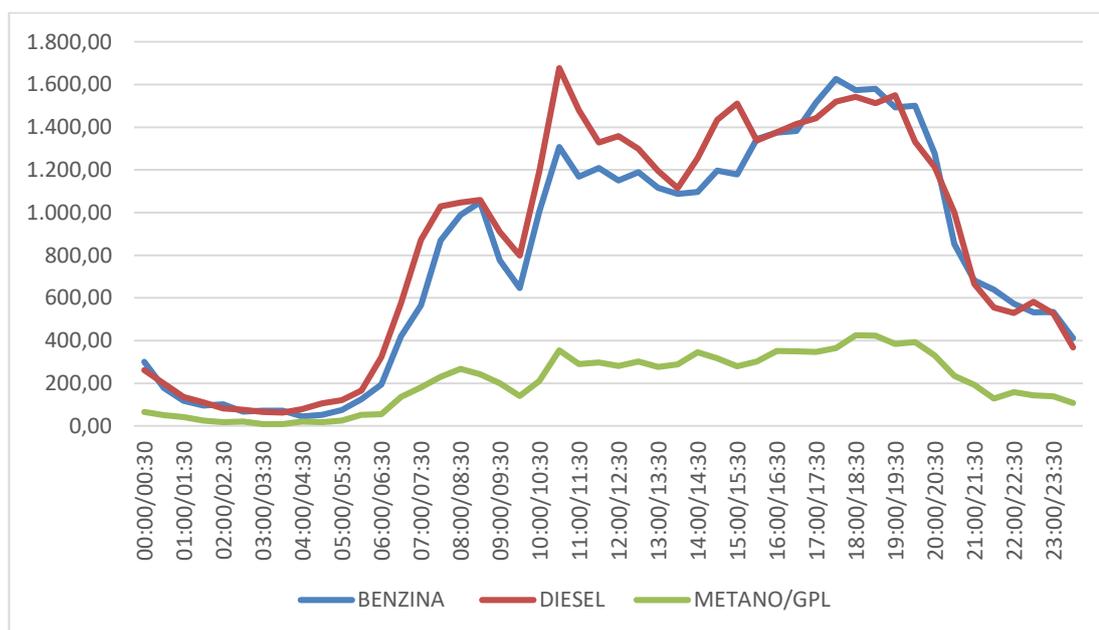


Figura 10: Rappresentazione del flusso veicolare (veic/mezz'ora) suddiviso per tipo combustibile

L'andamento seguito dalle tre categorie è il medesimo. Si registra infatti un massimo assoluto alle 10:30 del mattino e un massimo locale alle 8:30 per ognuna di queste. Gli ingressi di autovetture diesel si mantengono superiori alle altre categorie per gran parte

della giornata: nel pomeriggio si registra, però, un aumento maggiore dei veicoli benzina. I valori di queste due categorie comunque non si discostano molto l'un l'altro. Di seguito invece si presenta la seconda suddivisione:

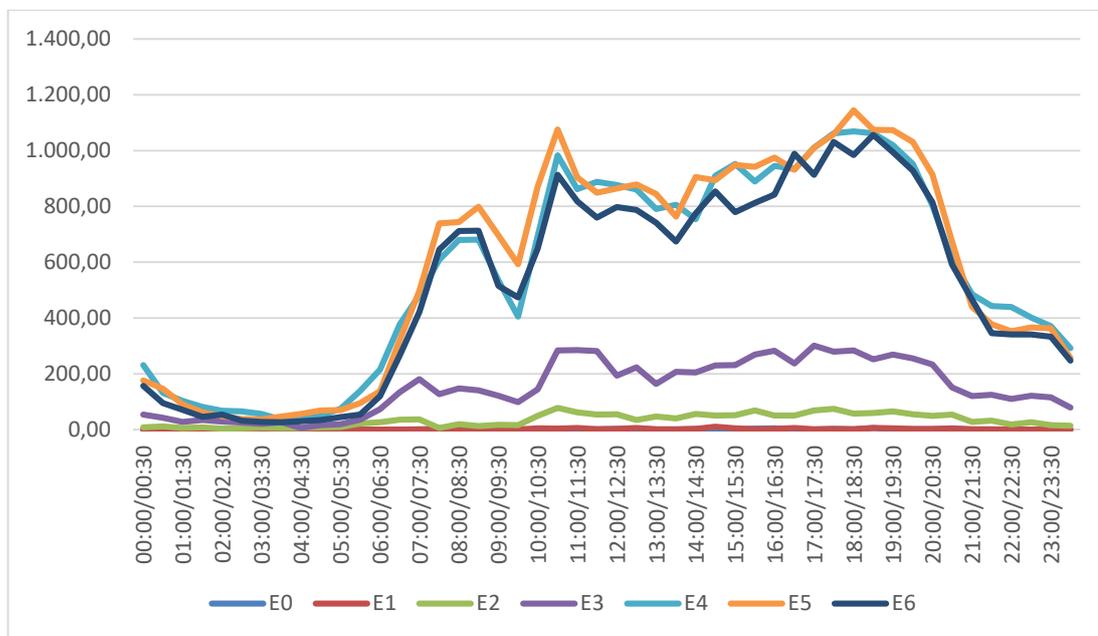


Figura 11: Rappresentazione del flusso veicolare (veic/mezz'ora) suddiviso per tipo legislativo

I veicoli maggiormente presenti sono gli Euro 5, seguiti dagli Euro 4 e 6, quest'ultimi con valori molto simili tra loro. Gli Euro 3 costituiscono ancora un numero rilevante, mentre le altre categorie sono in piccola parte presenti: ciò è da attribuirsi anche alle limitazioni in vigore, presentate precedentemente.

L'andamento registrato, comunque, risulta anche in questo caso essere analogo per tutte le categorie. Questo perché, a parte le limitazioni che hanno fatto diminuire drasticamente gli Euro 1 e 2, per le altre categorie i criteri di ingresso non dipendono dal combustibile o dal tipo legislativo.

Di seguito si prosegue con l'analisi delle emissioni totali da parte delle autovetture. Ogni categoria impatta in maniera differente. Si è utilizzato per questo tipo di valutazioni i parametri presentati in *Appendice C.2, Tabella VI-C*. Per ogni tipo legislativo e tipo alimentazione viene indicato il quantitativo di emissione al chilometro di tutti i maggiori inquinanti. Tali valori decrescono all'aumentare del tipo legislativo, in quanto i nuovi modelli risultano più ecologici. Inoltre, come già sottolineato, le auto a gasolio generano maggiormente emissioni rispetto alle altre

categorie. Sono stati combinati i valori dei flussi precedentemente descritti con la tabella dei parametri sulle emissioni delle diverse categorie veicolari, calcolando così l'inquinamento totale (*Appendice C.2, Tabella VII-C*).

Qui si rappresentano le emissioni medie orarie suddivise in 4 fasce (*Figura 12*). Questa partizione è stata effettuata sulla base dell'attuale sistema vigente. Si è infatti voluto considerare separatamente il momento in cui è attiva la Z.T.L. Inoltre, si è esaminata disgiuntamente anche la fascia 10:30-19:30, poiché in tale istante termina il posteggio a pagamento e terminerà, qualora entrasse in vigore, l'obbligo di pagare una tassa per l'ingresso. Ultima considerazione riguarda le emissioni di CO₂, le quali sono indicate in grammi anziché milligrammi, altrimenti sarebbe risultato impossibile una rappresentazione congiunta.

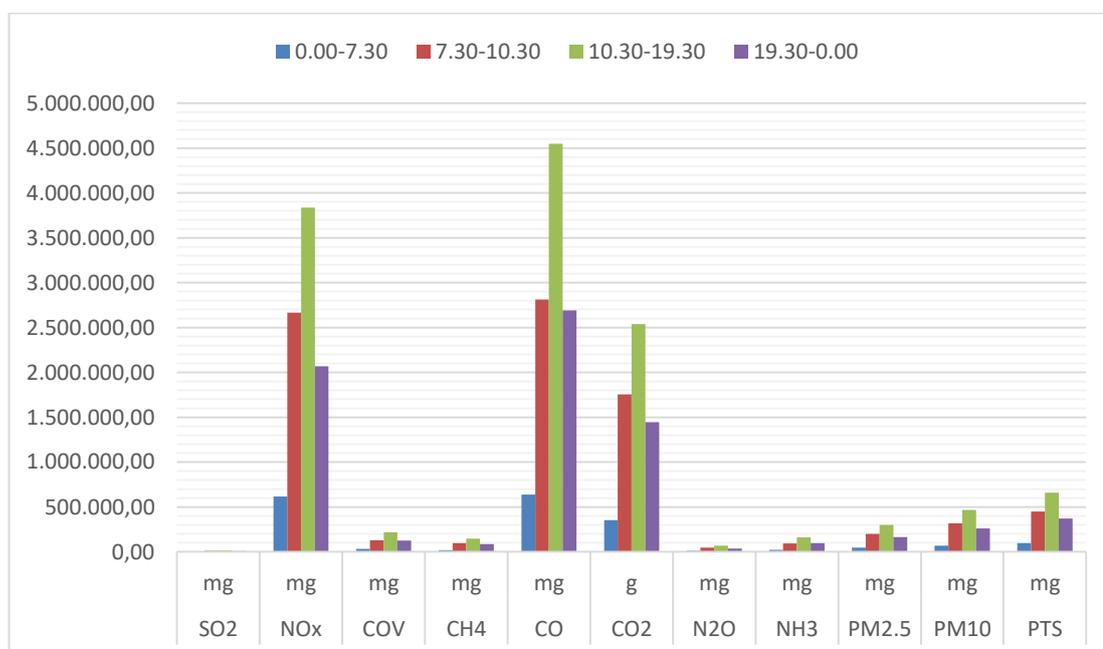


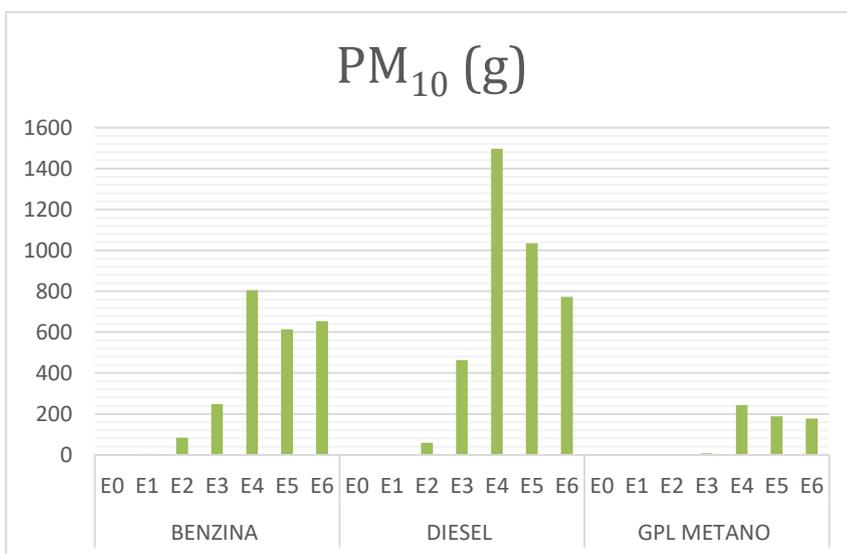
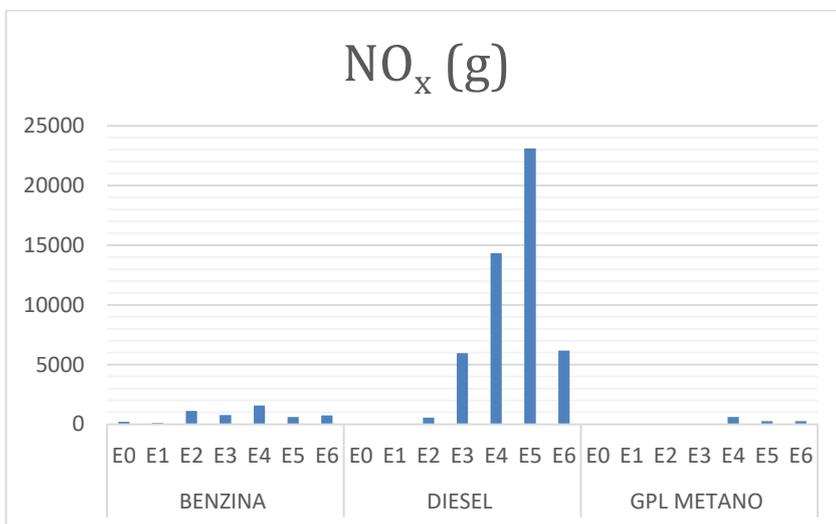
Figura 12: Inquinamento orario (milligrammi o grammi all'ora) suddiviso delle 4 fasce: 00:00-07:30, 07:30-10:30, 10:30-19:30, 19:30-00:00

Come si evince dal grafico, l'inquinamento si concentra nella fascia 10:30-19:30. Qui infatti si registra un alto numero di transiti, che si traducono in un quantitativo elevato di emissioni. È bene, però, considerare che i vari inquinanti hanno impatti differenti. Prendendo in esempio il particolato fine PM_{2,5}, esso genera danni più gravosi rispetto all'ossido di azoto (NO_x). Per comprendere appieno i danni generati dalle diverse classi di inquinanti, si effettuerà una stima in termini economici.

Inquinamento locale

Qui di seguito, si procede analizzando quali categorie generano maggiormente un impatto negativo, questa volta inteso non solo come numero di ingressi, ma come grammi dispersi nell'atmosfera.

Per fare ciò, in base al procedimento presentato in *Appendice C.2*, non si è effettuata la sommatoria delle emissioni per ogni categoria, ma si sono mantenuti i risultati di ogni categoria disgiunti. Si è deciso di concentrare l'analisi sui tre inquinanti su cui è maggiormente focalizzata l'attenzione della città di Torino per i loro livelli ormai allarmanti. Questi sono NO_x , $\text{PM}_{2,5}$ E PM_{10} . Di seguito quindi il grafico di tutti e 3 (*Figura 13*).



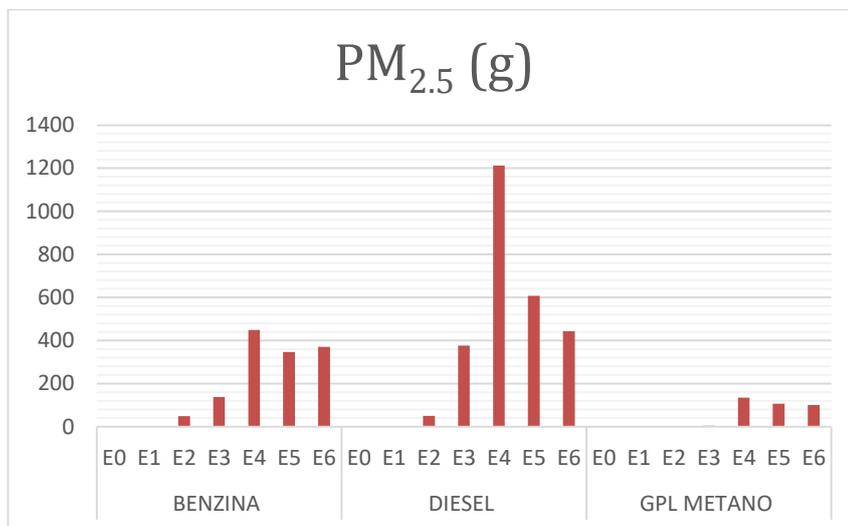


Figura 13: Suddivisione degli inquinanti locali nelle diverse categorie di veicoli.

È chiaro, dai dati sopra presentati, come le auto a gasolio siano il principale responsabile delle emissioni. Esse infatti, come visto precedentemente, oltre essere le più numerose sono anche quelle più inquinanti. Nonostante il numero di transiti di tali veicoli sia simile a quello delle auto benzina, si vede che l'impatto di quest'ultime risulti molto inferiore.

L'effetto recato dalle auto benzina non è, però, da sottovalutare: soprattutto per i particolati, infatti, si registrano elevati valori causati da tali veicoli. Il contributo, invece, delle auto gpl/metano è minimo: questo sia per gli scarsi ingressi, sia per la loro natura più ecologica.

Inquinamento globale

Si è voluto mantenere separato il calcolo dell'inquinamento locale da quello globale. Nel *Capitolo 3* si era analizzato anche quest'ultimo e si era visto che il principale responsabile del surriscaldamento globale fosse la produzione di CO₂ e, in misura minore, CH₄ e N₂O. Ecco che a seguire si presentano i valori trovati per tali composti (*Figura 14*).

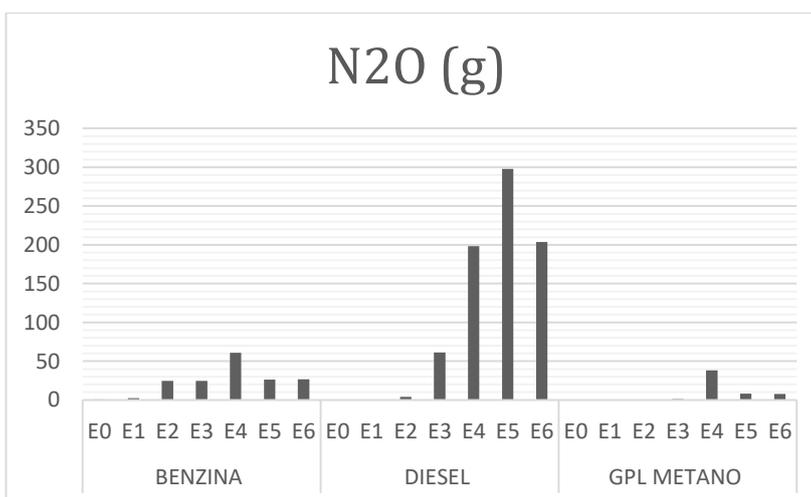
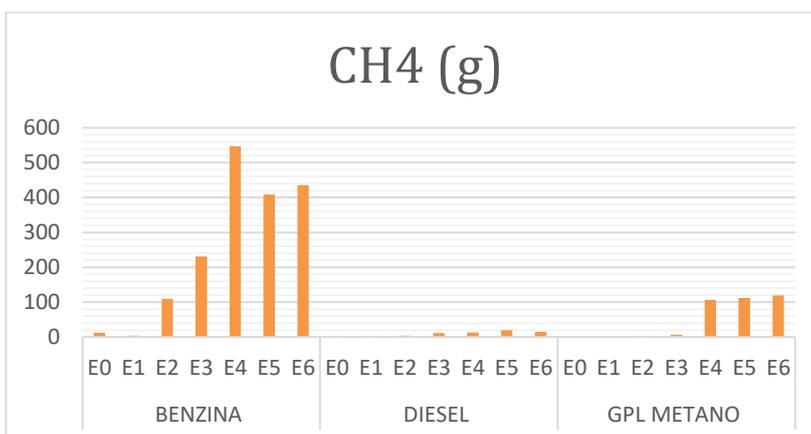
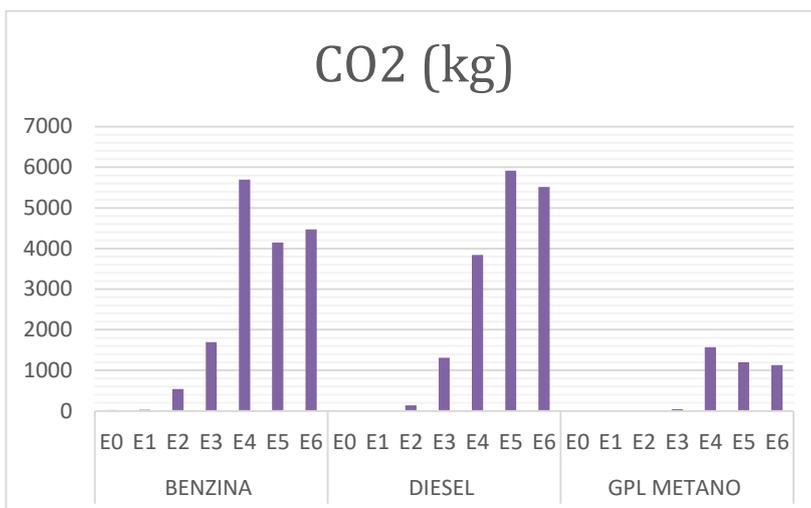


Figura 14: suddivisione degli inquinanti globali nelle diverse categorie

I valori di CO₂, al contrario dei precedenti casi, non dipendono in larga misura dalle auto a combustibile diesel. Questo composto infatti viene in buona parte prodotto

anche dalle auto benzina. Se, quindi, si vuole limitare il fenomeno dell'inquinamento globale, è necessario intervenire anche su tali categorie.

Gli altri due composti hanno effetti meno importanti, ma comunque contribuiscono al fenomeno dell'effetto serra e perciò devono essere tenuti in considerazione. Le auto benzina sono quelle che contribuiscono quasi totalmente alla produzione di CH₄, inquinante emesso molto anche dalle gpl/metano. N₂O, invece, è prodotto largamente dalle auto diesel. In conclusione, quindi, non è chiaramente identificabile la categoria più impattante quando si tratta di surriscaldamento globale, tutte in buona misura ne sono la causa.

6.4 Valutazione economica delle esternalità sul caso di Torino

Una volta analizzati gli impatti fisici, ora si valuteranno gli effetti in termini economici. Si rimanda al *Capitolo 4* dove si sono presentate le modalità di calcolo per valutare i costi esterni.

6.4.1 Impatto economico della congestione

Primo fra tutti, si stima il costo della congestione generato nella Z.T.L.

In questo caso il calcolo risulta essere molto semplice. Si è stimato infatti come la congestione non costituisca, almeno in base alla situazione attuale, un problema per il traffico nella zona centrale. È anzi noto come il maggior numero di veicoli si concentri al di fuori del cordone. In *Appendice D.1* è presentato il calcolo del costo per la congestione; i parametri utilizzati fanno riferimento alle zone metropolitane, rientrando Torino in una zona dall'elevata affluenza.

Il costo della congestione causato dalle sole autovetture è pari a 5.376,08€. Per tale valore bisogna, però, fare alcune considerazioni. In primo luogo la stima utilizzata per i chilometri medi percorsi può essere molto distorta, dovuto al fatto che non si possono avere informazioni sui singoli tragitti. Per il calcolo della congestione bisognerebbe calcolare il numero di veicoli transitati in ogni strada e in un secondo momento aggregare. Tale procedimento, nel caso in esame, risulta impossibile da potersi effettuare, non avendo informazioni sul tragitto seguito da ogni singolo guidatore. Altro aspetto critico è che si sono considerati solo i costi della congestione delle autovetture, tralasciando i costi della congestione generati dagli autobus. Questo perché una possibile applicazione di *Road Pricing* inficerebbe solo il comportamento

delle autovetture e non dei mezzi pubblici, che continuerebbero ad avere libero accesso. Non da ultimo, bisogna considerare che tale valore dipende molto dalla stima del costo unitario della congestione e dal livello di congestione raggiunto. A titolo di esempio infatti, si ipotizza il caso limite, ovvero area centrale totalmente congestionata. Qui la stima dei costi per la congestione sarebbe 36.126,00 € circa. Si vede, quindi, come le considerazioni che verrebbero fatte sarebbero molto diverse, poiché l'impatto economico generato risulterebbe un serio problema per il comune di Torino. Infine, i parametri qui utilizzati sono stati estrapolati dalla *Tabella 5* e fanno riferimento alle aree metropolitane. Qui i costi unitari della congestione sono elevati, anche considerando le strade a flusso libero, proprio perché le aree metropolitane, nel quale vi è un elevato flusso di veicoli, vedono il problema della congestione di primaria importanza. Questo quindi fa in modo che gli impatti economici della congestione siano piuttosto considerevoli.

6.4.2 Impatto economico dell'inquinamento

Dopo aver calcolato l'impatto economico della congestione, si procede con il calcolo dell'inquinamento locale e globale. Anche qui si fa riferimento alle considerazioni fatte precedentemente. Si è deciso, per la loro diversità di impatto, di mantenere i risultati delle due tipologie di inquinamento separate.

Inquinamento locale

Per i calcoli dell'inquinamento locale si sono presi i valori dell'*External costs of transport in Europe (2013)*. Questo perché quest'ultimo conteneva la stima dei costi dei maggiori inquinanti emessi dalle autovetture e, inoltre, i dati risultavano sufficientemente aggiornati e recenti. In *Appendice D.2, Primo metodo* sono presentati i calcoli effettuati per la stima. Il costo dell'inquinamento locale risulta pari a 3.587,03€.

Di seguito vi è una configurazione del costo dei diversi inquinanti (*Figura 15*): si vede come coloro che impattano maggiormente sono il PM_{2,5}, il PM₁₀ e l'NO_x. Questo è un risultato di forte importanza. Quando, infatti, si parlava della situazione attuale della città di Torino, questi erano gli inquinanti che la città manteneva sotto controllo per i loro livelli ormai allarmanti. Da questa panoramica si evince, quindi, che le autovetture contribuiscono al livello di questi e che l'impatto monetario, che poi si traduce in danni alla salute, causato dai veicoli non è da sottovalutare. Si deve poi sottolineare come questa panoramica faccia riferimento alla sola zona centrale della città, dove i

chilometri percorsi non sono molti per la dimensione ristretta della Z.T.L. Se si considerasse l'intero territorio comunale, tali effetti risulterebbero ancora amplificati.

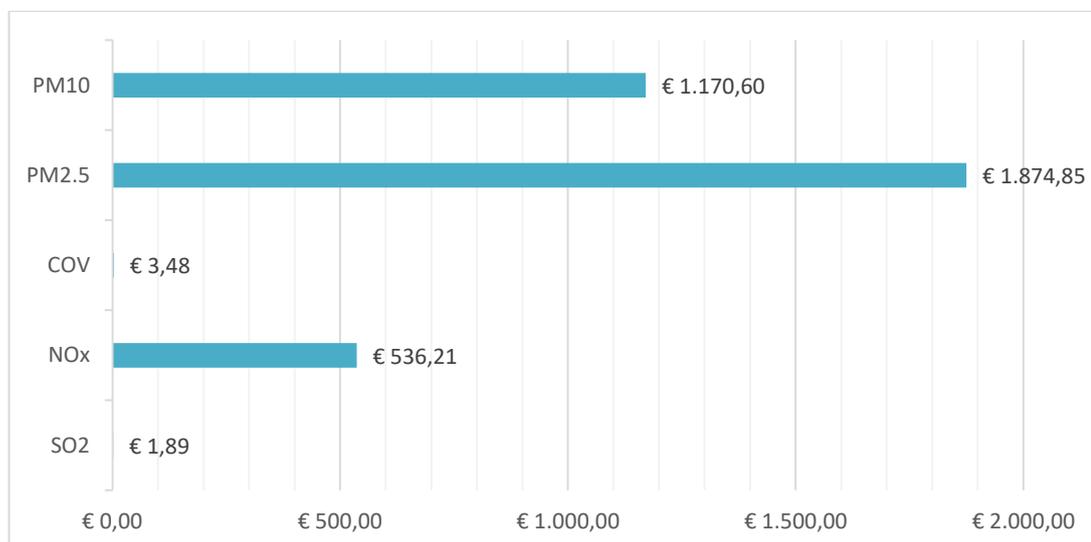


Figura 15: Impatto economico dei principali inquinanti.

È stata successivamente effettuata una stima diversa. In questo caso si sono utilizzati i parametri dell'*Update of the handbook on external costs of transport (2014)*. I calcoli sono presentati nell'*Appendice D.2, Secondo metodo*. Lo scopo di questa seconda stima è valutare la categoria di veicoli che genera il maggior danno economico. Nel grafico qui di seguito, è stata presentata una partizione percentuale degli ingressi e dei costi, indicando con c% il costo di quella categoria rispetto al costo totale e con n% il numero di veicoli di quella classe rispetto al totale (*Figura 16*).

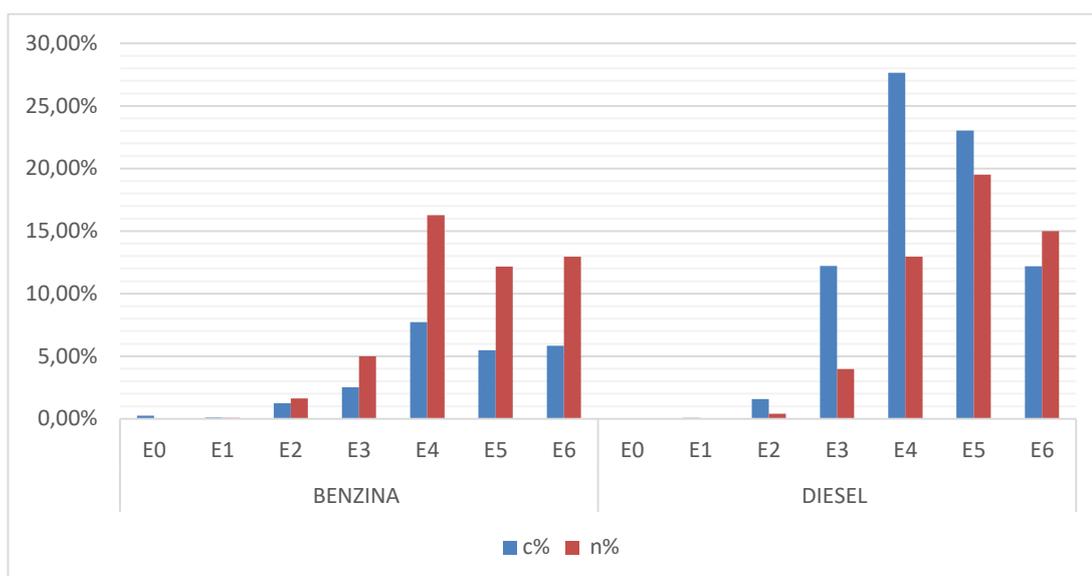


Figura 16: valutazione congiunta dei costi e degli ingressi per le diverse classi veicolari

In prima analisi si vede che, nonostante il numero di veicoli delle due categorie sia molto simile, le auto a gasolio generano un impatto economico molto superiore. Analizzando le auto benzina, si vede come le Euro 4 siano le più numerose e le più inquinanti. Euro 5 e Euro 6 non si discostano molto l'un l'altra, sia come costi che come numeri. Passando, invece, alle diesel, si riscontrano particolarità. Si vede, per esempio, come le auto Euro 3 costituiscono una piccola percentuale di ingressi rispetto al totale, ma l'inquinamento che generano è invece più che rilevante. Sono perciò, una delle prime cause di inquinamento. Il risultato è ancora più evidente quando si trattano le Euro 4 diesel. Esse infatti, se pur sono la terza categoria come numero di veicoli, si dimostrano essere la classe più impattante dal punto di vista economico. Saranno quindi analizzate successivamente le conseguenze che derivano da tali osservazioni.

In conclusione, quindi, è bene sottolineare ancora una volta come i valori economici, intesi come singoli numeri, non sono molto rilevanti: si è infatti provato ad utilizzare parametri ricavati da altre ricerche e si è visto come gli impatti economici potevano risultare anche molto differenti, a causa della difficoltà che si riscontra nello stimare le esternalità. Quello che invece è vero, a prescindere dal costo unitario che si utilizza, è che i particolari generano il maggior danno economico e le auto diesel, in particolar modo Euro 3 e Euro 4, sono le categorie più critiche da dover tener d'occhio quando si vuole valutare la qualità dell'aria.

Inquinamento globale

Si valutano ora le emissioni di CO₂ e degli inquinanti minori. Come è stato detto nel *Capitolo 4*, per la valutazione delle emissioni si utilizza il costo dell'anidride carbonica e il *GWP (Global Warming Potential)*, il quale esprime il contributo degli inquinanti minori rispetto al contributo di CO₂. In *Appendice D.3, Primo metodo* sono presentati i parametri utilizzati.

L'uso del GWP ha permesso, quindi, di sintetizzare i risultati, espressi solo in funzione dei milligrammi di CO₂.

Sono presenti diversi parametri in base all'orizzonte temporale che si vuole utilizzare. Per il caso in esame si è scelto quello dei 20 anni, perciò i valori utilizzati sono 56 per il metano e 280 per l'ossido nitroso. Perciò ogni grammo di metano genera 56 volte il danno recato da un grammo di anidride carbonica. I grammi emessi di CO₂, però, come mostrato nell'appendice, sono molti ordini di grandezza superiori. Ecco che, quindi, l'effetto è quasi totalmente dovuto alla presenza di anidride carbonica.

Il costo dell'inquinamento globale causato dalle macchine è, quindi pari a 4.595,79 €. Tale effetto è superiore all'inquinamento locale. È bene considerare anche in questo caso come gli stessi autori del rapporto considerano i valori difficilmente quantificabili. Si è deciso, anche per questioni di coerenza, di utilizzare la stessa fonte per i due inquinanti.

Ciò che si evince, perciò, è che i danni economici superiori sono quelli relativi al surriscaldamento globale.

In aggiunta, anche in questo caso si è scelto di effettuare una valutazione in termini di autovetture. Qui, come nel caso precedente, si sono utilizzati i parametri inseriti nell'*Update of the handbook on external costs of transport (2014)*. Seguendo il procedimento analogo al precedente, si sono trovati i valori di c% e n%. (*Appendice D.3, Secondo metodo*).

Di seguito i risultati nel grafico (*Figura 17*):

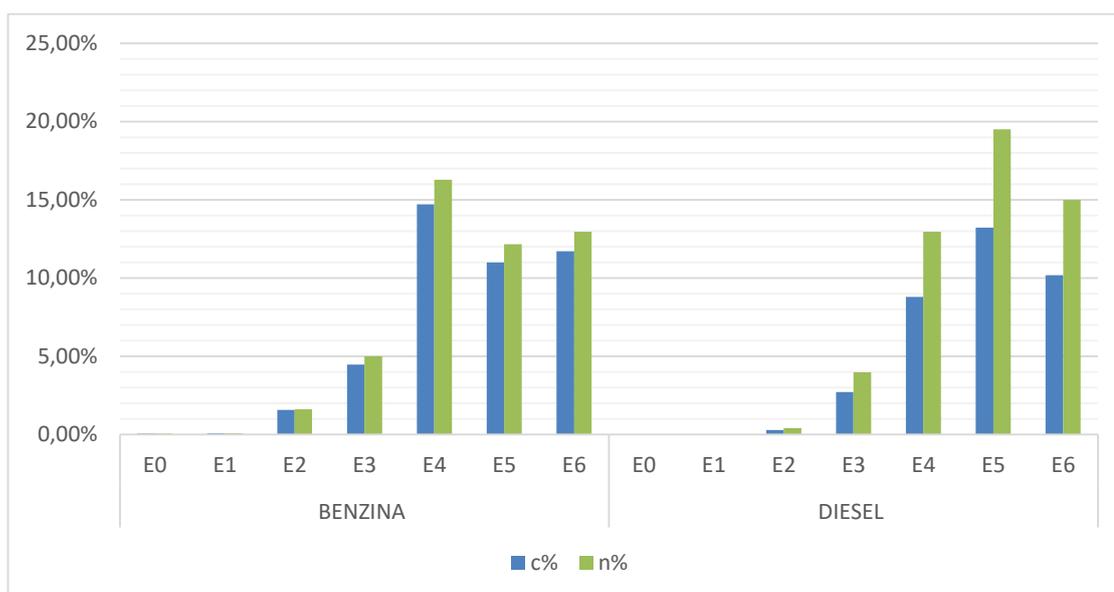


Figura 17: valutazione congiunta dei costi e degli ingressi per le diverse classi veicolari

Come si evince dal grafico, l’impatto delle singole categorie non varia molto. Si può constatare un miglioramento degli Euro diesel più recenti, in quanto si ha un aumento del numero di veicoli superiore all’aumento dei costi, ma non si evidenziano grosse differenze come nel caso precedente.

In conclusione, quindi, quando si vogliono limitare i danni dei gas serra, non si identifica una sistematica categoria da colpire, come poteva essere fatto precedentemente quando si trattavano gli inquinanti locali. Alle auto benzina è associato un costo maggiore in termini di danni economici generati. Questo perché è la produzione di CO₂ è superiore per le auto che utilizzano tale combustibile. Ma tale differenza non è marcata: si vedrà successivamente quali sono le conseguenze di tali circostanze.

6.5 Applicazione del Road Pricing a Torino

Nel precedente paragrafo si sono studiate le esternalità in base alla situazione attuale e si è cercato di valutare l’impatto di queste, circoscrivendo il discorso alla zona centrale di Torino, dove si hanno dati sugli ingressi. Ora, in base anche alle esperienze precedentemente descritte si cerca di valutare le diverse strade perseguibili. L’ipotesi vede l’applicazione di una *cordon toll* principalmente per due motivi: in *primis* è il modello utilizzato dalle principali città che hanno optato per una politica di questo tipo; in *secundis* tale applicazione è quella che verrebbe perseguita anche dalla città di Torino per motivi tecnologici e gestionali. È infatti presente già un sistema di

monitoraggio e controllo della Z.T.L., ragion per cui il perimetro del cordone rimarrebbe comunque quello già presente anche qualora si passasse ad una politica di *Road Pricing*.

6.5.1 Congestion Charge a Torino

La prima tipologia che si analizza è quella della *congestion charge*. Questo tipo di tassazione ha, come visto, lo scopo di limitare il problema della congestione, tema importante per le città di grandi dimensioni. Dalle stime precedenti si è visto come l'impatto economico della congestione non sia da sottovalutare, anche se, in aggregato, l'impatto dell'inquinamento locale e globale risulta superiore.

Considerando le valutazioni riportate nel *Paragrafo 6.3.1*, Torino, come si è analizzato, non soffre di problemi di congestione nella zona centrale per questi motivi:

- Estensione limitata: l'area circoscritta dalla Z.T.L. è un'area contenuta, se paragonata al perimetro delle città descritte precedentemente. Inoltre, molte vie del centro sono ristrette, con molti sensi unici e intersezioni semaforiche. Questo, perciò, scoraggia molti individui ad attraversare tale zona. Come si è visto, anche nelle ore in cui i divieti di transito non sono imposti, non si raggiungono livelli di congestione considerevoli.
- Z.T.L. attuale: la regolamentazione messa in atto modifica già il comportamento degli individui e infatti si registrano bassi livelli di traffico al mattino nelle ore in cui il divieto è in vigore.

Il traffico, per tali motivazioni, si concentra nel perimetro del cordone, dove si rileva un flusso di veicoli superiore.

La tassa, per rispondere in maniera efficiente al problema della congestione, dovrebbe variare in base ai volumi di traffico. Un'approssimazione, poiché tale requisito è difficilmente verificabile a meno di utilizzare tecnologie innovative molto costose, richiede per lo meno la variazione del prezzo nell'arco della giornata. Nelle ore di punta il traffico è superiore e i costi sociali generati dal singolo individuo sono, perciò, anch'essi superiori. È necessario imporre tasse superiori in tali momenti della giornata per ottenere delle soluzioni il più efficienti possibili. Il problema principale è, però, che non si ha una chiara identificazione delle ore più trafficate, poiché la situazione attuale è già distorta. Servirebbe, quindi, una fase di azzeramento per comprendere il comportamento degli individui in assenza di alcun vincolo e solo dopo effettuare una valutazione. In alternativa, si possono utilizzare le suddivisioni temporali di altre città e valutare se i risultati ottenuti siano quanto meno soddisfacenti.

Un tema molto importante è sicuramente la fase di monitoraggio e controllo: come detto a livello teorico, una volta che si impone una tassa, è necessario che col tempo la tassa venga calibrata in modo da raggiungere i target prefissati. In tema di congestione, il controllo deve avvenire non solo nelle zone centrali, ma anche in tutte le zone fuori dal cordone, soprattutto quelle più prossime. Infatti, il comportamento degli individui a seguito dell'introduzione muterà: alcuni cambieranno modalità di trasporto, qualcuno cambierà percorso e qualcuno cambierà anche i luoghi da visitare. Tali effetti sono difficilmente prevedibili. Cambieranno i percorsi e i livelli di traffico sia all'interno che all'esterno dell'area circoscritta. La valutazione deve essere fatta a livello complessivo: se, infatti, tale fenomeno non ha generato ulteriormente congestione al cordone, l'iniziativa non ha peggiorato la situazione attuale. Ma è possibile che i veicoli al cordone aumentino. C'è un elevato rischio che questo accada, dovuto anche al perimetro molto ristretto della Z.T.L. Molti saranno portati a modificare il loro tragitto per evitare la tassa: in tali casi, quindi, seguendo una valutazione degli impatti a livello economico, può essere identificato il beneficio o meno della nuova politica. Benefici positivi si registreranno nelle zone dove si è assistito a una diminuzione del traffico, viceversa, i negativi saranno nelle zone di aumento del flusso di veicoli. Il bilancio finale da questi due trend opposti può dare una risposta sulla riuscita o meno di tale iniziativa.

È bene, però, non concentrarsi su un unico ambito, ma valutare i risultati complessivi. Un aumento di congestione in alcune zone, come possono essere quelle al confine della zona soggetta a tassazione, può ritenersi comunque un risultato soddisfacente qualora si registri una diminuzione del numero di veicoli transitanti in Torino. Riducendosi i veicoli, si riduce il traffico, per esempio, anche nelle strade di accesso alla città. Inoltre, una riduzione del numero di autovetture genera un beneficio anche in termini di inquinamento. Molte città hanno optato per la *congestion charge* proprio perché tale iniziativa, riducendo i mezzi transitanti, ha effetto anche sulla qualità dell'aria.

In conclusione, quindi, se pur la situazione attuale non registra notevoli valori di congestione nella zona interna, è possibile ottenere dei miglioramenti. La riuscita certa però è difficilmente identificabile poiché è difficoltoso stimare il comportamento degli individui e la loro elasticità al variare della tassa. Questo tema non è stato preso in considerazione in questa sede, ma si può provare a fornire delle stime basandosi sui casi in cui si è già optato per una politica di questo tipo.

È sempre bene, anche qualora si optasse per una *congestion charge*, valutare gli effetti sull'inquinamento, così da stimare complessivamente i benefici o meno dell'iniziativa in questione e, ove necessario, porre delle modifiche.

6.5.2 Pollution Charge a Torino

Visti i problemi crescenti in tema di inquinamento che la città deve affrontare, si può ipotizzare l'inserimento di una *pollution charge*. La tariffa, perciò, varia in base alla classe inquinante del veicolo.

Precedentemente si sono analizzate le classi veicolari; in tema di inquinamento globale, le differenze tra le diverse categorie non erano così rilevanti da preferire una classe di veicoli rispetto a un'altra. Le maggiori differenze riscontrate erano relative all'inquinamento locale. In particolar modo, si è visto che le autovetture a gasolio generano livelli nettamente superiori in termini di emissione e le diesel euro 4 sono quelle maggiormente inquinanti, considerando anche il numero di veicoli di tale tipologia.

Una discriminazione di prezzo corretta, quindi, prevede una prima distinzione tra auto benzina e auto diesel e una seconda divisione che considera, invece, il tipo legislativo. I prezzi delle tariffe devono essere quindi decrescenti all'aumentare del tipo legislativo, mantenendo comunque una tariffa alta almeno fino alle diesel Euro 4. Per le auto gpl e metano si può prevedere una tariffa molto bassa, mentre per le elettriche, che sono rimaste fuori da tale analisi per il loro impatto ambientale trascurabile, si può ipotizzare un ingresso gratuito. Per quest'ultime, infatti, si è scelto di rendere l'ingresso agevolato anche nell'attuale Z.T.L. proprio per le loro caratteristiche ecologiche. Qua si presenta, quindi, una netta differenza tra *pollution charge* e *congestion charge*: la prima, infatti, rende l'ingresso alle auto elettriche gratuito per il loro trascurabile impatto ambientale, viceversa la seconda non attua delle differenze tra categorie di veicoli, in quanto tutte contribuiscono a creare congestione in egual modo.

Gli effetti dell'applicazione di una *pollution charge* sarebbero molteplici: in un primo momento si assisterebbe a una riduzione degli ingressi per le categorie più colpite, le quali o modificherebbero il loro modo di trasporto, passando per esempio ai mezzi pubblici, o cambierebbero percorso. L'effetto, quindi, può ritenersi simile a quello della

congestione, diverso solo nella classe veicolare che viene colpita da tale regolamentazione.

Un secondo effetto, però, che si verificherebbe sul lungo periodo, è il cambiamento del parco auto torinese. Infatti, questa tassazione incentiva gli individui a passare ad auto più ecologiche, in quanto a queste è permesso l'ingresso a tariffe più agevolate. Le emissioni, quindi, si ridurrebbero anche grazie a questo fenomeno. L'aspetto negativo è che tale criterio può portare a un aumento della congestione, se molti individui acquisiscono auto più ecologiche e meno tassate. Nel lungo termine è, quindi, bene monitorare la situazione e, se si assiste a un peggioramento della congestione, si può ipotizzare anche un passaggio alla *congestion charge*, proprio come ha optato Milano.

Colpendo un gruppo di veicoli più ristretto, il rischio è che i benefici, in termini di congestione, siano scarsamente rilevanti. Nel caso contrario invece, con la *congestion charge* si è assistito sempre sia a una riduzione delle emissioni che della congestione. È vero²⁶, però, che il problema maggiore per Torino in questo momento è l'inquinamento e non la congestione, perciò è necessario intervenire in questo fronte. Le soluzioni possono essere appunto una tassazione più pressante per determinate categorie o, in alternativa, una netta limitazione sul transito.

In conclusione, anche in tale contesto è bene controllare sempre sia la congestione sia l'inquinamento. In aggiunta, questi sono aspetti tra loro correlati. È infatti noto che in situazioni di coda le prestazioni delle autovetture peggiorino, generando quindi un impatto negativo sulle emissioni. Mantenere sotto controllo il livello di traffico è, perciò, importante anche quando si tratta il tema dell'inquinamento.

Solo fornendo una stima complessiva si possono trarre delle conclusioni e delle azioni correttive, che in questo caso riguarderanno soprattutto una revisione dello schema di diversificazione di prezzo per cui si è optato.

6.5.3 Congestion Pollution Charge a Torino

La *congestion pollution charge* è l'ultima alternativa percorribile. Qui si opera una duplice suddivisione. La prima differenza nell'arco della giornata, la seconda partiziona le tariffe in base alla classe veicolare.

²⁶<http://www.lastampa.it/2017/02/21/tecnologia/palermo-la-citt-pi-trafficata-ditalia-GSziKrCL6MJFCYDaRdeDsJ/pagina.html>. In tale articolo del 2016 si descrivono i livelli di traffico in Italia e nel resto del mondo e si vede come Torino non rientri tra le aree più congestionate d'Italia.

L'idea di fondo è quella di voler avvicinarsi il più possibile alla linea teorica delle esternalità. Volendo, infatti, far pagare ogni individuo per il danno generato su terzi individui, il costo sociale dipende da entrambi i fattori. Dal punto di vista teorico, tale linea è quella più corretta.

Gli aspetti negativi, che hanno spinto poche città ad applicare tale tipologia è la difficoltà di implementazione e, soprattutto, di controllo. Qui si prevede una discriminazione di prezzo complessa, che deve essere supportata da un sistema di controllo altrettanto avanzato. Il problema fondamentale riguarda, però, la fase di monitoraggio e di controllo dei risultati ottenuti. In fase di revisione, infatti, si possono effettuare stime precise sul comportamento degli individui al variare dello schema tariffario, così da raggiungere risultati migliori. Se però si è in presenza di uno schema tariffario così complesso, gli aggiustamenti messi in atto avranno efficacia inferiore.

In genere, infatti, una suddivisione duplice di questo tipo si raggiunge col tempo, si opta per una delle due alternative, si valutano i risultati e solo in un secondo momento si cerca di discriminare ulteriormente. In tale modo si ha un controllo maggiore sulle variabili in questione e si lascia anche il tempo all'opinione pubblica di comprendere i benefici che vengono raggiunti.

7. Conclusioni

L'obiettivo della tesi è stato quello di analizzare le esternalità e valutare le diverse metodologie messe in atto per migliorare il benessere collettivo, principalmente tramite la riduzione di congestione e inquinamento.

Da ultimo, si è cercato di valutare una possibile applicazione del *Road Pricing* alla città di Torino.

Una prima considerazione importante da fare riguarda la stima della variazione della domanda. Come discusso precedentemente, è difficile riuscire a prevedere il comportamento degli individui, ma è possibile comunque provare a ipotizzare degli scenari futuri, basandosi anche sulle esperienze già avvenute in altre città. In particolare, ripartendo la popolazione in categorie si sono valutati gli impatti nelle diverse classi. La suddivisione operata ha individuato gli utenti in coloro che 1) entrano in Z.T.L. e pagano il parcheggio, 2) sostano senza pagare, oppure 3) attraversano la Z.T.L. per raggiungere un luogo al di fuori di essa. A queste tre classi di individui attribuiamo un comportamento differente, specialmente il terzo gruppo subirà l'influenza maggiore: pochi, infatti, saranno disposti a pagare per il semplice attraversamento. La valutazione, quindi, ha identificato elasticità diverse nei tre gruppi e si sono analizzati opportunamente i diversi risultati ottenuti.

I parcheggi sono un altro aspetto di cui tener conto in uno studio completo. È importante valutare i flussi di entrata e uscita in questi e valutarne il riempimento lungo la giornata. È bene concentrare l'analisi anche e soprattutto sui parcheggi esterni al cordone. Uno scenario plausibile vede l'aumentare del numero di individui che, anziché parcheggiare all'interno, decideranno di non pagare l'ingresso e sostare al di fuori della Z.T.L. Determinando il volume e il riempimento dei parcheggi nella situazione attuale, si può prevedere se gli spazi disponibili saranno sufficienti a contenere il nuovo volume di autovetture.

In base alla situazione attuale, esistono una serie di permessi che concedono a diverse categorie di individui di entrare nelle ore di attivazione della Z.T.L. Valutando il numero di ingressi suddivisi per le varie tipologie di permesso, è verosimile anche determinare l'effetto sulle diverse categorie. Molte di queste, come i residenti, non verranno intaccate dalla nuova regolamentazione, continuando quindi a poter entrare secondo le regole attuali.

Lo studio completo si è concentrato anche sul commercio. Come già detto precedentemente, la nuova *policy* genererà sicuramente dei cambiamenti sugli individui che entrano e, quindi, sulle attività commerciali. Operando una suddivisione di queste, si può valutare quali verranno intaccate maggiormente. Infatti, alcune attività sono caratterizzate da una clientela che proviene anche da zone distanti, altre invece, per esempio quelle che vendono prodotti poco differenziati, tendono ad attrarre consumatori più prossimi al negozio. Alcune categorie di negozi sono anche più compatibili con gli spostamenti che utilizzano i mezzi pubblici: tale gruppo sarà meno intaccato e, anzi, potrà trarne dei benefici, poiché il *Road Pricing* incentiva l'uso del trasporto pubblico.

Infine, si presenta un ultimo tema, che per mancanza di dati a riguardo non è stato possibile affrontare ma che in futuro, con la nuova tecnologia che si sta cercando di applicare, potrà essere analizzato. Esso riguarda il riempimento dei mezzi pubblici. Ora non si hanno dati sul riempimento di autobus e altri mezzi, si può solo fare un'analisi qualitativa. Con l'inserimento del nuovo servizio *BIP*, che fa uso di una *smartcard*, si potranno avere informazioni sul flusso di utenti che usufruiscono dei trasporti pubblici. Se si ipotizza, come plausibilmente sarà, un aumento del numero di utenti con la nuova ipotetica tassazione, è importante prevedere se l'attuale offerta è sufficiente o se è necessario ampliare il numero di mezzi e corse. Spesso, nelle altre realtà di *Road Pricing*, l'aumento di offerta di servizi si è realizzato in un secondo momento, grazie ai guadagni che derivano dall'imposizione dell'imposta. Questo ha portato anche la popolazione a vedere più concretamente i benefici che ne scaturiscono: se prima infatti molti erano in disaccordo, successivamente si è ottenuto il consenso della maggioranza.

Proprio su questo tema si conclude questo *excursus* generale. Molto discutere ha fatto e farà l'introduzione di una tariffa di accesso all'area Z.T.L., non essendoci certezze degli effetti, né in termini di efficienza, e né in termini distributivi. Per tale motivo, è importante optare per un approccio graduale, il quale ha due aspetti positivi. In *primis*, iniziare con una fase di *testing* prima dell'approvazione definitiva permette di far percepire a tutti gli effetti favorevoli di tale introduzione, principalmente la riduzione di congestione, che è la più tangibile, ma anche la diminuzione dell'inquinamento, tema di indubbia importanza per il capoluogo piemontese. In aggiunta, se i guadagni vengono utilizzati in investimenti sui sistemi trasportici, diventa ancora più evidente il beneficio di tale iniziativa. Come analizzato in precedenza, in diverse città si è

chiesto tramite referendum l'approvazione definitiva e sia a Milano che a Stoccolma i voti sono risultati maggiormente favorevoli. Questo, quindi, a riprova del fatto che è possibile ottenere dei benefici percepiti dalla collettività.

Tutte queste considerazioni dipendono ovviamente da città a città. Non è possibile dire con certezza che, siccome in altre realtà ha funzionato, così sarà anche per Torino. Proprio per questo, un approccio graduale permette anche di monitorare i risultati ottenuti e valutare il miglioramento effettivo del benessere collettivo.

APPENDICE A

Si consideri il caso di due consumatori: $i = 1, 2$

Si ipotizzi vi siano L beni sul mercato e sia quindi disponibile il vettore \mathbf{p} dei prezzi di questi. I consumatori sono *price takers*, quindi le loro decisioni non influenzano il vettore dei prezzi. Il consumatore i ha inoltre una disponibilità iniziale w_i .

La funzione di utilità del consumatore i dipende oltre che dagli L beni anche dal valore di h , il quale rappresenta l'esternalità, poiché rappresenta un bene che impatta la funzione obiettivo ma a cui non corrisponde un esborso monetario.

L'utilità sarà quindi: $u_i(x_1^i, \dots, x_L^i, h)$

Poiché si tratta di un'esternalità, il valore di h impatta anche la funzione obiettivo del consumatore 2, infatti: $\frac{\partial u_2}{\partial h} \neq 0$

Si ipotizza a questo punto che la funzione di utilità del singolo individuo sia quasi lineare: se così non fosse, il livello ottimo di h dipenderebbe dalla disponibilità iniziale w_i , complicando ulteriormente l'analisi. In caso di preferenze quasi lineari, la funzione di utilità indiretta diventa: $v_i(\mathbf{p}, w_i, h) = \phi_i(\mathbf{p}, h) + w_i$

Si assume $\phi_i(\mathbf{p}, h)$ differenziabile due volte, con $\phi_i''(\cdot) < 0$. In questo modo, il consumatore 1 può scegliere il livello di ottimo di h nel punto dove massimizza la sua utilità, e in base alle ipotesi appena espresse questa condizione si verifica dove $\frac{\partial v_1}{\partial h} = 0$, a cui corrisponde $\frac{\partial \phi_1}{\partial h} = 0$ poiché è l'unica componente dipendente da h . Scritto in maniera compatta è $\phi'_1(h^*) = 0$

Il problema è che il livello di h impatta anche l'utilità del consumatore 2, che non è stato preso in considerazione per determinare il livello ottimo.

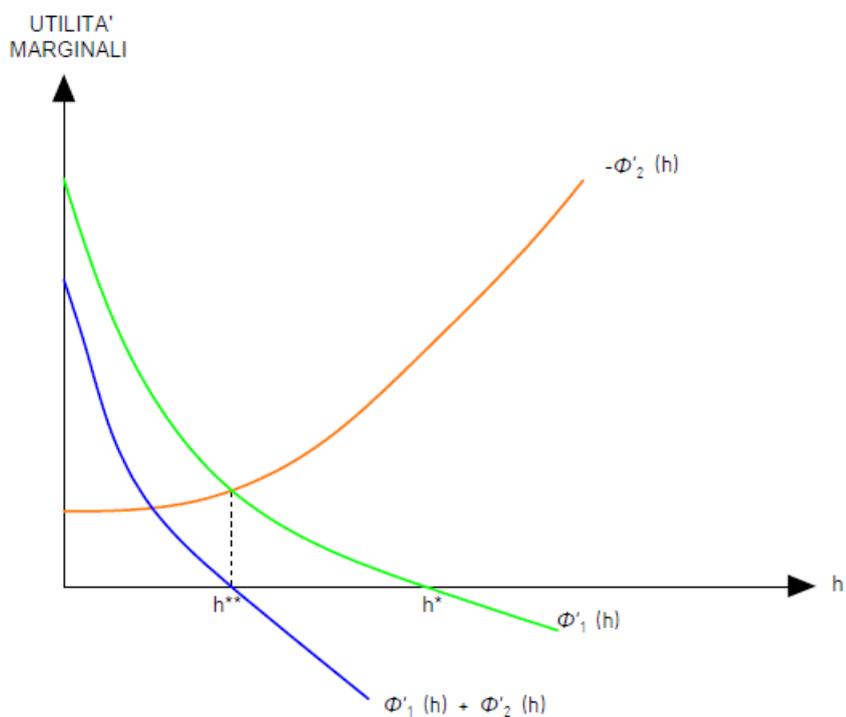
Se l'obiettivo fosse quindi quello di massimizzare l'ottimo sociale, allora si cercherebbe di massimizzare la funzione di utilità complessiva, intesa come somma delle singole utilità poiché abbiamo ipotizzato una forma quasi lineare:

$$\max_h \phi_1(h) + \phi_2(h)$$

Scritto in maniera compatta risulta $\phi'_1(h^{**}) + \phi'_2(h^{**}) = 0$. In questo secondo caso quindi la soluzione ottima è il quel punto dove $\phi'_1(h^{**}) = -\phi'_2(h^{**})$

Di seguito si rappresentano le due soluzioni a confronto in un grafico, valutando la presenza di esternalità negativa.

Figura I-A: Rappresentazione delle due soluzioni in caso di massimizzazione benessere individuale o collettivo



Dal grafico si evince come passando dalla soluzione ottima individuale ad una soluzione ottima sociale, il consumo di h va a diminuire. Nel caso individuale infatti h è nel punto di massimizzazione dell'utilità marginale (livello 0), indicata come h^* . Nel caso collettivo invece, h è nel punto dove il benessere marginale del consumatore 1 è pari al costo marginale ($-\phi'_2(h)$) del consumatore 2, indicata invece in questo caso come h^{**} .

APPENDICE B

Di seguito è presente la tabella degli ingressi medi nei giorni feriali, suddivisi in due categorie: mezzi privati e mezzi pubblici. La media è stata calcolata prendendo gli ingressi registrati in gennaio, febbraio, marzo e aprile 2018. Per operare una suddivisione tra mezzi privati e pubblici, invece, si è potuto fare l'analisi solo di un unico giorno feriale scolastico, per questioni di privacy. Questa analisi infatti richiede informazioni dettagliate sulla tipologia di permessi dei diversi veicoli. Da questo giorno si è estratta la percentuale di mezzi pubblici rispetto al totale degli ingressi in ogni arco temporale; tale percentuale poi è stata utilizzata per la media dei giorni feriali scolastici 2018.

Tabella I-B: Ingressi medi del 2018 (gennaio, febbraio, marzo, aprile), suddivisi in mezzi privati e mezzi pubblici.

<i>ORE</i>	<i>MEZZI PRIVATI</i>	<i>MEZZI PUBBLICI</i>
<i>00:00/00:30</i>	626,53	19,08
<i>00:30/01:00</i>	426,22	12,58
<i>01:00/01:30</i>	295,21	11,28
<i>01:30/02:00</i>	231,00	2,95
<i>02:00/02:30</i>	199,52	0,00
<i>02:30/03:00</i>	173,49	0,00
<i>03:00/03:30</i>	152,04	1,51
<i>03:30/04:00</i>	141,43	1,91
<i>04:00/04:30</i>	145,46	1,97
<i>04:30/05:00</i>	175,52	12,54
<i>05:00/05:30</i>	219,74	42,53
<i>05:30/06:00</i>	341,81	43,86
<i>06:00/06:30</i>	577,12	52,14
<i>06:30/07:00</i>	1.150,29	80,31
<i>07:00/07:30</i>	1.629,41	96,71
<i>07:30/08:00</i>	2.146,57	111,11
<i>08:00/08:30</i>	2.315,15	93,07
<i>08:30/09:00</i>	2.366,27	90,22
<i>09:00/09:30</i>	1.896,13	94,43
<i>09:30/10:00</i>	1.603,86	100,12
<i>10:00/10:30</i>	2.436,32	149,95
<i>10:30/11:00</i>	3.349,03	90,16
<i>11:00/11:30</i>	2.949,09	89,61
<i>11:30/12:00</i>	2.840,79	83,98
<i>12:00/12:30</i>	2.793,43	77,19
<i>12:30/13:00</i>	2.792,30	91,50
<i>13:00/13:30</i>	2.589,47	67,72

ORE	MEZZI PRIVATI	MEZZI PUBBLICI
13:30/14:00	2.501,16	74,59
14:00/14:30	2.701,94	83,27
14:30/15:00	2.956,13	94,93
15:00/15:30	2.975,35	89,81
15:30/16:00	2.987,29	84,21
16:00/16:30	3.103,59	94,19
16:30/17:00	3.148,85	78,10
17:00/17:30	3.305,87	72,93
17:30/18:00	3.514,06	64,85
18:00/18:30	3.541,71	67,11
18:30/19:00	3.517,96	73,42
19:00/19:30	3.427,08	67,75
19:30/20:00	3.225,30	64,64
20:00/20:30	2.819,02	48,97
20:30/21:00	2.087,40	35,80
21:00/21:30	1.540,43	29,24
21:30/22:00	1.322,41	22,96
22:00/22:30	1.260,14	22,59
22:30/23:00	1.257,53	18,80
23:00/23:30	1.200,05	21,98
23:00/00:00	888,03	17,27
TOTALE	89.907,68	2.682,64

Qui di seguito invece è presente una rappresentazione del totale degli ingressi nei quattro mesi analizzati: lo scopo è quello di individuare la presenza di stagionalità o variazione di trend, qualora ci fossero.

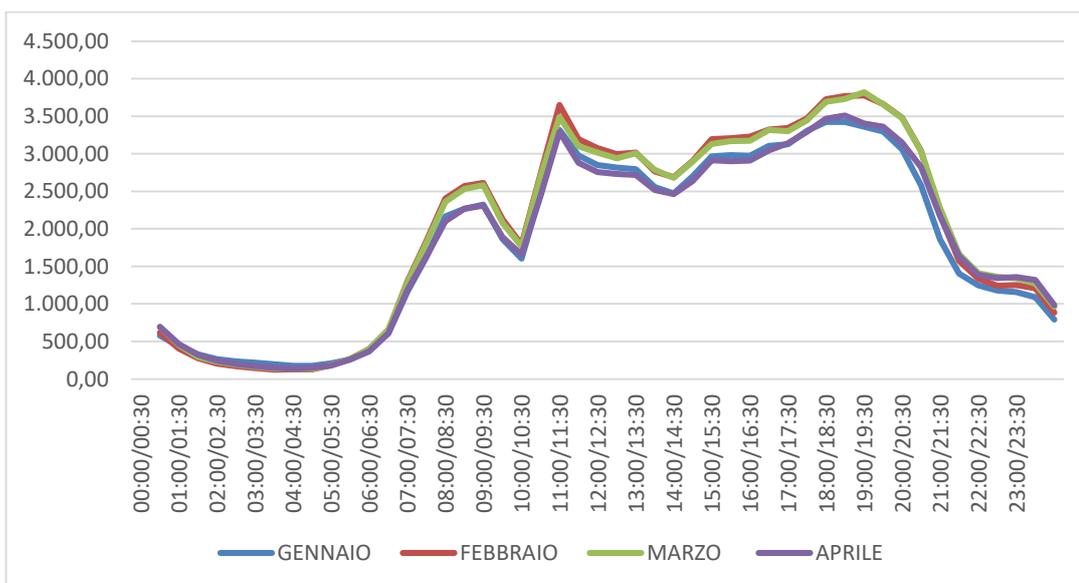


Figura I-B: Ingressi medi divisi per mese (gennaio, febbraio, marzo, aprile)

APPENDICE C

C.1 Analisi per la valutazione della congestione

Qui di seguito si rappresenta il rapporto flusso veicoli e capacità delle diverse strade in ingresso della Z.T.L. Questo ragionamento serve a valutare se il rapporto tra flusso e capacità raggiunge il 75%, soglia importante poiché si ritiene che al di sopra di tale rapporto la strada risulti congestionata. Per questioni di semplicità, si riporta solamente il valore minimo, massimo e medio ottenuto per ogni varco. I dati sui flussi che vengono qui utilizzati sono quelli del 2018 e sono i medesimi utilizzati nell'Appendice B.

Tabella I-C: Valutazione flusso/capacità delle diverse strade in ingresso della Z.T.L.

<i>VARCHI</i>	<i>MIN</i>	<i>MAX</i>	<i>MEDIA</i>
210	2,67%	27,23%	9,85%
211	2,22%	42,42%	17,20%
213	2,57%	19,88%	12,69%
214	1,23%	34,44%	15,09%
283	1,73%	62,38%	25,67%
286	1,98%	40,21%	17,88%
287	3,68%	71,70%	37,87%
288	4,71%	48,92%	24,57%
290	1,30%	40,53%	20,03%
291	2,07%	28,27%	13,83%
429	0,00%	18,53%	8,66%
430	0,00%	14,93%	5,94%
431	0,00%	10,47%	4,25%
432	0,00%	21,18%	10,10%
433	0,49%	45,62%	22,41%
434	0,62%	68,83%	33,32%
435	0,00%	8,51%	3,55%
436	0,00%	14,93%	7,25%
437	0,25%	20,68%	10,49%
438	0,58%	62,30%	31,89%
439	0,00%	31,04%	14,00%
440	0,26%	12,08%	6,37%
441	1,86%	33,06%	15,67%
442	0,37%	45,39%	21,98%
443	0,00%	25,69%	12,27%
445	0,16%	24,02%	11,70%
446	0,22%	40,10%	18,06%
447	0,00%	15,50%	5,24%

448	0,06%	22,27%	9,79%
457	0,33%	49,21%	24,91%
504	2,24%	34,83%	18,05%
MEDIA	1,02%	33,39%	15,83%

C.2 Analisi per la valutazione dell'inquinamento

Di seguito si riportano i valori estrapolati dalle auto immatricolate in Piemonte nel 2017. Tramite un'interrogazione si sono mantenuti i dati relativi solo al capoluogo piemontese.

Tabella II-C: Rappresentazione del parco auto torinese

<i>TIPO ALIMENTAZIONE</i>	<i>TIPO LEGISLATIVO</i>	<i>NUMERO VEICOLI</i>	<i>% SOLO IDENTIFICATE</i>	<i>%SUL TOTALE</i>
<i>BENZINA</i>	E0	23.354	3,70%	3,70%
	E1	10.145	1,61%	1,61%
	E2	44.369	7,03%	7,02%
	E3	46.620	7,38%	7,38%
	E4	85.360	13,52%	13,51%
	E5	39.581	6,27%	6,26%
<i>DIESEL</i>	E6	69.289	10,97%	10,97%
	E0	2.679	0,42%	0,42%
	E1	1.232	0,20%	0,19%
	E2	8.679	1,37%	1,37%
	E3	37.113	5,88%	5,87%
	E4	66.671	10,56%	10,55%
<i>METANO/GPL</i>	E5	59.456	9,42%	9,41%
	E6	87.403	13,84%	13,83%
	E0	50	0,01%	0,01%
	E1	11	0,00%	0,00%
	E2	63	0,01%	0,01%
	E3	470	0,07%	0,07%
	E4	19.308	3,06%	3,06%
	E5	13.162	2,08%	2,08%
E6	16.445	2,60%	2,60%	
<i>NON IDENTIFICATO (DI CUI 187 ELETTRICHE)</i>		378		0,06%
TOTALE		631.838		

Qui invece si riportano i dati estrapolati dall'incrocio tra i dati relativi ai mezzi immatricolati nel Piemonte e quelli transitati nella Z.T.L. Alcuni veicoli non sono stati

identificati perché non fanno parte del parco auto piemontese. Altri ancora non vengono identificati per problemi di lettura delle targhe da parte delle telecamere.

Tabella III-C: Rappresentazione del parco auto (numero veicoli transitati) relativo alla sola Z.T.L nelle 4 fasce indicate.

<i>TIPO ALIMENTAZIONE</i>	<i>TIPO LEGISLATIVO</i>	<i>ORE 24-7.30</i>	<i>ORE 7:30-10:30</i>	<i>ORE 10:30-19:30</i>	<i>ORE 19:30-24:00</i>	<i>TOTALE</i>
<i>BENZINA</i>	E0	1	3	23	7	34
	E1	2	6	36	7	51
	E2	87	55	641	216	999
	E3	241	291	1.901	665	3.098
	E4	679	1.183	6.210	2.024	10.096
	E5	419	1.090	4.569	1.433	7.511
	E6	411	1.124	4.912	1.565	8.012
<i>DIESEL</i>	E0	0	0	3	0	3
	E1	1	0	8	2	11
	E2	50	21	143	28	242
	E3	279	233	1.517	432	2.461
	E4	688	969	4.887	1.421	7.965
	E5	809	1.740	7.316	2.139	12.004
	E6	553	1.259	5.765	1.709	9.286
<i>METANO/GPL</i>	E0	0	0	0	0	0
	E1	0	0	0	0	0
	E2	0	0	4	0	4
	E3	4	24	52	6	86
	E4	223	376	1.825	605	3.029
	E5	168	280	1.395	476	2.319
	E6	142	238	1.356	458	2.194
NON IDENTIFICATO		1.285	2.848	12.170	3.753	20.056
TOTALE		6.042	11.740	54.733	16.946	89.461

Dalla tabella precedente, si sono estrapolate le percentuali di auto per ogni classe veicolare e tale percentuale è stata poi applicata al flusso medio degli ingressi. Non è stato possibile, per questioni inerenti la privacy, ottenere ulteriori rilevazioni. Per la valutazione della partizione dei veicoli, si è tenuto anche conto, stornando tale valore dal totale, del numero di mezzi pubblici e mezzi pesanti presenti. Lo scopo infatti era di restringere le valutazioni alle sole autovetture. Di seguito sono presenti i dati utilizzati per la valutazione dell'andamento giornaliero per le diverse classi veicolari.

Tabella IV-C: Dati sull'andamento dei flussi delle autovetture suddivise per tipo di combustibile

ORE	BENZINA	DIESEL	METANO/GPL
00:00/00:30	300,53	260,80	65,20
00:30/01:00	177,26	199,17	49,79
01:00/01:30	118,34	135,25	41,62
01:30/02:00	95,40	109,78	24,83
02:00/02:30	100,64	81,22	17,66
02:30/03:00	67,36	75,78	21,05
03:00/03:30	71,89	65,15	8,99
03:30/04:00	70,71	61,87	8,84
04:00/04:30	43,93	79,07	20,50
04:30/05:00	51,86	105,71	17,95
05:00/05:30	74,24	120,27	25,24
05:30/06:00	124,57	165,59	51,65
06:00/06:30	194,12	322,61	54,47
06:30/07:00	419,81	576,12	135,47
07:00/07:30	565,21	872,18	180,28
07:30/08:00	868,75	1.028,47	229,88
08:00/08:30	988,41	1.047,06	267,07
08:30/09:00	1.048,23	1.059,67	242,68
09:00/09:30	775,68	909,73	200,43
09:30/10:00	646,23	798,58	140,93
10:00/10:30	1.005,72	1.194,30	211,02
10:30/11:00	1.307,36	1.677,65	354,39
11:00/11:30	1.167,66	1.479,66	290,58
11:30/12:00	1.209,01	1.327,85	297,09
12:00/12:30	1.149,66	1.358,18	280,37
12:30/13:00	1.188,92	1.298,91	302,47
13:00/13:30	1.116,66	1.194,95	275,96
13:30/14:00	1.087,92	1.114,42	288,88
14:00/14:30	1.096,51	1.255,39	344,70
14:30/15:00	1.197,43	1.435,30	316,25
15:00/15:30	1.178,70	1.511,61	278,77
15:30/16:00	1.344,46	1.337,81	301,87
16:00/16:30	1.374,12	1.376,53	351,97
16:30/17:00	1.382,61	1.415,14	349,09
17:00/17:30	1.515,35	1.442,34	347,14
17:30/18:00	1.625,62	1.520,38	364,00
18:00/18:30	1.573,36	1.542,56	424,78
18:30/19:00	1.579,18	1.512,12	422,63
19:00/19:30	1.492,60	1.550,41	384,07
19:30/20:00	1.500,18	1.331,58	392,58
20:00/20:30	1.276,74	1.212,57	329,70
20:30/21:00	852,66	1.000,53	234,21
21:00/21:30	681,77	665,80	192,86
21:30/22:00	638,99	555,36	128,06
22:00/22:30	572,79	528,73	158,62
22:30/23:00	532,46	581,34	142,69
23:00/23:30	533,60	525,97	138,48
23:30/00:00	411,81	367,00	107,72
Totale complessivo	38.397,06	41.388,47	9.815,45
	TOTALE		89.600,99

Tabella V-C: dati sull'andamento dei flussi delle autovetture suddivise per tipo legislativo

ORE	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6
00:00/00:30	0,00	0,00	8,15	53,99	231,26	176,24	156,89
00:30/01:00	0,00	1,00	10,95	41,83	131,45	146,39	94,60
01:00/01:30	0,00	0,00	5,20	27,31	102,74	89,73	70,23
01:30/02:00	0,00	0,00	7,84	33,98	81,03	61,42	45,74
02:00/02:30	0,00	0,00	3,53	28,25	67,10	47,67	52,97
02:30/03:00	0,00	0,00	4,21	25,26	65,26	37,89	31,58
03:00/03:30	0,00	0,00	6,74	20,22	56,16	35,94	26,96
03:30/04:00	0,00	0,00	5,89	26,52	35,36	47,14	26,52
04:00/04:30	0,00	0,00	5,86	5,86	46,86	55,64	29,28
04:30/05:00	0,00	0,00	7,98	15,96	49,86	67,81	33,91
05:00/05:30	1,48	1,48	8,91	19,30	74,24	69,78	44,54
05:30/06:00	0,00	0,00	21,27	34,94	138,24	94,19	53,17
06:00/06:30	0,00	0,00	26,53	72,62	215,07	136,86	120,10
06:30/07:00	0,00	0,00	35,73	133,98	376,63	320,06	264,98
07:00/07:30	0,00	1,22	36,54	180,28	481,16	497,00	421,47
07:30/08:00	0,00	1,49	5,97	126,88	609,02	738,89	644,85
08:00/08:30	0,00	1,25	18,72	147,26	680,16	743,80	711,36
08:30/09:00	2,54	1,27	12,71	141,03	681,03	799,20	712,80
09:00/09:30	0,00	1,30	16,92	121,04	534,91	696,29	515,39
09:30/10:00	1,27	0,00	15,24	97,76	405,00	592,91	473,56
10:00/10:30	0,00	4,49	49,39	143,67	693,68	871,03	648,78
10:30/11:00	2,27	3,41	77,24	283,96	983,65	1.075,65	913,22
11:00/11:30	1,34	5,36	61,60	285,22	862,35	903,86	818,16
11:30/12:00	1,29	1,29	52,96	281,59	888,68	848,64	759,51
12:00/12:30	1,41	1,41	54,95	193,02	876,33	863,65	797,44
12:30/13:00	2,62	5,24	34,04	222,59	860,26	878,59	786,94
13:00/13:30	0,00	1,28	46,21	163,01	790,64	844,55	741,87
13:30/14:00	0,00	1,33	39,75	206,72	805,67	763,27	674,48
14:00/14:30	1,42	1,42	55,32	204,27	754,65	905,01	774,51
14:30/15:00	2,70	9,46	50,01	229,76	909,56	893,35	854,15
15:00/15:30	1,35	4,06	51,42	231,41	952,71	948,65	779,49
15:30/16:00	2,66	1,33	67,82	268,63	889,65	941,52	812,52
16:00/16:30	4,82	2,41	50,63	282,06	945,01	975,15	842,55
16:30/17:00	1,25	5,00	50,05	236,48	933,42	932,17	988,47
17:00/17:30	0,00	1,28	67,89	301,02	1.010,66	1.010,66	913,31
17:30/18:00	2,48	2,48	74,29	278,57	1.062,29	1.058,57	1.031,33
18:00/18:30	1,28	1,28	56,47	283,61	1.069,01	1.144,73	984,31
18:30/19:00	5,06	5,06	59,47	251,81	1.061,65	1.074,30	1.056,58
19:00/19:30	1,28	3,85	65,51	268,46	1.019,90	1.073,85	994,21
19:30/20:00	1,23	2,46	54,15	254,75	952,54	1.031,30	927,92
20:00/20:30	1,11	2,21	48,68	233,44	803,22	914,96	815,39
20:30/21:00	4,32	3,24	53,97	151,10	609,81	673,49	591,47
21:00/21:30	0,00	1,23	27,03	120,38	485,22	441,00	465,57
21:30/22:00	0,00	1,31	31,36	124,14	442,98	377,64	344,98
22:00/22:30	0,00	0,00	17,62	109,52	439,35	352,49	341,16
22:30/23:00	0,00	0,00	26,42	121,55	401,65	365,98	340,88
23:00/23:30	1,27	0,00	15,25	115,61	370,98	362,08	332,86
23:00/00:00	0,00	0,00	13,35	78,17	291,70	256,43	246,89
Totale complessivo	46,46	80,90	1.617,72	7.278,81	27.229,77	28.237,45	25.109,88
					TOTALE		89.600,99

Per la analisi delle emissioni si è utilizzata la tabella seguente. Essa rappresenta le emissioni, suddivise dei diversi inquinanti, per ognuna delle categorie sotto elencate. Il dato è stato estrapolato da un'analisi di Arpa Lombardia.

Ecco la tabella utilizzata:

Tabella VI-C: Emissioni delle diverse categorie di autovetture

Combustibile	Tipo legislativo	Consumo specifico	SO2	NOx	COV	CH4	CO	CO2	N2O	NH3	PM2.5	PM10	PTS
		g/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	g/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
benzina verde	Euro 0	62	1	2.084	1.621	122	12.363	190	8	2	16	27	40
	Euro 1	59	1	712	588	26	5.831	183	15	103	16	27	40
	Euro 2	57	1	359	157	35	2.068	174	8	149	16	27	40
	Euro 3	58	1	80	15	24	1.131	177	3	23	14	26	39
	Euro 4	59	1	50	10	18	363	183	2	24	14	26	39
	Euro 5	58	1	26	3	18	355	178	1	10	15	26	39
	Euro 6	59	1	30	4	18	322	180	1	10	15	26	39
diesel	Euro 0	61	1	688	159	19	662	185	0	1	226	238	251
	Euro 1	62	1	680	62	11	412	185	3	1	84	96	109
	Euro 2	61	1	723	58	5	316	182	5	1	65	76	89
	Euro 3	57	1	782	25	1	100	171	8	1	49	61	74
	Euro 4	51	1	578	8	1	93	155	8	1	49	60	73
	Euro 5	53	1	619	11	1	48	158	8	2	16	28	41
	Euro 6	64	1	215	11	1	61	192	7	2	15	27	40
metano/GPL	Euro 0	57	0	2.344	1.234	54	6.194	170	1	9	16	27	40
	Euro 1	57	0	442	679	59	3.541	168	20	21	16	27	40
	Euro 2	57	0	169	167	23	2.247	168	10	28	16	27	40
	Euro 3	58	0	97	32	24	1.202	170	4	13	14	26	39
	Euro 4	56	0	66	32	11	479	168	4	12	14	26	39
	Euro 5	57	0	35	21	16	579	168	1	10	15	26	39
	Euro 6	57	0	40	22	18	507	168	1	10	15	26	39

Fonte: Inemar Arpa Lombardia, "Inventario sulle emissioni in atmosfera, anno 2014".

Con l'utilizzo di tale tabella e dei dati precedentemente presentati, è stato possibile ricavare il quantitativo di inquinanti emesso, in aggregato. In particolare, il calcolo effettuato è stato il seguente:

$$k_{ij} = \text{parametro che indica le emissioni per la classe veicolare } i \text{ dell'inquinante } j \left(\frac{mg}{vkm} \right)$$

$$kmM = \text{chilometri medi percorsi dalla singola autovettura (km)}$$

$$num_veicoli_i = \text{numero totale di autovetture della classe } i \text{ (v)}$$

$$Emissioni\ totali_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \times num_veicoli_i \times kmM (mg)$$

k_{ij} è stato preso dalla tabella Inemar, mentre kmM è pari a 2,4 km. Per calcolarlo si è fatta una forte approssimazione, non avendo alcun dato sui percorsi effettuati dalle autovetture, ma solo l'ingresso. In questo caso, presi punti estremi della Z.T.L., si è calcolata la distanza percorsa per passare da una posizione all'altra. Ripetendo questo calcolo per una serie di estremità differenti, si è calcolata la media di tali valori. Come approssimazione dei percorsi si è ritenuto fosse in prima analisi un risultato soddisfacente. Il $num_veicoli_i$ è stato ricavato dalla precedente analisi effettuata sui transiti. $Emissioni\ totali_j$ rappresenta, perciò, i milligrammi emessi in una giornata feriale scolastica dal parco auto nella sua totalità. Si è mantenuta una suddivisione in 4 fasce orarie, utile per differenziare i momenti in cui la Z.T.L. è attiva.

I risultati numerici ottenuti sono i seguenti:

Tabella VII-C: Inquinanti emessi dalle autovetture nell'arco della giornata.

	SO2	NOx	COV	CH4	CO	CO2	N2O	NH3	PM2.5	PM10	PTS
	mg	mg	mg	mg	mg	g	mg	mg	mg	mg	mg
0.00-7.30	15.437	4.616.365	244.055	146.079	4.788.013	2.655.256	75.676	170.687	350.381	527.190	728.357
7.30-10.30	30.909	7.993.675	390.270	289.993	8.432.483	5.264.970	139.970	284.360	604.884	953.083	1.349.250
10.30-19.30	133.208	34.527.270	1.969.454	1.324.657	40.921.212	22.854.209	604.919	1.442.287	2.690.840	4.200.833	5.918.837
19.30-0.00	37.530	9.305.718	557.667	394.508	12.113.181	6.499.076	166.013	431.061	747.738	1.176.560	1.664.455
TOTALE	217.085	56.443.027	3.161.446	2.155.237	66.254.889	37.273.512	986.578	2.328.395	4.393.842	6.857.666	9.660.899
INQUINAMENTO ORARIO mg/h											
0.00-7.30	2.058	615.515	32.541	19.477	638.402	354.034	10.090	22.758	46.717	70.292	97.114
7.30-10.30	10.303	2.664.558	130.090	96.664	2.810.828	1.754.990	46.657	94.787	201.628	317.694	449.750
10.30-19.30	14.801	3.836.363	218.828	147.184	4.546.801	2.539.357	67.213	160.254	298.982	466.759	657.649
19.30-0.00	8.340	2.067.937	123.926	87.669	2.691.818	1.444.239	36.892	95.791	166.164	261.458	369.879
INQUINAMENTO PERCENTUALE											
0.00-7.30	7,11%	8,18%	7,72%	6,78%	7,23%	7,12%	7,67%	7,33%	7,97%	7,69%	7,54%
7.30-10.30	14,24%	14,16%	12,34%	13,46%	12,73%	14,13%	14,19%	12,21%	13,77%	13,90%	13,97%
10.30-19.30	61,36%	61,17%	62,30%	61,46%	61,76%	61,31%	61,31%	61,94%	61,24%	61,26%	61,27%
19.30-0.00	17,29%	16,49%	17,64%	18,30%	18,28%	17,44%	16,83%	18,51%	17,02%	17,16%	17,23%

APPENDICE D

D.1 Costo della congestione

Per il calcolo della congestione si sono utilizzati tali parametri:

Free flow (€ct/vkm)	Near capacity (€ct/vkm)	Over capacity (€ct/vkm)
2,5	160,8	244,6

Figura I-D: Parametri per il calcolo della congestione relativi alle zone urbane

Fonte: Gibson, Gena, et al. "Update of the handbook on external costs of transport." Final report for the European commission–DG mobility and transport, London, UK (2014).

Come si vede dalla figura, il valore varia molto se si è prossimi o meno alla capacità. Come verificato nell' *Appendice C.1*, il rapporto tra flussi e capacità è sempre inferiore al 75%, soglia utilizzata per identificare il passaggio da *Free flow* a *Near capacity*. Ecco che il calcolo da effettuare è il seguente:

$$k = \text{costo per la congestione} \left(\frac{\text{€ct}}{\text{vkm}} \right)$$

$\text{numero_veicoli} = \text{numero di veicoli transitati nella giornata (v)}$

$\text{kmM} = \text{chilometri medi percorsi dalle autovetture (km)}$

$$\text{Costo}_{\text{congestione}} = k \times \text{numero_veicoli} \times \text{kmM} \text{ (€ct)}$$

Il valore di k è 2,5 ed è preso dalla tabella qui in esame, numero_veicoli è la media degli ingressi del 2018 pari a 89.600 (solo autovetture), invece kmM , con le dovute approssimazioni precedentemente presentate, è pari a 2,4.

D.2 Costo dell'inquinamento locale

Primo metodo

Per il calcolo di tale componente di costo, si sono utilizzati i seguenti valori, espressi in €/tonn:

PM_{2,5}	PM₁₀	NO_x	COV	SO₂
426.700	170.700	9.500	1.100	8.700

Figura II-D: Valori economici dei maggiori inquinanti, espressi in €/tonn.

Fonte: Van Essen, Huib, et al. "External Costs of Transport in Europe, Update Study for 2008." Delft, CE Delft, Publication code 11.50 (2011)

Da tale tabella è evidente che il danno più rilevante è quello del particolato fine, il quale riesce a penetrare maggiormente nell'apparato respiratorio degli individui.

Di seguito si presenta il calcolo effettuato per la stima dei costi:

$$c_j = \text{costo dell'inquinante } j \left(\frac{\text{€}}{\text{tonn}} \right)$$

$$\text{Emissioni totali}_j = \text{emissioni dell'inquinante } j \text{ (tonn)}$$

$$C_{tot} = \sum_{j=1}^m c_j \times \text{Emissioni totali}_j \text{ (€)}$$

Il costo per ogni inquinante viene preso dalla tabella sopra presentata, le emissioni sono state calcolate nell'Appendice C.2, perciò combinando questi due fattori si può calcolare il costo totale. Ecco i calcoli, appena descritti, in tabella:

Tabella I-D: calcoli per la stima del costo dei diversi inquinanti

	SO2	NOx	COV	PM2.5	PM10
Emissioni (mg)	217.084,76	56.443.026,95	3.161.445,57	4.393.842,09	6.857.666,10
Costo inquinante (€/tonn)	8.700	9.500	1.100	426.700	170.700
COSTO TOTALE	€ 1,89	€ 536,21	€ 3,48	€ 1.874,85	€ 1.170,60

Secondo metodo

Di seguito viene presentata una stima differente, utilizzando i parametri di uno studio internazionale differente. Qui i costi sono rappresentati per tipologia di autovettura anziché inquinante. In questo modo si può valutare quale categoria impatta maggiormente dal punto di vista economico. Lo studio dal quale i parametri sono stati estrapolati suddivideva i veicoli in base alle caratteristiche del motore. Non avendo tale informazione, si sono utilizzati dei valori medi. Ecco di seguito una tabella coi parametri utilizzati per la stima:

	BENZINA	DIESEL
Euro 0	3,33	7,63
Euro 1	0,85	2,88
Euro 2	0,53	2,69
Euro 3	0,35	2,11
Euro 4	0,33	1,47
Euro 5	0,31	0,81
Euro 6	0,31	0,56

Figura III-D: Valore economico dell'inquinamento locale suddiviso per le diverse categorie, rappresentato in €/vkm

Fonte: Gibson, Genia, et al. "Update of the handbook on external costs of transport." Final report for the European commission—DG mobility and transport, London, UK (2014).

Questo è invece il procedimento seguito:

$$h_i = \text{costo della singola categoria} \left(\frac{\text{€}c}{v \times km} \right)$$

$$n_i = \text{numero di veicoli della categoria } i \text{ (} v \text{)}$$

$$N_{tot} = \sum_{i=1}^n n_i$$

$$c_i = h_i \times n_i$$

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n c_i$$

h_i è un parametro della tabella sopra presentata, n_i è il valore medio degli ingressi di una specifica classe di autoveicoli e N_{tot} è il valore totale degli ingressi di diesel e benzina. Come si vede, la tabella indica solo i valori delle autovetture benzina e diesel: esse, infatti, sono le più numerose e le più inquinanti, ragion per cui molti studi hanno deciso di concentrarsi solo su suddette categorie. Una volta trovato il costo di ogni categoria c_i , si può proseguire con il calcolo del costo totale, C_{tot} .

Si sono, infine, trovati i valori percentuali del costo e del numero di veicoli. In tale modo è stato più semplice fare un confronto e trarre delle conclusioni.

$$c_{\%} = \frac{c_i}{C_{tot}}$$

$$n_{\%} = \frac{n_i}{N_{tot}}$$

Di seguito una tabella coi valori ottenuti:

Tabella II-D: valori percentuali dell'inquinamento locale, divisi per le diverse classi veicolari.

	Tipo legislativo	n	n %	c	c%
BENZINA	E0	42,54	0,05%	3,40 €	0,26%
	E1	67,06	0,08%	1,37 €	0,10%
	E2	1.290,27	1,62%	16,55 €	1,26%
	E3	3.980,44	4,99%	33,22 €	2,52%
	E4	12.983,26	16,27%	101,82 €	7,74%
	E5	9.702,13	12,16%	72,10 €	5,48%
	E6	10.331,36	12,95%	76,77 €	5,83%
DIESEL	E0	3,93	0,00%	0,72 €	0,05%
	E1	13,84	0,02%	0,96 €	0,07%
	E2	322,26	0,40%	20,84 €	1,58%
	E3	3.180,61	3,99%	160,83 €	12,22%
	E4	10.336,80	12,96%	363,90 €	27,65%
	E5	15.560,53	19,50%	303,19 €	23,03%
	E6	11.970,52	15,00%	160,58 €	12,20%

D.3 Costo dell'inquinamento globale

Primo metodo

Per il calcolo dell'inquinamento globale, si ricorre all'uso dei GWP, così da dover solo utilizzare i parametri di costo della CO₂. Ecco una tabella coi valori di GWP degli inquinanti più comuni:

<i>Inquinanti</i>	<i>Formula chimica</i>	<i>Global Warming Potential (Orizzonte Temporale)</i>		
		20 anni	100 anni	500 anni
<i>Diossido di carbonio</i>	CO ₂	1	1	1
<i>Metano</i>	CH ₄	56	21	6.5
<i>Ossido nitroso</i>	N ₂ O	280	310	170

Figura IV-D: GWP dei principali inquinanti

Fonte: <https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials>

Per trovare i grammi emessi per i tre inquinanti si è utilizzato il medesimo calcolo effettuato per quelli locali. Usando poi i parametri della tabella precedente, si calcolano i grammi equivalenti di CO₂. Ecco di seguito i risultati:

Tabella III-D: Calcolo della quantità di CO₂ equivalente

	CH₄	CO₂	N₂O
QUANTITÀ	2.155,24 g	37.273.511,56 g	986,58 g
GWP	56	1	280
GRAMMI EQUIVALENTI	120.693,27 g	37.273.511,56 g	276.241,80 g
TOTALE	37,67 ton		

Per il costo, si è utilizzata la tabella utilizzata nel *External costs of transport in Europe (2013)*. Si è scelto come anno di applicazione il 2015, in quanto è quello prossimo, e come colonna quella relativa all'Europa. Il valore è quindi 122 €/tonn di CO₂. Moltiplicando il risultato precedente con tale valore, si trova il costo totale.

Secondo metodo

Successivamente, come nel caso dell'inquinamento globale, si è fatto il calcolo dell'impatto economico, suddividendo l'impatto nelle diverse categorie di veicoli. La tabella dei parametri di costo utilizzati è la seguente:

	<i>BENZINA</i>	<i>DIESEL</i>
<i>Euro 0</i>	3,10	2,85
<i>Euro 1</i>	3,20	2,60
<i>Euro 2</i>	3,13	2,30
<i>Euro 3</i>	2,90	2,20
<i>Euro 4</i>	2,93	2,20
<i>Euro 5</i>	2,93	2,20
<i>Euro 6</i>	2,93	2,20

Figura V-D: Valore economico dell'inquinamento globale suddiviso per le diverse categorie, rappresentato in €/vkm

Fonte I. Gibson, Gena, et al. "Update of the handbook on external costs of transport." Final report for the European commission–DG mobility and transport, London, UK (2014).

Il procedimento risulta identico a quello seguito per l'inquinamento globale.

Ecco di seguito i risultati:

Tabella IV-D: valori percentuali dell'inquinamento globale, divisi per le diverse classi veicolari.

	<i>Tipo legislativo</i>	<i>n</i>	<i>n %</i>	<i>c</i>	<i>c%</i>
<i>BENZINA</i>	E0	42,54	0,05%	€ 3,16	0,05%
	E1	67,06	0,08%	€ 5,15	0,08%
	E2	1.290,27	1,62%	€ 97,03	1,56%
	E3	3.980,44	4,99%	€ 277,04	4,46%
	E4	12.983,26	16,27%	€ 914,02	14,72%
	E5	9.702,13	12,16%	€ 683,03	11,00%
	E6	10.331,36	12,95%	€ 727,33	11,71%
<i>DIESEL</i>	E0	3,93	0,00%	€ 0,27	0,00%
	E1	13,84	0,02%	€ 0,86	0,01%
	E2	322,26	0,40%	€ 17,79	0,29%
	E3	3.180,61	3,99%	€ 167,94	2,70%
	E4	10.336,80	12,96%	€ 545,78	8,79%
	E5	15.560,53	19,50%	€ 821,60	13,23%
	E6	11.970,52	15,00%	€ 632,04	10,18%

Bibliografia

Anas, A., & Lindsey, R. (2011). Reducing urban road transportation externalities: *Road Pricing* in theory and in practice. *Review of Environmental Economics and Policy*, 5(1), 66-88.

Arpa Piemonte, Città Metropolitana di Torino, (2017). Uno sguardo all'aria. Relazione annuale sui dati rilevati dalla rete metropolitana di monitoraggio della qualità dell'aria. http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/risorse/ambiente/dwd/qualita-aria/relazioni-annuali/relazione2017_brochure_A4.pdf

Arrow, K. J. (1969). The organization of economic activity: issues pertinent to the choice of market versus nonmarket allocation. *The analysis and evaluation of public expenditure: the PPB system*, 1, 59-73.

Arrow, K. J., & Debreu, G. (1954). Existence of an equilibrium for a competitive economy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 265-290.

Bator, F. M. (1958). The anatomy of market failure. *The quarterly journal of economics*, 72(3), 351-379.

Baumol, W. J., & Oates, W. E. (1971). The use of standards and prices for protection of the environment. In *The economics of environment* (pp. 53-65). Palgrave Macmillan, London.

Baumol, W. J., Baumol, W. J., Oates, W. E., Bawa, V. S., Bawa, W. S., & Bradford, D. F. (1988). *The theory of environmental policy*. Cambridge university press.

Caputo, P. (2004). Protocollo di Kyoto: stato dei fatti dopo la COP 9. *ARCHI*, 74-79.

Coase, R. H. (1960). The problem of social cost. In *Classic papers in natural resource economics* (pp. 87-137). Palgrave Macmillan, London.

Comune di Milano (2002). Studio per l'introduzione del *Road Pricing* a Milano.

Croci, E. (2016). Urban *Road Pricing*: a comparative study on the experiences of London, Stockholm and Milan. *Transportation Research Procedia*, 14, 253-262.

- Danielis, R. (2001). La teoria economica e la stima dei costi esterni dei trasporti, Università di Trieste e ISTIEE.
- Danielis, R., Rotaris, L., Marcucci, E., & Massiani, J. (2011). *An economic, environmental and transport evaluation of the Ecopass scheme in Milan: three years later* (No. 1103).
- Davis, O. A., & Whinston, A. B. (1965). Welfare economics and the theory of second best. *The Review of Economic Studies*, 32(1), 1-14
- Delft, C. E., & Infrac, F. I. (2011). External costs of transport in Europe. *Update Study*. Retrieved May, 8, 2013.
- Desaigues, B., Ami, D., Bartczak, A., Braun-Kohlová, M., Chilton, S., Czajkowski, M., ... & Kaderjak, P. (2011). Economic valuation of air pollution mortality: A 9-country contingent valuation survey of value of a life year (VOLY). *Ecological indicators*, 11(3), 902-910.
- Harrington, W., & McConnell, V. D. (2003). *Motor vehicles and the environment*. Washington, DC: Resources for the Future.
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J., Holtkamp, M., Meier, H., Gibson, G., ... & Cox, V. (2014). Update of the handbook on external costs of transport: final report for the European Commission: DG-MOVE.
- Lipsey, R. G., & Lancaster, K. (1956). The general theory of second best. *The review of economic studies*, 24(1), 11-32.
- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., Van Essen, H. P., Boon, B. H., Smokers, R., ... & Bak, M. (2008). Handbook on estimation of external costs in the transport sector. *CE Delft*.
- Malerba, G. (2014). *Lezioni di Economia del Welfare*. EDUCatt-Ente per il diritto allo studio universitario dell'Università Cattolica.
- Mas-Colell, A., Whinston, M. D., & Green, J. R. (1995). *Microeconomic theory* (Vol. 1). New York: Oxford university press.
- McNutt, P. (1999). Public goods and club goods. *Encyclopedia of law and economics*, 1, 927-951.

- Miller, N. H. (2003). Notes on microeconomic theory. *Externalities and Public Good*.
- Newbery, D. M., & Santos, G. (2002). *Estimating urban road congestion costs*. London: Centre for Economic Policy Research.
- Odioso, M. S., & Smith, M. C. (2008, April). Perceptions of congestion charging: lessons for US cities from London and Stockholm. In *Systems and Information Engineering Design Symposium, 2008. SIEDS 2008. IEEE* (pp. 221-226). IEEE.
- Parry, I. W., Walls, M., & Harrington, W. (2007). Automobile externalities and policies. *Journal of economic literature*, 45(2), 373-399.
- Pigou, A. C. (1932). *The economics of welfare, 1920*. McMillan&Co., London.
- Samuelson, P. A. (1954). The pure theory of public expenditure. *The review of economics and statistics*, 387-389.
- Samuelson, P. A., & Nordhaus, W. (1976). *Economics (10th edn)*. New York and London: McGraw-Hill
- Santos, G., & Fraser, G. (2006). *Road Pricing: lessons from London*. *Economic policy*, 21(46), 264-310.
- Santos, G., & Newbery, D. M. (2001). Urban congestion charging: theory, practice and environmental consequences.
- Small, K. A., Verhoef, E. T., & Lindsey, R. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge.
- Spadoni, R., & Malagoli, C. (1992). Alcune considerazioni sui trasporti e sulle esternalità da traffico. *Ce. SET*, 22(22), 1000-1020.
- Ventura, A., Cafiero, C., & Montibeller, M. (2016). Pareto Efficiency, the Coase Theorem, and Externalities: A Critical View. *Journal of Economic Issues*, 50(3), 872-895.
- Vickrey, W. S. (1963). Pricing in urban and suburban transport. *The American Economic Review*, 53(2), 452-465.
- World Bank (2014). *State and Trends of Carbon Pricing 2018*. World Bank Publications. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29687>

<http://www.arpalombardia.it>

<http://tfl.gov.uk/modes/driving/congestion-charge>

<http://www.comune.torino.it/trasporti/ztl/>

<http://www.comune.torino.it/trasporti/ztl/permessi-3.shtml>

<http://www.inemar.eu/xwiki/bin/view/InemarDatiWeb/Inventario+delle+emissioni+in+atmosfera>

<http://www.lavoce.info/archives/2232/area-c-un-successo-e-puo-rinascere/>

<http://www.lavoce.info/archives/23815/un-ticket-per-milano/>

<http://www.lavoce.info/archives/24398/a-passo-duomo-ma-con-laria-piu-pulita/>

<http://www.lavoce.info/archives/25960/ecopass-nellingorgo-del-sondaggio/>

<http://www.muoversi.milano.it>

<http://www.stockholmsforsoket.se/>

Ringraziamenti

Arrivato a questo punto, ci tengo a ringraziare alcune persone che, in modo diverso, mi hanno aiutato a raggiungere questo importante traguardo.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore Luigi Buzzacchi per la sua disponibilità e la sua preziosa collaborazione in tutte le fasi della tesi e del progetto. Questa esperienza mi ha insegnato molto, sia dal lato didattico che umano.

Non da meno ringrazio il mio correlatore, Giacomo Rosso, per avermi seguito costantemente e avermi aiutato ove ne avevo bisogno. È stato un prezioso punto di riferimento e non si è mai tirato indietro dal fornire il suo supporto.

Un ringraziamento particolare va a tutti i membri di FULL e 5T con cui ho avuto l'onore di collaborare nell'attività di tesi/progetto. Professionalità, ma anche tanta disponibilità e cordialità hanno permesso di creare un clima socievole e molto positivo.

Ringrazio il mio collega e compagno di studi, Daniele Riggi, persona abile e socievole, con cui ho collaborato in questi ultimi mesi.

Ci tengo ora a ringraziare la mia famiglia, mamma Barbara, papà Massimo e Ilaria: mi hanno sempre supportato in questi anni, non mi hanno mai fatto pesare le mie assenze dovute allo studio e hanno sempre creduto in me.

Ringrazio particolarmente i miei nonni: mi hanno sostenuto fin da quando ero bambino e fornito un aiuto in tutte le fasi della mia vita, anche questa in particolar modo.

Un ringraziamento a tutti i miei parenti, zii e cugini: hanno sempre dimostrato il loro sostegno in questo percorso e ne sono molto grato.

Ringrazio i miei amici Anna, Andrea, Roberta e Giulia per esserci sempre stati in questi anni: con loro ho condiviso molte esperienze in giro per l'Europa che hanno reso questi anni ancora più indimenticabili.

Ringrazio Federico, amico di vecchia data, che in tutti questi anni non ha mai smesso di essermi vicino. Ringrazio Mariapia, prima compagna di corso e ora fedele amica, per il suo prezioso sostegno e la sua costante presenza.

Non ho potuto nominare tutti, ma ringrazio tutti i miei amici, compagni di squadra e colleghi universitari. Ringrazio tutti coloro che ho conosciuto e con cui ho avuto il piacere di confrontarmi. È anche grazie a loro che ho raggiunto questo traguardo.

Queste poche parole non sono sufficienti per esprimere la gratitudine che ho nei vostri confronti, ma grazie davvero a tutti voi.

Stefano