

La stima dei benefici ambientali associati a interventi di mobilità sostenibile: metodologie e risultati

La stima dei benefici ambientali associati a interventi di mobilità sostenibile: metodologie e risultati

Informazioni legali

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), insieme alle 21 Agenzie Regionali (ARPA) e Provinciali (APPA) per la protezione dell'ambiente, a partire dal 14 gennaio 2017 fa parte del Sistema Nazionale a rete per la Protezione dell'Ambiente (SNPA), istituito con la Legge 28 giugno 2016, n.132.

Le persone che agiscono per conto dell'Istituto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questa pubblicazione.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Quaderni Ambiente e Società 26/23
ISBN 978-88-448-1148-8

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

Grafica di copertina: Alessia Marinelli - ISPRA – Area Comunicazione Ufficio Grafica
Foto di copertina: Francesca De Maio
ISPRA – Area Comunicazione

Coordinamento pubblicazione online:

Daria Mazzella
ISPRA – Area Comunicazione

Autori

Elisabetta De Maio, Silvia Brini, Massimiliano Bultrini, Francesca De Maio, Marco Faticanti, Arianna Lepore
(ISPRA)

Prefazione

Fra le numerose e variegata definizioni riportate nella letteratura di settore, la descrizione che meglio di altre chiarisce i contenuti e la finalità della mobilità sostenibile è la seguente: *“la mobilità sostenibile è il principio che è alla base di un sistema di trasporto ideale, di persone e di merci, che pur soddisfacendo le esigenze di spostamento o movimentazione, non genera esternalità negative e concorre a garantire una buona qualità della vita”*¹. Una definizione che raggruppa in sé tutti gli aspetti della sostenibilità economica, ambientale e sociale.

Il tema della mobilità sostenibile è di grande attualità ed è diventato negli ultimi tempi di estremo interesse per i decisori politici soprattutto per tenere fede agli obblighi del Paese nel rispettare gli obiettivi previsti dagli accordi di Parigi. Infatti, ne è la riprova il fatto che la mobilità sostenibile è presente in tutti i piani adottati sia a livello nazionale (PNIEC², PNRR³, la *Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra*⁴, ecc.) che europeo (la *Strategia europea per la mobilità intelligente*⁵, la legge UE sul clima introdotta dal Regolamento (EU) 2021/1119⁶ del 30 giugno 2021, il Green Deal⁷, il pacchetto di misure in materia di clima, energia, trasporti e fiscalità denominato *“Fit for 55”* la cui negoziazione è tuttora in corso, ecc.).

A livello nazionale, la normativa (decreto n. 179 del 12 maggio 2021) prevede anche che le aziende con più di 100 dipendenti localizzate in un capoluogo di Regione, in una Città metropolitana, in un capoluogo di Provincia o comunque in un comune con popolazione superiore a 50.000 abitanti redigano il piano spostamenti casa-lavoro dei propri dipendenti e nominino il *mobility manager* aziendale. Analogamente, il *mobility manager* scolastico, figura introdotta dalla legge n. 221/2015 (art. 5, comma 6 sostituito dal comma 12 bis dell'articolo 8 del decreto-legge 16 giugno 2022 n. 68, convertito dalla legge 5 agosto 2022 n. 108) è il manager della mobilità che ha il compito di *“organizzare e coordinare gli spostamenti casa-scuola-casa del personale scolastico e degli alunni [...]”*. Le linee guida per favorire l'istituzione in tutti gli istituti scolastici di ogni ordine e grado, nell'ambito della loro autonomia amministrativa e organizzativa, della figura del *mobility manager* scolastico, *“scelto su base volontaria e senza riduzione del carico didattico [...]”* sono state recentemente emanate dal MIUR.

¹ Capitolo 8 in XIII Rapporto sulla qualità dell'ambiente urbano – Edizione 2015.

² <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-p/piano-nazionale-integrato-per-l-energia-e-il-clima-2030-pniec.html#:~:text=Il%20Piano%20Nazionale%20Integrato%20per,nostro%20Paese%20verso%20la%20decarbonizzazione.>

³ <https://www.mise.gov.it/index.php/it/68-incentivi/2042324-piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza-i-progetti-del-mise>

⁴ https://www.mite.gov.it/sites/default/files/Its_gennaio_2021.pdf

⁵ <https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2021/06/03/sustainable-and-smart-mobility-strategy-council-adopts-conclusions/>

⁶ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:32021R1119>

⁷ Una mobilità pulita e sostenibile per un'UE climaticamente neutra - Consilium (europa.eu).

Infatti, come risulta dall'inventario delle emissioni di gas serra pubblicato nel 2022 da ISPRA⁸ con i dati aggiornati al 2020, il settore dei trasporti ha un peso considerevole nelle serie storiche delle emissioni dei gas serra.

Nel 2020 il settore dei trasporti in Italia rappresentava il 22,4% delle emissioni totali di gas ad effetto serra (di cui il 92% sono attribuibili al trasporto stradale) e il 27,9% delle emissioni totali di CO₂.

A fronte di una riduzione delle emissioni di CO₂ dal 1990 al 2020 pari al 31,2% (che diminuiscono da 440 a 303 milioni di tonnellate al netto degli assorbimenti delle foreste e del suolo), il settore dei trasporti nel 2019 è stato responsabile di una crescita delle emissioni pari al 3,2% rispetto al 1990. Solo nel 2020 tale tendenza ha subito un'inversione, segnando un -15,8% rispetto al 1990 a causa soprattutto dei bassi volumi dei mezzi in circolazione per effetto dell'emergenza pandemica e in minor misura per la penetrazione nel mercato di mezzi a più basso consumo.

Inoltre, nel 2020 al trasporto su strada viene attribuita una quota molto consistente delle emissioni in atmosfera di altri inquinanti, con il 37,4% degli ossidi di azoto (NO_x), il 10,4% dei composti organici volatili non metanici (COVNM), il 9,4% di polveri sottili (PM10) e il 15,7% di monossido di carbonio (CO). In particolare, per gli ossidi di azoto e le polveri sottili si ricorda che l'Italia è in procedura d'infrazione per mancato rispetto delle Direttive europee sulla qualità dell'aria.

Le cause principali alla base di tale situazione vanno ricercate nell'uso intensivo dell'automobile per gli spostamenti casa scuola e casa lavoro in ambito urbano, in un parco auto che risulta essere il più popoloso d'Europa e nel trasporto delle merci che avviene quasi esclusivamente su gomma. I dati ACI mostrano come nel 2021 il parco auto italiano abbia raggiunto la quota record di 39,8 milioni di autovetture⁹, un *trend* in costante crescita che sembra non risentire nemmeno di congiunture economiche sfavorevoli: l'auto continua ad essere percepita dalle famiglie italiane come un bene irrinunciabile.

Anche i dati del Conto Nazionale dei Trasporti mostrano come, nel 2020, il trasporto di merci e passeggeri su scala nazionale avvenga prevalentemente via strada. Il trasporto di merci su strada (>50 km) rappresenta il 56,5% del totale a fronte di percentuali più contenute per il trasporto su ferrovia (10,5%) e per il trasporto marittimo di cabotaggio (27,8%). Analogamente, la quota degli spostamenti dei passeggeri in auto e moto si è mantenuta costantemente intorno all'80% dal 2005 al 2019 per poi aumentare all'84,9% nel 2020, mentre quella legata all'utilizzo dei mezzi pubblici è scesa dal 2% del 2005 all'1,8% nel 2020¹⁰. Anche per quest'ultimo dato l'influenza dell'emergenza pandemica è stata particolarmente significativa.

⁸ ISPRA. 2022. *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. National Inventory Report 2022*. ISPRA Rapporti 360/2022. https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/nir2022_italy_r360.pdf

⁹ Fonte Annuario ACI 2021 (<https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico/annuario-statistico-2021.html>)

¹⁰ Fonte: Conto Nazionale Trasporti 2019-2020, MIMS 2021. <https://bit.ly/2UKGqOU>

Il percorso da intraprendere verso la sostenibilità passa necessariamente attraverso azioni volte *in primis* alla riduzione del parco auto e dell'uso del mezzo privato, sia attraverso un miglioramento della tecnologia di propulsione per la riduzione delle emissioni, già in atto da qualche anno, sia attraverso uno *shift* modale verso forme di trasporto più sostenibili, come il trasporto pubblico locale o la mobilità dolce, sia con il ricorso a una maggiore intermodalità delle tipologie di trasporto, tutti fattori che tendono a mitigare le criticità, migliorando il bilancio energetico e l'occupazione dello spazio.

Tale cambiamento deve avvenire soprattutto a livello locale, in particolare nelle aree urbane considerando che attualmente il 72% della popolazione europea vive all'interno di aree metropolitane e il 60% si concentra in aree urbane di oltre 10.000 abitanti con stime in continua crescita¹¹. Nasce da qui la necessità di concentrare l'attenzione delle politiche di promozione della mobilità sostenibile prioritariamente nelle aree urbane e nei collegamenti tra queste e il territorio circostante.

I benefici della mobilità sostenibile in rapporto ad aree urbane e qualità della vita sono riscontrabili in termini di miglioramento delle condizioni ambientali, grazie alla riduzione dei problemi di inquinamento atmosferico, di rumore, di congestione e di incidentalità, come espressamente analizzato nel documento "*Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile. Inquadramento generale e focus sul trasporto stradale*"¹² elaborato nel 2017, di concerto tra il Ministero dell'Ambiente, il Ministero dello Sviluppo Economico, il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti e RSE¹³

La necessità di affrontare il contributo dei trasporti al cambiamento climatico è ben consolidata (Banister, 2008, 2011; IPCC, 2018; Sorrell, 2015), visto che i trasporti sono responsabili del 24% delle emissioni dirette globali di CO₂ derivanti dalla combustione del carburante e continuano ad aumentare ogni anno (IEA, 2020). Le emissioni di CO₂ delle auto nel Regno Unito, ad esempio, sono responsabili del 61% delle emissioni del settore (68 MtCO₂) e, nonostante l'aumento delle vendite di veicoli ibridi ed elettrici, le emissioni medie dallo scarico delle auto nuove sono ancora in aumento in gran parte a causa dell'aumento delle vendite di veicoli di maggiore cilindrata e dimensioni. L'ultimo *budget* proposto dal *Climate Change Committee* (CCC) del Regno Unito prevede che i trasporti raggiungano la decarbonizzazione totale entro il 2050. Nel Regno Unito, come altrove, la maggior parte degli sforzi per raggiungere questo obiettivo si concentra prevalentemente sull'elettrificazione delle autovetture e dei veicoli commerciali leggeri. Valutazioni multiple dei percorsi di riduzione dei gas serra dell'intera economia, compresi gli ultimi *budget* CCC, hanno concluso che, anche se si verificasse una rapida elettrificazione nei prossimi dieci anni, sarà comunque necessaria una riduzione dell'uso dell'auto privata per soddisfare gli obiettivi di decarbonizzazione.

¹¹ "Elementi per una roadmap della mobilità sostenibile. Inquadramento generale e focus sul trasporto stradale" (maggio 2017). <https://www.certifico.com/component/attachments/download/5357>

¹² https://classonlus.it/wp-content/uploads/2018/02/Roadmap_della_mobilita_sostenibile.pdf

¹³ <https://www.rse-web.it/>

Occorre pertanto che le analisi costi-benefici, connesse alle diverse scelte di mobilità, sia in termini di infrastrutture che di mezzi, considerino adeguatamente anche la stima dei benefici ambientali in termini di impatto sull'ambiente e sulla salute, ossia valutando la riduzione di emissione in atmosfera sia di gas climalteranti (anidride carbonica, CO₂) che inquinanti (ossidi di azoto, NO_x) e materiale particolato con dimensioni inferiori ai 10 micron, PM10.

Di seguito si riporta l'analisi degli studi di letteratura nazionali e internazionali con particolare *focus* sulle attività di monitoraggio per la valutazione dei benefici ambientali attesi da progetti di mobilità sostenibile quali la mobilità in condivisione (*car* e *bike sharing*, *car pooling*), le azioni di *traffic calming* (zone 30), la mobilità dolce (spostamenti a piedi o in bicicletta e relative infrastrutture), il *pedibus* e la micromobilità.

Per la revisione della letteratura sono state consultate, oltre i siti istituzionali nazionali e internazionali, le seguenti banche dati: Pub Med, Science Direct, DOAJ, Arxiv e JStore.

Sono state utilizzate le seguenti parole chiave:

Greenhouse gas emission reduction, CO₂ emission, CO₂ reduction, CO₂ saving, air pollutants reduction combinate con le attività progettuali sottoelencate.

Dall'analisi, sono stati selezionati studi contenenti riferimenti ai benefici ambientali associati alle seguenti attività progettuali:

- *car sharing*, 23 pubblicazioni;
- *bike sharing*, 13 pubblicazioni;
- *car pooling*, 11 pubblicazioni;
- zone 30, 14 pubblicazioni;
- mobilità dolce (ciclabilità e mobilità pedonale), 18 pubblicazioni;
- *pedibus*, 2 pubblicazioni;
- micromobilità, 5 pubblicazioni;

Nel presente documento vengono descritti in modo sintetico gli articoli selezionati. Per ogni categoria presa in esame, si è cercato di evidenziare le metodologie utilizzate per stimare la riduzione delle emissioni di gas serra, di comprendere la metodologia utilizzata nei diversi studi (questionari, modellistica, simulazioni, scenari, ecc.), sottolineando i punti di forza e limiti dei singoli lavori e di valutare la riproducibilità dei risultati ottenuti.

Gli studi analizzati sono stati condotti in differenti Paesi europei ed extraeuropei, ne consegue che i dati riportati non sempre sono rappresentativi della popolazione generale. Le tipologie di progetti di mobilità sostenibile, prese in considerazione (*sharing mobility*, *pooling service*, mobilità ciclopedonale, zone 30) attraversano fasi di sviluppo differenti nei diversi Paesi esaminati. Anche i modelli utilizzati e i fattori di emissioni sono il più delle volte specifici per le realtà studiate e non sempre i risultati sono generalizzabili ed esportabili in realtà differenti.

Questi elementi contribuiscono a determinare differenze specifiche nei risultati degli studi analizzati, nonostante si rilevino tendenze simili.

L'obiettivo di questa revisione è stato quello di presentare le metodologie più appropriate e riproducibili per la valutazione degli interventi di mobilità sostenibile, la riduzione dei consumi di carburante e la conseguente riduzione di emissioni di CO₂ e di inquinanti atmosferici.

Sommario

1	<i>Car sharing</i>	1
1.1	Introduzione.....	1
1.2	Stato dell'arte.....	2
1.3	Conclusioni	23
1.4	Tabella riepilogativa <i>car sharing</i>	25
2	<i>Bike sharing</i>	34
2.1	Introduzione.....	34
2.2	Stato dell'arte.....	35
2.3	Conclusioni	58
2.4	Tabella riepilogativa <i>bike sharing</i>	60
3	<i>Carpooling</i>	65
3.1	Introduzione.....	65
3.2	Stato dell'arte.....	66
3.3	Conclusioni	82
3.4	Tabella riepilogativa <i>carpooling</i>	84
4	Zone 30 e <i>traffic calming</i>	88
4.1	Introduzione.....	88
4.2	Stato dell'arte.....	90
4.3	Conclusioni	116
4.4	Tabella riepilogativa zone 30 e <i>traffic calming</i>	117
5	Mobilità dolce	122
5.1	Introduzione.....	122
5.2	Stato dell'arte.....	123
5.3	Conclusioni	162
6	Pedibus	165
6.1	Introduzione.....	165

6.2 Stato dell'arte.....	166
6.3 Conclusioni	169
6.4 Tabella riepilogativa mobilità dolce e pedibus	170
7 Micromobilità	181
7.1 Introduzione.....	181
7.2 Stato dell'arte.....	183
7.3 Conclusioni	191
7.4 Tabella riepilogativa microbilit�	193
Conclusioni.....	197
Bibliografia.....	202

1 *Car sharing*

1.1 Introduzione

Il *car sharing* è un servizio di noleggio a breve termine di un veicolo, su prenotazione tramite app, direttamente dal proprio smartphone, che prevede un pagamento in base al tempo di utilizzo del mezzo.

Il *car sharing* offre una nuova alternativa per gli spostamenti urbani, contribuendo a ridurre la necessità di acquisto di auto da parte dei privati, l'incremento del numero delle auto private, la congestione delle strade e l'utilizzo dei parcheggi. Inoltre, favorisce il risparmio sui costi del *leasing*, manutenzione, riparazione e assicurazione del veicolo. Una riduzione dei veicoli di proprietà, a sua volta, si tradurrà in un minor numero di chilometri percorsi dai singoli veicoli (VMT/VKT¹⁴) e, probabilmente, un maggior utilizzo di veicoli ecologici (ad esempio, auto ibride benzina-elettriche) apportando una riduzione delle emissioni, un aumento dell'uso del trasporto pubblico e della mobilità intermodale, ovvero la connettività tra diverse modalità di trasporto.

La maggior parte degli studi sull'impatto del *car sharing* sul traffico si basa su questionari somministrati agli utenti locali. Sebbene ci siano risultati difforni, tutti riflettono un certo impatto del modello di *car sharing* sul traffico. Tale impatto include la diminuzione dei veicoli privati da parte di chi già li possiede, degli acquisti di auto da parte di chi non la possiede, una riduzione della domanda di parcheggi, una riduzione del chilometraggio medio annuo, un minor consumo di carburante delle auto in *sharing* rispetto alle auto private e un maggiore utilizzo del trasporto pubblico (Chen e Kockelman, 2016; Martin e Shaheen, 2011; Nijland *et al.*, 2015).

Dato che le indagini sono state condotte in differenti Paesi, ne consegue che i gruppi di persone intervistate non sono omogenei e il modello di *car sharing* attraversa fasi di sviluppo differenti nei Paesi esaminati. Questi elementi contribuiscono a determinare differenze specifiche nei risultati degli studi sopra citati, nonostante si rilevino tendenze simili. Tali differenze includono: il numero dei proprietari di auto che scelgono di non continuare ad avere veicoli di proprietà (circa 15-36%) (Nijland e van Meerkerk, 2017), la riduzione degli acquisti di auto da parte di chi non la possiede (circa 25-61%), la riduzione nel chilometraggio medio annuo (27-69%), e l'aumento dell'utilizzo del trasporto pubblico (16-39%) (Baptista *et al.*, 2014; Doka e Ziegler, 2000; Shaheen *et al.*, 2006).

Numerose ricerche hanno determinato l'impatto ambientale del modello di *car sharing* considerando le emissioni di gas serra (GHG). Gli studi hanno dimostrato che il *car sharing* riduce il numero di auto private di proprietà e le distanze percorse, apportando così una riduzione di emissioni di gas serra (Zeng, 2013). Rispetto all'uso di auto private, la riduzione delle emissioni di gas serra del *car sharing* è di circa 85-225 kg per veicolo (Firnkorner e

¹⁴ *Vehicle miles travelled* (VMT); *vehicle kilometers travelled* (VKT).

Müller, 2011; Zhang *et al.*, 2012). Se si considera una famiglia, la riduzione delle emissioni di gas serra è di 0,58-0,84 t all'anno (Namazu e Dowlatabadi, 2015).

Questi studi mostrano una possibile riduzione delle emissioni di gas serra con l'implementazione del *car sharing*, ma ci sono differenze sostanziali nei risultati. La difformità dei risultati è conseguenza

- a) della diversa progettazione degli studi (metodi di rivelazione degli spostamenti, dimensione del campione, variabili considerate, ecc.), che rende complessa la confrontabilità degli studi;
- b) delle diverse fasi del ciclo di vita del *car sharing* prese in esame;
- c) dei fattori di riduzione delle emissioni di gas serra utilizzati.

Inoltre, esistono vari modelli di *car sharing*: il modello *free-floating* (ritiro e riconsegna in qualsiasi spazio pubblico), il modello a due nodi: il modello A-A (ritiro ad A e ritorno ad A) e il modello A-B. Le differenze nelle emissioni di gas serra tra questi modelli non sono ancora state chiarite (Chen e Kockelman, 2016).

La revisione della letteratura è stata effettuata sui *database* PubMed, Science Direct e DOAJ, sono stati selezionati 23 articoli di cui si riportano la metodologia utilizzata per la raccolta e analisi dei dati e i risultati ottenuti.

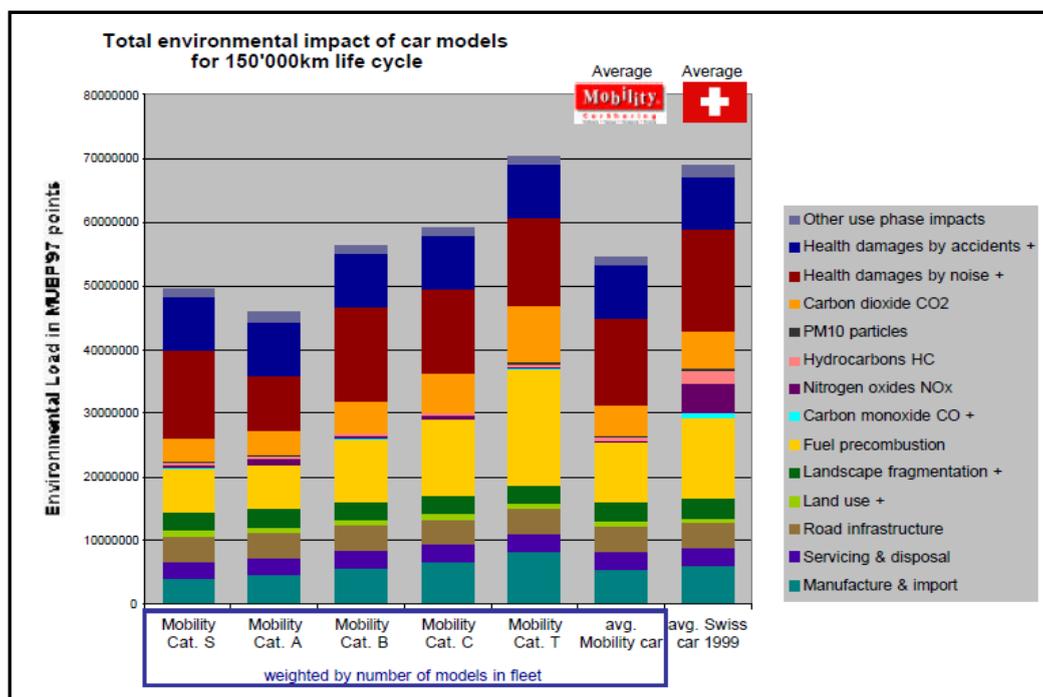
1.2 Stato dell'arte

La società svizzera Mobility Car Sharing Schweiz ha sviluppato un nuovo ed esteso strumento di *Life Cycle Assessment* (LCA) per valutare "l'impatto ambientale dei sistemi di *sharing*" nella loro interezza. Il LCA comprende gli impatti che derivano dall'estrazione delle risorse, dalla produzione, dall'utilizzo e dallo smaltimento delle automobili. Nello studio di Doka e Ziegler (2000) per avere un'idea dell'entità relativa dell'impatto ambientale totale causato dai diversi aspetti dei modelli di auto, sono stati presi in considerazione, non solo le emissioni di gas di scarico, il consumo di carburante, l'uso di materiali per le auto e le infrastrutture stradali, ma anche i danni alla salute dovuti al rumore della strada e agli incidenti automobilistici, gli impatti ambientali derivanti dall'uso del territorio e dalla frammentazione del paesaggio. L'obiettivo è quello di sviluppare un indicatore completo che esprima l'impatto ambientale di modelli di auto per veicolo chilometro. A tal fine è stato elaborato un nuovo metodo di valutazione – il MUPB'97 – che aggrega tutti gli impatti sopra menzionati in un unico valore (Brand *et al.*, 1998) basato su LCA. L'analisi mostra anche che il parco veicolare del *Mobility Car Sharing*, presenta emissioni di scarico di inquinanti quali NO_x, idrocarburi, CO e PM10 molto basse. Rispetto a queste emissioni, altre problematiche come i danni alla salute dovuti al rumore e agli incidenti, la produzione di carburante e lo scarico di CO₂ sono più rilevanti per l'ambiente.

Il carico ambientale¹⁵ (espresso in punti MUBP'97) è stato esaminato per 5 categorie di autoveicoli, in cui sono suddivisi i 23 modelli di auto che compongono la flotta: la media della flotta dei veicoli in condivisione viene confrontata con la media della flotta delle autovetture svizzere.

L'aumento del prezzo della categoria significa generalmente anche un aumento del carico ambientale (Figura 1.1). Questo non è un risultato sorprendente, in quanto il carico ambientale è parzialmente correlato al consumo di carburante che a sua volta influenzerà i prezzi. Un'eccezione è la categoria S, che è più economica della categoria A, ma produce un carico maggiore. La categoria S ottiene un carico ambientale più elevato rispetto alla categoria A, soprattutto a causa di un livello di rumore più elevato dei modelli di questa categoria.

Figura 1.1 – Impatto ambientale totale dei modelli di autovetture



Fonte: Doka e Ziegler, 2000.

Shaheen *et al.* (2006) hanno analizzato gli effetti del *car sharing* introdotto nei primi anni '80 nel Nord America. Sul territorio del continente nordamericano sono presenti 28 organizzazioni che gestiscono il *car sharing* di cui 11 in Canada e 17 negli USA. Il numero dei veicoli per il *car sharing* ha mostrato inizialmente una crescita e poi una riduzione,

¹⁵ Danni alla salute causati da incidenti; danni alla salute causati dal rumore; anidride carbonica CO₂; particelle di PM10; idrocarburi HC; ossidi di azoto NO_x; monossido di carbonio CO; pre-combustione del carburante; frammentazione del paesaggio; uso del suolo, infrastrutture stradali; manutenzione e smaltimento; produzione e importazione.

mentre è aumentata la domanda, con un rapporto utenti/veicoli pari a 64:1 negli USA e 20:1 in Canada. Probabilmente tali tendenze sono conseguenze di una strategia di *business* (ad esempio, aumentare l'uso e la redditività dei veicoli e attirare gli investitori) adottata dai maggiori operatori americani. Gli autori hanno analizzato anche il mercato del *car sharing* e il suo sviluppo.

Bundesverband e Loose (2009) hanno proposto un'analisi del *car sharing* utilizzando un questionario per valutare l'uso del servizio in 14 Paesi europei (384.749 utenti e 11.909 veicoli). Tramite la somministrazione del questionario alle società che gestiscono il *car sharing*, sono state stimate le emissioni di CO₂ dei veicoli (misurate in g CO₂/km). In media, i veicoli in *car sharing* sono più nuovi della maggior parte dei veicoli personali, il che significa che i miglioramenti nella tecnologia dei motori, nell'efficienza dei carburanti e nei livelli di emissione sono maggiori nei veicoli in *car sharing* che nelle auto private. Nella maggior parte dei casi osservati nei vari Paesi la differenza tra le emissioni di CO₂ di diverse flotte di *car sharing* rispetto alle auto personali (prendendo in considerazione i veicoli nuovi o quelli già esistenti) è compresa tra il 15% e il 20%, con un massimo quasi del 25%.

L'assenza del *car sharing* avrebbe potuto comportare quattro possibili scenari:

- lo spostamento non avrebbe avuto luogo senza il servizio di *car sharing* o sarebbe stato procrastinato ad un momento successivo. Tale circostanza avrebbe avuto un effetto positivo sull'ipotetico ecobilancio senza il *car sharing*. Secondo i risultati, il 13,5% dei viaggi di *car sharing* valutati non avrebbe avuto luogo;
- il viaggio con l'auto in *car sharing* sarebbe stato fatto utilizzando il trasporto pubblico, la bicicletta o una combinazione di modalità di trasporto ecocompatibili, che avrebbero migliorato l'ecobilancio;
- è probabile che i partecipanti al *car sharing* avrebbero preso in prestito auto da amici o parenti, apportando un effetto marginale sull'ecobilancio;
- una parte degli aderenti al servizio avrebbe acquistato una o più auto con cui avrebbe compiuto gli spostamenti (22,3% delle famiglie di clienti privati intervistati). Questo avrebbe notevolmente peggiorato l'ecobilancio in quanto, questa scelta di trasporto, avrebbe anche influenzato altri viaggi.

Dall'analisi degli studi ogni veicolo di *car sharing* è responsabile di una minore quantità di emissioni di CO₂ all'anno (-140 kg in Germania; -290 kg in Svizzera).

Lo studio di Firnkorn e Müller (2011) ha raccolto, tramite questionario (45-65 domande), i dati sull'impatto del servizio Car2go sulla mobilità individuale. Lo studio ha proposto 3 possibili scenari: un caso migliore (consumi 3,4 l/100km), uno intermedio (3,6 l/100 km) e uno peggiore (3,9 l/100km), con una riduzione pari all'89% delle emissioni di CO₂ nel caso migliore e del 77% nel caso peggiore. Inoltre, è stata registrata una possibile diminuzione dell'utilizzo di auto private per percorrenze brevi. I limiti della ricerca si riscontrano nella mancanza di analisi dei cicli di mobilità annuali: lo *split* modale, infatti, dipende anche dalla stagionalità. Inoltre, la stima della CO₂ non ha considerato il LCA relativo alle fasi di costruzione e manutenzione.

Martin e Shaheen (2011) hanno utilizzato un questionario *on line*, somministrato agli utenti del *car sharing* e ai gestori del servizio, con lo scopo di valutare le modifiche delle emissioni annuali di gas serra. È stato misurato l'impatto totale, compreso il numero di veicoli non acquistati e i km evitati con l'utilizzo di questi veicoli, grazie all'utilizzo del *car sharing*. Per misurare l'impatto si sono utilizzati le percorrenze espresse in VMT/VKT per persona (PVMT/PVK¹⁶) effettuate prima e dopo l'introduzione del *car sharing*. I risultati mostrano che la maggioranza (71%) degli utenti del *car sharing* incrementa di poco le emissioni dei gas serra (< 0,25 t GHG/anno), mentre una quota minore di rispondenti (29%) mostra una riduzione delle emissioni. La riduzione delle emissioni è maggiore dell'incremento emissivo conseguente all'introduzione del *car sharing*, poiché la maggioranza (80%) degli utenti utilizza il servizio per piccoli spostamenti (<2.000 km/anno). La maggior parte degli utenti che utilizza il *car sharing* non possedeva un'auto di proprietà ed ha quindi incrementato le proprie emissioni. La restante parte è composta da coloro che avevano già un'auto di proprietà e che ha scelto il *car sharing* per una migliore mobilità invece di acquistare un'auto nuova, scelta che ha comportato una riduzione delle emissioni. Il *car sharing* può determinare sia aumenti che diminuzioni di emissioni annuali di gas serra. Tuttavia, nel complesso, il *car sharing* favorisce una riduzione netta delle emissioni annuali di GHG, in quanto responsabile di grandi diminuzioni che compensano in modo più che proporzionale i piccoli aumenti. La somma cumulativa delle emissioni aumentate e risparmiate è, pertanto, negativa. I risultati dello studio indicano un risparmio di -0,53 t GHG/anno tra i rispondenti ed un impatto totale di 0,8 t GHG/anno.

Baptista *et al.* (2014), nel loro studio, hanno evidenziato che la riduzione locale di emissioni di CO₂ dipende dalla tipologia di flotta del *car sharing* (veicoli convenzionali, veicoli ibridi o elettrici), ipotizzando diversi scenari:

- scenario con auto convenzionali (BAU¹⁷);
- scenario con veicoli elettrici interamente ibridi (SC1 HEV);
- scenario con veicoli elettrici (SC2 EV).

L'entità della riduzione delle emissioni può dipendere anche dalla metodologia di calcolo dell'impatto:

- *tank-to-wheel* (TTW) che tiene conto delle emissioni e del consumo di carburante derivanti dallo spostamento del veicolo nella fase di esercizio;
- *well-to-tank* (WTT) che tiene conto delle emissioni che derivano dal portare un vettore di energia dalla sua fonte fino alle sue fasi di utilizzo; vengono utilizzati fattori di riferimento per ciascuno dei diversi percorsi energetici considerati (in questo caso, la produzione di benzina e la produzione di elettricità).

¹⁶ *Personal vehicle miles travelled* (PVMT); *personal vehicle kilometers travelled* (PVKT).

¹⁷ *Business as usual* (BAU).

Nello studio è stato calcolato un risparmio medio (considerando le tre tipologie di motorizzazione dei veicoli) di 0,6 kg di CO₂ risparmiati per km percorso in modalità *car sharing*. I dati relativi ai modelli di comportamento e mobilità sono stati raccolti tramite questionari. Le stime relative allo scenario BAU (motorizzazione tradizionale) mostrano una riduzione di 9,5 tonnellate di CO₂ che possono essere ulteriormente ridotte del 35% nello scenario SC1 HEV (motorizzazione ibrida) e del 65% nello scenario SC2 EV (motorizzazione elettrica).

Namazu e Dowlatabadi (2015) hanno stimato, tramite l'uso di un modello, l'impatto del *car sharing* sulle emissioni di gas serra attraverso cinque fattori indipendenti, che vanno oltre la riduzione dei VKT. I dati utilizzati per il modello sono stati ricavati da un'indagine basata su un diario di viaggio tenuto dalle famiglie coinvolte nell'iniziativa, in cui le distanze sono state calcolate in base alle località di inizio e fine del viaggio. I dati raccolti sulle distanze di viaggio e sulle caratteristiche delle famiglie, che non fanno uso del *car sharing*, sono stati usati per caratterizzare tre gruppi di famiglie di riferimento. Le caratteristiche delle famiglie sono determinanti nella scelta del *car sharing*. Nello studio di modellizzazione sono stati considerati tre fattori che comportano un cambiamento comportamentale:

1. trasferimento modale: uso più elevato di altre modalità di mobilità (trasporti pubblici, bicicletta e passeggiate);
2. giusto dimensionamento: scelta del veicolo più appropriato alle esigenze specifiche di mobilità;
3. pianificazione del viaggio: aggregazione di spostamenti più brevi in viaggi più lunghi.

Lo studio, inoltre, prende in considerazione due fattori relativi alla composizione della flotta:

1. macchine nuove: le flotte di auto del *car sharing* sono, in media, molto più nuove dei veicoli di proprietà. Questo comporta una migliore efficienza dei veicoli;
2. *less macho*: le flotte del *car sharing* in media sono composte da autovetture con trasmissioni meccaniche più efficienti per ciascuna categoria di veicolo.

Sono state proposte tre tipologie di famiglie: (1) famiglie con figli e almeno una persona che lavora fuori casa (di seguito "famiglia con figli"), (2) famiglie senza figli e almeno una persona che lavora fuori casa (di seguito "famiglia senza figli") e (3) famiglie senza figli e senza lavoro fuori casa (di seguito "famiglia in pensione"). Le ipotesi formulate dallo studio assumono che le famiglie che aderiscono al *car sharing* rinuncino al veicolo di proprietà (secondo una *survey* effettuata dal distretto regionale Metro Vancouver il 28% delle famiglie che aderisce al *car sharing* rinuncia all'auto di proprietà).

Sono state fatte tre ipotesi in merito allo scenario in cui è in funzione un servizio di *car sharing*: (1) la mobilità pedonale viene scelta per completare gli spostamenti inferiori a 1 km; (2) la mobilità dolce (pedonale e/o ciclabile) viene scelta con frequenza doppia rispetto ad uno scenario senza *car sharing* per completare gli spostamenti di 1-5 km; (3) Il TPL

(Trasporto Pubblico Locale) viene scelto con frequenza doppia rispetto ad uno scenario senza *car sharing* a prescindere dalla distanza da percorrere. L'uso del *car sharing* è preferito per spostamenti finalizzati allo *shopping* o ad attività sociali, mentre l'utilizzo del TPL è preferito dai pendolari. Inoltre, le auto private spesso sono sproporzionate per la tipologia di utilizzo (troppo potenti e troppo grandi per le loro necessità quotidiane) mentre le auto in *sharing* sono scelte in base alle necessità.

Sono state stimate le emissioni annuali di CO₂ della flotta auto per le tre tipologie di famiglie identificate, prima dell'introduzione del *car sharing*. Le efficienze dei veicoli sono state categorizzate per nove distanze di viaggio (<1 km, 1-5 km, 5-10 km, 10-15 km, 15-20 km, 20-30 km, 30-50 km, 50-100 km e >100 km). La stessa metodologia è stata utilizzata per il calcolo delle emissioni di CO₂ sia per uno scenario *baseline* senza *car sharing* che per lo scenario di viaggi in *car sharing*. Per il calcolo delle emissioni di CO₂ è stata utilizzata l'efficienza energetica media di tutti i veicoli su strada per ogni categoria.

I risultati mostrano una riduzione delle emissioni soprattutto per le famiglie senza figli (fino al 55%). L'utilizzo del *car sharing* non supportato da altre modalità di trasporto riduce le emissioni del 19-20% grazie alla flotta più moderna; un ulteriore 16-19% si ottiene grazie all'ottimizzazione dei veicoli. L'aggregazione dei viaggi con la flotta più avanzata fornisce un'ulteriore riduzione di gas serra, compresa tra il 2-8%. L'aggregazione dei viaggi per garantire la partenza a caldo¹⁸ offre una riduzione marginale dell'1% delle emissioni di gas serra. Se invece le famiglie scegliessero di utilizzare la nuova flotta e potessero contare di più su altri mezzi di trasporto modalità, si potrebbe raggiungere una riduzione del 42-54%. Prendendo in considerazione tutti i fattori, il potenziale massimo di riduzione delle emissioni legato al servizio di *car sharing* dovrebbe essere nell'ordine di 48-55%.

Sono stati condotti due tipi di analisi di sensibilità per confermare la robustezza del modello: (1) modificare l'efficienza del carburante dei veicoli *pre-car sharing* e (2) modificare lo schema di viaggio prima della partecipazione al *car sharing*.

È necessario puntualizzare che, prima di tutto, gli scenari utilizzati per questo studio non sono stati basati su dati reali relativi all'impatto del *car sharing* sulle scelte e sui modelli delle modalità di viaggio. Secondo, si è supposto che le famiglie che aderiscono al *car sharing* e scelgono di rinunciare all'auto di proprietà sono rappresentative del pubblico in generale. In terzo luogo, si è ipotizzato che coloro che scelgono di abbandonare l'utilizzo dell'auto privata, aderendo a un servizio di *car sharing* per motivi economici, non cambiano opzione al modificarsi delle circostanze. Quarto, lo studio si è focalizzato su famiglie che possiedono un'auto privata. Tuttavia, l'impatto ambientale di famiglie che non possiedono un'auto di proprietà andrebbe esaminato per sviluppare un quadro completo. Quinto, questo documento si focalizza sulle emissioni di gas serra; altri aspetti ambientali, quali ad esempio il rumore, non sono stati presi in considerazione. Infine, gli autori suggeriscono che l'effettivo comportamento di guida di autisti di *car sharing* potrebbe essere più aggressivo rispetto alla media. Questo può essere motivato dal

¹⁸ Partenza a caldo (WS): quando più viaggi vengono combinati in soste brevi e ravvicinati, il motore rimane caldo.

desiderio degli utenti di ridurre al minimo il tempo di noleggio ed il relativo costo, ma ha impatti sui consumi di carburante, sulla sicurezza e sul rischio di incidenti.

Nello studio di Nijland *et al.* (2015) per stimare la riduzione dei GHG con l'utilizzo del *car sharing*, è stato somministrato un questionario a 363 utenti, utilizzando il metodo WTW¹⁹ per confrontare i chilometri percorsi, integrato con l'analisi del ciclo di vita. Nella ricerca sono stati analizzate due tipologie di effetti sulla mobilità: quelli sull'uso dell'auto e sulla proprietà dell'auto. L'introduzione del *car sharing* ha determinato una riduzione del numero medio di veicoli di proprietà da 0,85 a 0,72 macchine a persona. Chi era già proprietario, nel 37% dei casi, ha desistito dall'acquistare un nuovo veicolo; chi non possedeva l'auto, nell'8% dei casi, avrebbe desiderato acquistare un'auto ma ha desistito. L'introduzione del *car sharing* ha ridotto le percorrenze con l'auto privata (-1.600 km/anno). È importante riportare che, dei km percorsi in *car sharing*, alcuni (1.500 km/anno) non sarebbero stati percorsi, se non con altre modalità di trasporto.

La riduzione media di chilometri percorsi con l'auto all'anno ha portato a una riduzione di 250 kg di CO₂. Tuttavia, un certo numero dei chilometri ora percorsi in *car sharing*, prima, sarebbe stato percorso con modalità di trasporto più rispettose dell'ambiente, oppure non sarebbe stato affatto percorso, con un incremento stimato di 160 kg in più di emissioni di CO₂. Prendendo in considerazione i chilometri percorsi in auto, la riduzione dell'uso delle autovetture del *car sharing* produce, in media, una riduzione annuale di 90 kg di CO₂.

Gli automobilisti che condividono l'auto percorrono circa il 15-20% di chilometri in meno rispetto a quando non avevano ancora aderito al servizio di *car sharing* ed emettono tra 175 e 265 chilogrammi di CO₂ in meno per persona e all'anno, grazie alla diminuzione del numero di auto di proprietà e del loro utilizzo. Si tratta di una riduzione percentuale compresa tra l'8% e il 13% delle emissioni di CO₂ legate alla proprietà e all'uso dell'auto. Circa la metà di questa riduzione percentuale può essere attribuita al minor uso dell'auto, l'altra metà al minor grado di possesso dell'auto.

Chen e Kockelman (2016) hanno analizzato il servizio del *car sharing* nel Nord America, in 20 città metropolitane con circa 1 milione di abbonati. Nello studio si è applicata l'analisi del ciclo di vita per quantificare i risparmi energetici di emissioni di gas ad effetto serra dovuti al *car sharing*, utilizzando l'approccio tradizionale che prende in considerazione la distanza equivalente, misurata in chilometri, percorsa da ogni persona (PKT²⁰) con il veicolo di proprietà. I calcoli evidenziano le variazioni del tasso di sostituzione dei veicoli che derivano dalla condivisione, così come i miglioramenti in termini di efficienza del carburante derivanti da un più rapido ricambio della flotta, dai cambiamenti nelle distanze di percorrenza, dalla riduzione della domanda di parcheggio e dai cambiamenti nella scelta di utilizzo di modalità alternative.

L'analisi del ciclo di vita offre un approccio sistematico per valutare le conseguenze ambientali del *car sharing*, misurato in PKT equivalenti. Questo processo "dalla culla alla

¹⁹ *Well-to-wheel* che comprende anche le emissioni coinvolte nella produzione di carburante (sia per la benzina che per l'elettricità). Si contano anche i chilometri di treno.

²⁰ *Personal kilometers travelled* (PKT).

tomba” prende in considerazione anche l’utilizzo delle risorse per la produzione di veicoli e carburanti, le fasi di utilizzo e smaltimento del veicolo. Gli impatti ambientali sono numerosi lungo il percorso: in primo luogo, la “proprietà” del veicolo (in termini di numero di veicoli per persona) generalmente si riduce con l’adesione al *car sharing*, garantendo benefici ambientali derivanti dalla minor produzione di veicoli e dal risparmio di infrastrutture di parcheggio. In secondo luogo, il *car sharing* ha un impatto sui VKT²¹ e sui tassi di utilizzo dei veicoli (e quindi sui tassi di sostituzione della flotta), che tende a ridurre il consumo di carburante (così come, probabilmente, le esigenze di infrastrutture stradali, anche se questo potenziale risparmio non è generalmente valutato). Infine, il *car sharing* sposta molti viaggi, precedentemente effettuati con l’automobile privata, verso modalità di trasporto non motorizzate (così come alcuni viaggi precedentemente effettuati con modalità non motorizzate verso auto condivise).

Nelle famiglie che scelgono il *car sharing*, i primi studi stimano che il possesso di veicoli possa essere ridotto di circa il 40-44%. Inoltre, l’adesione al *car sharing*, comporta in genere la riduzione di spostamenti in auto, poiché l’uso di un veicolo in *sharing* comporta la prenotazione in anticipo ed i costi di gestione di un veicolo sono resi più evidenti (in genere con una tariffa al minuto nella maggior parte dei servizi di *car sharing*). Gli utenti oltre a ridurre la domanda di energia in fase di utilizzo riducendo i VKT, guidano veicoli più efficienti dal punto di vista del consumo di carburante poiché la flotta delle auto condivise è più efficiente rispetto alla media delle auto di proprietà (Tabella 1.1).

Tabella 1.1 – Energia ed emissioni di gas serra per veicolo privato (PKT equivalenti)

	Energy (MJ)					GHG (g CO ₂ equiv)				
	Per PKT	Before	After -Low	After -Med	After -High	Per PKT	Before	After -Low	After -Med	After -High
Vehicle Operation	2,1	2,1	1,5	1,1	0,4	144,2	144,2	105,2	72,6	24,0
Vehicle Manufact. % Maintenance	0,4	0,4	0,04	2,7 E-03	1,2 E-04	29,8	29,8	3,3	0,2	0,01
Parking Infrastructure	0,5	0,5	0,4	0,2	0,1	46,6	46,6	34,5	21,4	10,7
Fuel Production	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	24,2	24,2	20,1	15,3	8,6
Increased Rail Transit Used	1,6	0,0	0,0	0,1	0,3	122,3	0,0	0,0	5,7	25,4
Increased Bus Transit Used	0,7	0,0	0,0	0,02	0,1	51,6	0,0	0,0	1,4	6,1
Increased Bike Mode Use	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	20,6	0,0	0,2	0,2	0,3
Increased Walk Mode Use	0,6	0,0	0,0	0,01	0,01	20,6	0,0	0,4	3,7	4,8
Totals		3,2	2,2	1,6	1,0		244,7	163,6	120,4	80,0
Total % Reduction			33,2%	51,8%	69,5%			33,1%	50,8%	67,3%

Fonte: Chen e Kockelman (2016).

²¹ Vehicle kilometers travelled (VKT).

Nell'analisi vengono presentati tre diversi scenari per esaminare la riduzione dell'energia complessiva del ciclo di vita e delle emissioni di gas serra:

- scenario a basso impatto (pessimistico): stima più pessimistica degli studi precedenti;
- scenario a medio impatto (probabile): stima in accordo con studi precedenti;
- scenario ad alto impatto (ottimistico): stima più ottimistica.

Gli autori, utilizzando le stime di numerosi studi precedenti sul *car sharing*, quantificano le riduzioni di energia e di emissioni di gas serra nel ciclo di vita del *car sharing* rispetto a un PKT equivalente in un veicolo privato, combinando gli effetti della riduzione della proprietà del veicolo, della riduzione della distanza percorsa dal veicolo, dei miglioramenti dell'efficienza del carburante a livello di flotta, della riduzione della domanda di infrastrutture di parcheggio e dei viaggi spostati verso modalità non automobilistiche.

I risultati suggeriscono che l'uso del *car sharing* riduce in media il consumo individuale di energia per il trasporto e le emissioni di gas serra di circa il 51%. A livello individuale si traducono in un risparmio di circa il 5% di energia e di emissioni di gas serra legate al trasporto negli Stati Uniti. Questi risparmi di energia e di emissioni possono essere attribuiti principalmente al cambio di modalità e agli spostamenti evitati, seguiti da risparmi nella richiesta di infrastrutture di parcheggio e nel consumo di carburante. Se si tiene conto degli effetti di rimbalzo indiretti (supponendo che i risparmi sui costi di viaggio vengano poi spesi per altri beni e servizi), questi risparmi scendono ad appena il 3% per tutte le famiglie statunitensi.

Rabbitt e Ghosh (2016) hanno raccolto informazioni con un'indagine basata sulla tipologia degli spostamenti, sulla stima delle emissioni di CO₂ e degli spostamenti, utilizzando i dati del *Department Transport Data* dell'Irlanda. L'impatto sul calcolo delle emissioni e dei costi è stato misurato simulando scenari ipotetici di modifica dei comportamenti. Per il calcolo della CO₂ si è utilizzata la distanza degli spostamenti riportata nei questionari in base alla tipologia di vettura; qualora non riportata si è utilizzato il valore di 147,3 g/km (il CMT²² usa 150 g/km relativamente al parco auto irlandese).

Sono stati suddivisi i partecipanti in 3 categorie: 1) utenti del trasporto attivo, 2) utenti del TPL 3) utenti delle auto private. Sono stati simulati i seguenti scenari:

- scenario migliore (BCS): uso di bus, tram e trasporto attivo;
- scenario più probabile (MPS): uso di auto privata, TPL, e *car sharing*;
- scenario peggiore (WCS): sostituzione dell'auto privata con il *car sharing*.

I risultati mostrano una riduzione dei costi e delle emissioni: i proprietari di autoveicoli potrebbero ridurre le loro emissioni di CO₂ con il *car sharing* associato al trasporto attivo del 65%; invece se associato al TPL del 14-20%, mentre le emissioni aumenterebbero

²² *Environmental Protection Agency Ireland 2009. Change CMT calculator emission factor source EPA.*

leggermente per coloro che non possedevano un'automobile. Se i veicoli del *car sharing* fossero tutti elettrici si avrebbe una riduzione delle emissioni in tutti e tre gli scenari. Inoltre, è stata stimata una riduzione di 25,5 kt/anno di CO₂ a Dublino e di 69,6 kt/anno di CO₂ in Irlanda, se si utilizzano tutti veicoli elettrici per il *car sharing*.

Nijland e van Meerkerk (2017) hanno condotto uno studio in Olanda, basato sulla distribuzione di un questionario riguardante l'utilizzo ed il possesso dell'auto privata (prima e dopo l'introduzione del *car sharing*) ed i cambiamenti nelle modalità di spostamento. I risultati indicano che lo *sharing* non ha ridotto il numero di persone in possesso di auto privata ma probabilmente ha influenzato l'acquisto di una seconda auto.

Il calcolo delle emissioni di CO₂ è stato fatto con due metodologie:

- *tank-to-wheel* (TTW) che calcola solo le emissioni di CO₂ allo scarico;
- *well-to-wheel* (WTW) che considera anche le emissioni relative alla produzione di petrolio (relative alla produzione di petrolio e di elettricità).

I risultati mostrano che l'introduzione del *car sharing* ha determinato:

- una riduzione del 19% del numero di auto di proprietà per famiglia, si passa da una media di 0,89 auto di proprietà a 0,72, con una riduzione media di 0,17 auto (IC²³ 95%: 0,09-0,24) ed una riduzione delle emissioni di CO₂ che passa da -125 a -281 kg per anno, emissioni correlate alla riduzione delle auto di proprietà e riduzione del loro utilizzo;
- una riduzione dei km percorsi con l'automobile (-1.750 km) con un risparmio di CO₂ di 279 kg per anno;
- un aumento di 168 kg CO₂ all'anno dovuto all'utilizzo di altre modalità di trasporto.

In totale si avrebbe una riduzione compresa tra 236 a 392 kg CO₂ all'anno corrispondente ad una riduzione del 13-18% di emissioni CO₂ correlate alla riduzione della proprietà dell'autovettura di proprietà e alla riduzione dell'utilizzo dell'automobile.

L'introduzione del servizio di *car sharing* può comportare tre modifiche al comportamento individuali (Jung e Koo, 2018):

1. sostituzione dell'auto privata con un veicolo di *car sharing* (modifica delle emissioni di gas serra dovute alle due tipologie di veicolo);
2. sostituzione dell'uso del TPL (trasporto pubblico locale) con un veicolo di *car sharing* (cambiamento delle emissioni di gas serra derivante dall'uso di veicoli di *car sharing* da parte di un individuo non proprietario di un'auto);
3. cambiamento nel desiderio di proprietà di un veicolo, per esempio se il proprietario di un veicolo si disfa di un veicolo o un potenziale acquirente

²³ *Confidence interval* (CI): l'intervallo di confidenza si utilizza quando si stima un parametro, in quanto spesso è insufficiente individuare un singolo valore ed è invece opportuno accompagnare la stima con un intervallo di valori probabili per quel parametro.

abbandona il progetto di acquisto di un veicolo (il terzo effetto è relativo alla riduzione delle emissioni dovuta alla ridotta produzione di veicoli, basata sulla valutazione del ciclo di vita).

Questi cambiamenti comportamentali influenzano le emissioni di gas serra. Inoltre, la tipologia di carburante utilizzato dai veicoli in *sharing* (gasolio, benzina, gas, elettrico) influenza a sua volta le emissioni. L'introduzione del *car sharing* ha fatto risparmiare nel complesso l'1,2% del totale di CO₂ dovuta al trasporto su strada, con una riduzione di tonnellate emesse di CO₂ e nel primo e terzo caso e un aumento nel secondo caso.

Santos (2018) utilizza i seguenti modelli per la valutazione di diversi scenari:

- modello 1: *sharing* di auto *peer-to-peer* con una società che opera come *broker* facilitando il noleggio di autovetture fra privati attraverso una piattaforma *online*;
- modello 2: noleggio a breve termine di veicoli di proprietà della società che fornisce il servizio;
- modello 3: le società non possiedono direttamente le auto, ma sono i proprietari privati delle vetture che lavorano per la società fungendo da autisti (ad esempio, Uber);
- modello 4: *sharing* su richiesta di auto private, furgoni, autobus o altri veicoli, come i grandi taxi, condivisi da passeggeri che vanno nella stessa direzione

Gli impatti della mobilità condivisa sulla congestione e sulle emissioni di CO₂ sono stati parzialmente analizzati e valutati, anche se gli studi si sono focalizzati principalmente su piccoli campioni e casi di studio o hanno disegnato ipotesi future non ancora realizzate. Il problema nella valutazione degli impatti è che la percentuale di viaggi effettuati con modalità di trasporto a mobilità condivisa non è solo piccola, ma anche difficile da quantificare. Un'ulteriore complicazione risiede nell'effetto indesiderato, provocato dal pacchetto di incentivi pensato per incoraggiare la mobilità condivisa, che potrebbe contemporaneamente produrre la riduzione del ricorso al trasporto pubblico, che potrebbe non essere vantaggioso in termini di congestione del traffico e di emissioni di CO₂.

I modelli da 1 a 3 sono modelli che producono profitti per i privati, ma non sono chiari i benefici sociali che forniscono in termini di congestione e di emissioni di CO₂. Vi sono anche prove (limitate) che dimostrano che i modelli 1 e 2 non sostituiranno mai le modalità attualmente utilizzate per i viaggi di pendolarismo. Il modello 2 ha le sue origini in quella che era conosciuta come "auto club" prima dell'era di internet. Anche se le applicazioni *online* stanno contribuendo a rafforzare questo modello, l'evidenza (ancora una volta limitata) mostra che le famiglie possono rinunciare a una seconda o terza auto piuttosto che rinunciare completamente all'auto di proprietà e affidarsi completamente a questi servizi. Il modello 4, che prevede che le persone non solo condividano un veicolo, ma che viaggino insieme allo stesso tempo, è promettente in termini di congestione e di riduzione delle emissioni di CO₂, ma anche il più impegnativo, visti gli svantaggi in termini di tempi di attesa e di viaggio, di *comfort* e di convenienza, rispetto all'auto privata.

Olszewski *et al.* (2018) nel loro studio provano a risolvere i problemi di trasporto utilizzando la *gamification*, che incentiva il sistema di *car sharing*. L'obiettivo del sistema escogitato è ridurre significativamente il numero di automobili e, di conseguenza, alleviare gli ingorghi, nonché ridurre l'inquinamento e il consumo di energia. Essi hanno esaminato un campione rappresentativo della popolazione, che lavora in uno dei più grandi centri di uffici in Polonia (il cosiddetto "Mordor di Varsavia"). I dati raccolti sono stati elaborati utilizzando metodi di *data mining* spaziale e i risultati sono stati un insieme di parametri per il sistema multi-agente. Questo approccio ha permesso di eseguire una serie di simulazioni su un *set* di 100.000 agenti²⁴ e per selezionare un'efficace metodologia di *gamification* che supporti il processo di *car sharing*.

Per definire una metodologia è stata necessaria l'implementazione sequenziale di diversi componenti:

1. esame di un campione casuale rappresentativo di persone che lavorano nel "Mordor di Varsavia" per identificarne le preferenze, i bisogni e le capacità;
2. analisi, attraverso algoritmi, di *data mining* spaziale per identificare i problemi e le caratteristiche chiave che caratterizzano fasce d'età, residenti in diversi distretti cittadini, ecc.
3. elaborazione di una simulazione di cambiamenti del modo in cui i dipendenti di "Mordor" si spostano utilizzando variazioni di *gamification*, una parametrizzazione variabile del sistema multi-agente e ottimizzazione del sistema.
4. sviluppo un prototipo di "gioco serio" per il "Mordor" di Varsavia, la metodologia di *gamification* e un adeguato sistema di incentivi per i dipendenti (finanziario, sistema a punti, classifica, ecc.).

Il sondaggio è stato reso disponibile per una settimana (dal 28 aprile 2017 al 5 maggio 2017). Si sono registrate 337 risposte individuali fornite da 180 uomini (53%) e 157 donne (47%). Una chiara maggioranza dei rispondenti (64%) era costituita da giovani (26-35 anni) all'inizio della loro carriera professionale. Agli intervistati è stato chiesto quale mezzo di trasporto utilizzavano per spostarsi: circa il 70% degli intervistati viaggiava direttamente da casa al lavoro, il resto lasciava i propri figli o familiari all'asilo / scuola / lavoro lungo la strada. Durante il viaggio di ritorno, il 44% degli intervistati andava direttamente a casa, mentre il 56% passava a prendere i propri parenti e/o faceva *shopping*. Il sondaggio è stato progettato in modo tale da raccogliere dati relativi alla quantità di tempo trascorso in viaggio per lavoro, al luogo di lavoro, al mezzo di trasporto e alle direzioni in cui viaggiano da e verso il lavoro. Gli intervistati hanno anche risposto alle domande sul loro potenziale utilizzo del *car sharing* per i pendolari e quale tipo di sistema di incentivazione avrebbero preferito per incoraggiare la condivisione di veicoli privati o per unirsi a qualcuno nel loro tragitto giornaliero. La seconda parte del sondaggio consisteva nella raccolta di informazioni di base: sesso, età, occupazione e luogo di residenza. I problemi principali identificati sono stati gli ingorghi e i lunghi spostamenti per andare al lavoro (79%). Due

²⁴ Impiegati della Mordor di Varsavia.

terzi degli intervistati non ha mai condiviso la macchina; la stragrande maggioranza degli intervistati sarebbe stata disposta a provare il *car sharing*, se adeguatamente incentivata.

Conoscendo il livello di insoddisfazione per il traffico si è calcolato il prezzo base che si sarebbe disposti a pagare per ricevere un passaggio (offerente / acquirente) o per darlo (venditore).

La ricerca ha rivelato forti disparità nei risultati ottenuti, a seconda dei parametri di simulazione. Nei dati di riferimento, si ipotizzava che ogni veicolo fosse occupato da una persona (il conducente), risultante nel parametro HOV (*High Occupancy Vehicle*) per HOV2 = 0, per HOV3 = 0, HOVover3 = 0. Le restanti 56.000 persone che lavorano in "Mordor" viaggiavano con biciclette o mezzi pubblici. L'inclinazione (simile a quella dei conducenti) nei confronti della *gamification* e del *car sharing* è stata stabilita in base al sondaggio e alle analisi. Sono stati ipotizzati diversi scenari con due, tre e più di tre passeggeri che viaggiavano in automobile.

Si è ipotizzata che la lunghezza media del percorso fosse di 20 km in entrambe le direzioni e che il consumo medio di carburante negli ingorghi fosse di circa 8 litri per 100 km. Il modello di *gamification* avrebbe favorito una riduzione del numero di auto di 20.000 al giorno, con un'emissione totale di CO₂ di 140 tonnellate al giorno, corrispondente in un anno a un'emissione di 34.000 tonnellate per i veicoli a benzina. Supponendo che metà delle auto fosse un veicolo diesel, questo valore aumenta a quasi 50.000 tonnellate di CO₂ all'anno. Pertanto, la soluzione proposta non solo consentirebbe di risparmiare tempo ed energia, ma ridurrebbe anche le emissioni di CO₂ e quindi l'inquinamento atmosferico.

Gli autori suggeriscono che azioni di innovazione sociale supportate da soluzioni informatiche si dimostrerebbero cruciali per il funzionamento delle città intelligenti nell'era dello sviluppo dell'IoT (*Internet of Things*). Le moderne tecnologie non sono gli elementi decisivi per costruire una città veramente intelligente. L'aspetto più importante nella costruzione di una *smart city* è l'inclusione dei suoi abitanti nel processo di realizzazione di uno spazio urbano sostenibile e confortevole.

Kawaguchi *et al.* (2019) hanno utilizzato un modello di simulazione del ciclo di vita (LCS²⁵) per studiare due possibili scenari. Nel primo scenario il modello viene applicato per valutare gli effetti del passaggio da un sistema basato sulla proprietà dell'auto ad un sistema di *car sharing*. Nel secondo scenario un modello analogo viene applicato per valutare gli effetti derivanti dall'adozione di un sistema di *ride sharing*. Ogni modello comprende quattro processi: produzione di materiale, produzione del veicolo, utilizzo e smaltimento. La variabilità dei risultati ottenuti dipende dalla distribuzione di probabilità del tasso di sostituzione delle auto private che viene assunta nei modelli. Il numero di veicoli prodotti al mese diminuisce del 70% in entrambi gli scenari di *car sharing* e *ride sharing* rispetto allo scenario *baseline* con le autovetture di proprietà. Anche le emissioni di CO₂ sono ridotte negli scenari di *car sharing* e di *ride sharing* rispetto a quello con le auto di proprietà. Tuttavia, i tassi di riduzione delle emissioni di CO₂ sono diversi: si ottiene

²⁵ Life Cycle Simulation (LCS).

una riduzione del 47% nello scenario del *car sharing* ed una del 34% nello scenario del *ride sharing*. Questo perché le emissioni di CO₂ prodotte dai processi di utilizzo nello scenario di *ride sharing* aumentano a causa di differenti percorsi, riducendo l'effetto della diminuzione delle emissioni di CO₂ dovute ai processi di produzione.

Amatuni *et al.* (2020) hanno effettuato un'analisi prima e dopo l'introduzione del *car sharing* in tre casi studio (Paesi Bassi, San Francisco, Calgary) confrontando le emissioni totali legate alla mobilità in un anno prima e dopo l'adesione al *car sharing*. La stima delle emissioni è stata effettuata sulla base delle distanze annuali percorse con i diversi modi di trasporto e dei corrispondenti fattori di emissione relativi al ciclo di vita dei veicoli.

Sono stati sviluppati tre scenari:

- Scenario 1: i veicoli che hanno partecipato al *car sharing* ad un certo punto della loro vita non hanno un chilometraggio (LTM²⁶) significativamente diverso rispetto alla media dei veicoli privati. Questa circostanza potrebbe verificarsi se questi veicoli non vengono utilizzati in modo significativamente diverso dall'uso privato durante il loro periodo di *car sharing*, cosicché il loro LTM medio rimane lo stesso.
- Scenario 2: il LTM aumenta per i veicoli del *car sharing* rispetto ai loro omologhi privati, in tutti i casi in cui viene fatto un uso più intensivo dei veicoli in condivisione.
- Scenario 3: i veicoli del *car sharing* sono soggetti a LTM più bassi rispetto ai loro omologhi privati. Questo potrebbe essere il caso se il loro LTM rimane lo stesso mentre l'utilizzo annuale diminuisce a causa della logistica della piattaforma di *car sharing* o se i costi di partecipazione sono più elevati.

Per i Paesi Bassi, si stima una diminuzione totale annua di 150-219 kg di CO_{2eq} (186 kg di CO_{2eq} per lo scenario 1). Ciò si traduce in una riduzione del 7-10% delle emissioni totali annue legate alla mobilità grazie alla partecipazione di *car sharing*. Le emissioni nel caso di San Francisco sono diminuite di 440 - 500 kg di CO_{2eq} per utente (470 per lo scenario 1) con una diminuzione del 16-18% rispetto alle emissioni di partecipazione pre-*car sharing*. Per il caso studio di Calgary, si stima una riduzione annuale per membro di 84 kg di CO_{2eq}.

Secondo lo studio di Martin e Shaheen (2011), 84 kg di CO_{2eq} si traducono in una riduzione del 3% delle emissioni totali relative al trasporto indotte dalla partecipazione a Car2Go di un membro medio.

Tali studi non hanno tenuto conto degli effetti di rimbalzo derivanti dall'utilizzo di altre forme di mobilità in fase di riduzione della guida e dell'eventuale cambiamento della durata (o chilometraggio) dei veicoli condivisi. In tutti e tre gli studi regionali, confrontando le distanze annuali percorse dalle modalità di trasporto urbano (prima e durante la partecipazione al *car sharing*) e applicando i fattori di emissione legati al ciclo di vita piuttosto che all'uso, si è scoperto che questi effetti di rimbalzo, insieme alla

²⁶ *Lifetime mileage* (LTM) indica il chilometraggio percorso da un veicolo nell'intero arco di vita.

prospettiva LCA, riducono significativamente i risparmi di emissioni di gas serra presentati nei lavori precedenti.

Lo studio di Ding *et al.* (2019) ha riguardato il ciclo di vita del modello di *car sharing* e ha stimato le emissioni di gas serra dei diversi modelli di *car sharing* il potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra del *car sharing* per il trasporto urbano. Mentre la maggior parte degli studi precedenti ha calcolato le emissioni di gas serra o il potenziale di riduzione delle emissioni di gas serra sulla base dei dati relativi alla riduzione dell'auto di proprietà e della distanza percorsa all'anno, questo studio ha preso in esame la sostituzione dell'auto privata con i servizi di *car sharing*, stimando le emissioni di gas serra in base alle distanze percorse dall'auto privata. Sono stati considerati quattro modelli di *car sharing*, analizzando le emissioni di gas serra sulla base di due dimensioni temporali (in un anno e alla fine del ciclo di vita) e si è valutata la riduzione delle emissioni di gas serra associate al trasporto. Lo studio comprende auto private e quattro tipi di modelli di *car sharing* che includono il modello di *time-sharing* e di condivisione dello stesso tempo. Il *time-sharing* indica che una singola auto viene utilizzata da più individui in momenti diversi, incluso il modello libero, il modello a due nodi e il modello A-B. La condivisione dello stesso tempo significa che un'auto viene utilizzata da più individui contemporaneamente. Il *car pooling* rientra in questa categoria. I fattori di emissione di gas serra esaminati sono relativi a CO₂, CH₄ e N₂O.

Il numero di passeggeri utilizzato in questo studio si basa sulla letteratura precedente: il numero di passeggeri è impostato a 2 per le diverse tipologie di *car sharing* e per l'auto privata, mentre per il *car pooling* il numero dei passeggeri è più alto (3 persone/viaggio). La distanza stimata è circa 20.000 km/anno per lo *sharing*. Dall'analisi della letteratura, la riduzione di veicoli di proprietà variava da 1 a 6, 5 e con il *car pooling* circa 3. Per il calcolo si è utilizzata "la distanza di viaggio virtuale". Sono pertanto stimate le emissioni derivate dalla produzione dei veicoli e dal loro utilizzo secondo le modalità prese in considerazione (veicoli privati, diverse tipologie di *sharing*²⁷, *car pooling*). Le emissioni cambiano a seconda della tipologia dei veicoli (elettrici o convenzionali) utilizzati e della durata di utilizzo dello *sharing*: mentre per l'utilizzo di breve durata le emissioni si riducono solo se la flotta dei veicoli utilizzati per lo *sharing* è di tipo elettrico, esse aumentano se la flotta è composta da veicoli convenzionali. Nel lungo periodo, invece, il *car sharing* e il *car pooling* comportano una riduzione delle emissioni di GHG.

Sempre con l'ottica di perseguire pratiche che contribuiscano alla transizione verso la sostenibilità, la ricerca di Ferrari Luna *et al.* (2020) si concentra sul modello di business della *sharing economy*, indagando gli impatti di un sistema di *e-carsharing* sulle emissioni di anidride carbonica e sull'adozione di veicoli elettrici. Le domande alla base di questo studio sono due: quali sono gli effetti a lungo termine delle strategie di *e-carsharing* nella riduzione delle emissioni di CO₂ e nell'adozione di veicoli elettrici? Qual è il ruolo delle scelte politiche nell'implementazione di *e-carsharing*?

²⁷ *Free floating, A-A, A-B.*

Lo studio combina due strategie politiche: l'implementazione della VAMO (*Veículos Alternativos para Mobilidade*) il primo sistema di *e-carsharing* in Brasile, e una politica di rottamazione dei veicoli convenzionali. Per lo sviluppo della ricerca è stato utilizzato un modello di dinamiche del sistema (System Dynamics), già utilizzato in numerosi studi sulla mobilità sostenibile, per simulare quindici scenari finalizzati a misurare l'influenza di VAMO sulle emissioni di CO₂, sul mercato dei veicoli elettrici a Fortaleza (Brasile) e sul parco veicoli convenzionali. Viene descritto come è nato e si è sviluppato VAMO sul territorio, un'iniziativa che dal 2016 promuove la mobilità urbana sostenibile attraverso il *car sharing* elettrico, che conta oggi 20 veicoli, disponibili in 12 stazioni in tutta la città di Fortaleza. Lo scopo è quello di combinare il trasporto pubblico con altre modalità di trasporto puntando a riqualificare l'intero sistema di mobilità della città. In base alle informazioni fornite dal comune di Fortaleza e dal Dipartimento della mobilità locale è stato costruito il modello di dinamica del sistema per valutare gli effetti delle politiche di *e-carsharing* a Fortaleza e testare gli interventi politici. Il modello è composto da cinque moduli (1) il modulo del veicolo leggero convenzionale (CV), (2) il modulo del veicolo elettrico. (3) il modulo *e-carsharing* VAMO, (4) il modulo della popolazione, (5) il modulo delle emissioni di CO₂.

Per i calcoli delle emissioni dei veicoli convenzionali la flotta è stata suddivisa in 4 gruppi a seconda dell'età di immatricolazione dei veicoli. Per i veicoli elettrici e i veicoli di *e-carsharing* sono stati calcolati i tassi di adozione. È stata calcolata l'adozione di veicolo elettrici e convenzionali in base alle fasce di età della popolazione in età lavorativa. Per il calcolo delle emissioni di CO₂ sono stati utilizzati modelli per quattro tipologie di veicoli: etanolo, benzina, NGV e *flex-fuel* (etanolo-gas). Assumendo che la flotta EV e la flotta VAMO non emettono CO₂ nel modello.

Partendo dai dati governativi del 2002 sul parco auto convenzionale ed elettrico gli autori hanno sviluppato 8 scenari messi a confronto con lo scenario *business-as-usual* ed è stata effettuata un'analisi di sensibilità per calcolare le tre variabili chiave di interesse: flotta CV, flotta EV ed emissioni di CO₂.

Tutti gli scenari proposti per i test di sensibilità si sono dimostrati più ottimistici del BAU. Vale la pena notare che alcuni scenari potrebbero essere troppo ottimistici (come l'intervallo più alto 700.000 veicoli elettrici nel 2040 per lo scenario 8) e possono avere bisogno di altri tipi di verifiche. Gli scenari più ottimistici presentano una differenza di circa 200.000 tonnellate di emissioni di CO₂ in meno rispetto al BAU nel 2040.

Le simulazioni hanno, comunque, mostrato che la combinazione tra le due politiche raggiunge i risultati migliori con una riduzione del 29% delle emissioni di CO₂ e aumentando l'adozione di veicoli elettrici del 36%, rispetto allo scenario *business-as-usual*. La politica di incentivi VAMO è un fattore importante per ridurre le emissioni e per aumentare la consapevolezza sull'importanza dell'utilizzo dei veicoli elettrici per uno sviluppo sostenibile, evidenziando il ruolo del governo come imprenditore istituzionale, stimolando e sostenendo lo schema VAMO.

Un altro lavoro che si propone di stimare gli effettivi benefici ambientali legati al *car sharing* è quello di Migliore *et al.* (2020). L'area di studio selezionata è la città di Palermo

caratterizzata da un uso eccessivo dell'auto privata, da un parco auto non rinnovato e dalla crisi del trasporto pubblico, fattori che contribuiscono notevolmente all'inquinamento ambientale.

La metodologia utilizzata è COPERT V, sviluppata nell'ambito del progetto europeo CORINAIR (*Coordination Information Air*) per la stima delle emissioni inquinanti legate al trasporto su strada. Il software COPERT V viene usato per valutare le emissioni prodotte da un determinato parco veicoli. Importante è la correlazione tra le emissioni e la velocità media dei veicoli, elemento preso in considerazione dal modello utilizzato.

La metodologia parte dalla conoscenza delle seguenti variabili:

- tipo di veicolo (tipo di carburante, anno di produzione, cilindrata per i veicoli leggeri o i motocicli e peso per i veicoli di trasporto merci)
- velocità media;
- chilometri percorsi;
- presenza o assenza del ciclo di preriscaldamento (data l'esistenza dei tre contributi di emissione: freddo, caldo ed evaporativo);
- tipo di strada percorsa (urbana, extraurbana, autostrada);
- caratteristiche ambientali.

Il software prende in considerazione dieci inquinanti: ossidi di azoto NO_x , ossido di diazoto N_2O , ossidi di zolfo SO_x , metano CH_4 , idrocarburi volatili non metallici, monossido di carbonio CO , biossido di carbonio CO_2 , ammoniaca NH_3 , particolato e composti di piombo.

Il modello COPERT V associa ad ogni classe di veicoli e per ogni inquinante le funzioni matematiche per la stima delle emissioni e del consumo di carburante in funzione della velocità. Queste funzioni rappresentano curve medie di emissione e di consumo di carburante; esse sono derivate da misurazioni di emissioni per diversi tipi e marche di veicoli e si riferiscono a test effettuati in molti Paesi europei, su una varietà di cicli di guida urbani ed extraurbani, compresi quelli previsti dalle normative europee. Le quantità totali di sostanze emesse in atmosfera dal trasporto su strada dipendono sia dalle emissioni specifiche dei singoli veicoli (fattori di emissione) sia dal numero delle diverse flotte (benzina, diesel, GPL, veicoli con o senza catalizzatore, ecc.).

Le variabili incluse nel modello sono state valutate analizzando il parco veicoli circolante a Palermo, raccogliendo dati sulla flotta e sulle caratteristiche del servizio di *car sharing* nel 2016 e determinando le modalità di utilizzo del veicolo condiviso tramite interviste. Il *car sharing* è stato introdotto a Palermo nel 2009 dall'azienda comunale che si occupa del trasporto pubblico (AMAT), fattore che favorisce una profonda cooperazione e complementarità tra il *car sharing*, il trasporto pubblico e con le infrastrutture per pedoni e ciclisti, fondamentale al fine di migliorare l'intermodalità in termini di prezzi e infrastrutture, scoraggiando, contemporaneamente l'uso delle auto private. Dal 2014 al

2017 si è registrata una crescita costante del servizio sia per quanto riguarda il numero di iscritti, sia dei km percorsi, del numero dei viaggi e delle ore di viaggio.

La flotta è composta da veicoli di diverse tipologie tra cui 24 veicoli elettrici. Da un'indagine sulla *customer satisfaction*, promossa da AMAT nel 2017, si evince che il mezzo preferito, anche per brevi spostamenti (sotto i 10 minuti) rimane l'auto privata. Questo porta a congestioni negli assi principali della città, soprattutto nelle ore di punta, e al superamento dei limiti legali delle concentrazioni di inquinanti atmosferici. In particolare, il PM10 supera i limiti più volte all'anno ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ è il valore massimo giornaliero di legge e il numero massimo di superamenti consentiti in un anno è pari a 35).

Per quanto riguarda i risultati, sono state calcolate le emissioni di CH_4 , CO , CO_2 , NMVOC, NO_x e PM10 ed è stato fatto il confronto tra la flotta del *car sharing* e l'acquisto di nuove auto a benzina.

I NMVOC hanno la massima riduzione (83%), mentre la flotta di *car sharing* aumenta le emissioni di CH_4 e NO_x , perché sono presenti veicoli diesel e CNG. CO_2 e PM10, che sono problematici per Palermo, hanno una riduzione significativa con l'uso del *car sharing* al posto dell'auto privata, rispettivamente del 38% e del 25%. In generale gli effetti del *car sharing* risultano positivi in termini di riduzione delle emissioni, ma sono limitati rispetto alle emissioni della flotta registrata che circola a Palermo. A questo si somma che il 43% delle emissioni di PM10 a Palermo è dovuto agli impianti di riscaldamento, il 42% è causato dal trasporto stradale e la restante parte è dovuta all'industria, all'agricoltura e ad altre tipologie di trasporto. Per quanto riguarda i COVNM, il 60% delle emissioni è prodotto dai rifiuti, mentre il 33% dal trasporto stradale.

Per aumentare i benefici ambientali del *car sharing*, AMAT dovrebbe quindi aumentare il numero di utenti, ampliando la flotta con veicoli elettrici o ibridi. Se la conversione all'elettrico non fosse realizzabile, si dovrebbero destinare tutte le auto elettriche alle aree più inquinate della città. Infine, sarebbe anche necessario ridurre le operazioni di trasferimento dei veicoli applicando criteri di ottimizzazione.

La ricerca di Chicco & Diana (2021) analizza le conseguenze ambientali delle scelte modali quotidiane abilitate dai servizi di *car sharing*. Lo scopo è stimare quantitativamente gli impatti in termini di inquinamento atmosferico e di emissioni di gas serra legati ai modelli di deviazione modale a livello di viaggio individuale dai mezzi di trasporto diversi dal *car sharing*. L'indagine ha riguardato un campione rappresentativo della popolazione residente a Torino, scelta sia perché è una delle città con la peggiore qualità dell'aria in Europa, sia per la presenza di tre fornitori di *car sharing* con circa 900 auto e più di 181.000 iscritti. Due operatori forniscono uno schema *free-floating* con veicoli a benzina (710 auto). L'altro operatore fornisce un servizio a *station based* con veicoli elettrici (190 auto) e stazioni di ricarica (94) distribuite in città.

I dati sulle modalità di viaggio sono stati raccolti tramite interviste telefoniche tra 2016 ed il 2017 a 4.466 utenti, di cui solo il 51 % è stato selezionato perché gli altri utenti risiedevano fuori Torino. Sono stati indagati gli aspetti socioeconomici e le modalità di spostamento,

ed è stato chiesto se dopo l'introduzione del *car sharing* ci fosse intenzione di modificare le abitudini di viaggio.

Una seconda indagine è stata effettuata nel 2019 con l'intenzione di comprendere le differenze tra chi utilizzava il *car sharing* e chi non ne faceva uso indagando le modalità di spostamento in città, la proprietà o meno di un'auto privata, ecc. Sono state intervistati 436 utenti, solo 181 erano registrati al servizio di *car sharing*.

I dati raccolti tramite questionario (indagine di viaggio a preferenze dichiarate, un'indagine *Stated-preferences*), combinati insieme a un altro dataset con viaggi reali effettuati nella stessa area, sono stati utilizzati per creare modelli di *switch* modale; da cui poi sono stati sviluppati differenti scenari di mobilità e i relativi livelli di inquinamento, così da mostrare lo scenario che possa massimizzare gli impatti positivi del *car sharing*. Per ottenerlo sono stati sviluppati cinque scenari di mobilità:

- uno scenario base (che rappresenta la situazione di mobilità della città di Torino nel 2019);
- uno scenario di crescita (lo scenario di crescita rappresenta un'ipotetica situazione di mobilità futura che si verificherebbe dopo un'ampia diffusione del *car sharing* senza specifiche misure politiche di supporto);
- uno scenario di pianificazione (lo scenario di pianificazione è definito come lo scenario che massimizza i benefici ambientali complessivi del *car sharing*, espressi in termini di riduzione delle emissioni di gas serra e inquinanti. Diversamente allo scenario di crescita, lo scenario di pianificazione rappresenta una situazione che può essere ottenuta solo con specifiche misure politiche per incoraggiare il cambiamento modale dalle auto private);
- uno scenario di pianificazione completamente elettrico (questo scenario deriva dallo scenario di pianificazione, ma con l'assunto che la flotta di *car sharing* sia completamente elettrica, e quindi non produrrebbe emissioni di gas di scarico);
- uno scenario di assenza di *car sharing* (questo scenario è stato valutato per capire come gli attuali utenti del *car sharing* cambierebbero le loro scelte di viaggio in caso di assenza di servizi di *car sharing*).

L'area scelta per lo studio, la città di Torino, è caratterizzata da uno dei tassi di motorizzazione più alti d'Italia: nel 2018 si contano 653 auto private ogni 1.000 abitanti (ISFORT, 2019). Per la stima delle emissioni di gas serra e degli inquinanti atmosferici è stato utilizzato il metodo per la valutazione delle esternalità nel settore dei trasporti (European Commission, 2019)²⁸. Le distanze sono derivate dalle interviste e le API (Application Programming Interface) di Google Directions sono state utilizzate per stimare le emissioni di gas serra e di alcuni inquinanti

²⁸ European Commission, 2019. Handbook on the external costs of transport: Version 2019. <https://doi.org/10.2832/27212>

L'analisi *tank-to-wheel* (TTW) è stata utilizzata per considerare solo le emissioni di scarico sia di CO₂ che di inquinanti senza il contributo legato alla produzione e distribuzione dell'energia. Gli inquinanti considerati sono quelli tipicamente utilizzati nella stima dei costi esterni dei trasporti, che sono riportati in Commissione europea (2019), ovvero composti organici volatili non metanici (NMVOC), particolato sotto i 2,5 µm (PM2.5), ossidi di azoto (NO_x) e ammoniaca (NH₃).

Per quanto riguarda la composizione del parco auto del 2018 (anno di riferimento nello scenario di base), sono state utilizzate statistiche annuali prodotte dall'Automobile Club d'Italia (ACI). Il parco auto urbano è stato segmentato secondo gli standard di emissione euro, il tipo di carburante e l'anno di prima immatricolazione. I coefficienti di emissione degli inquinanti allo scarico per le auto alimentate in modo convenzionale sono i valori limite definiti dall'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA). I veicoli elettrici sono stati assunti come privi di emissioni allo scarico.

In merito alle altre modalità di trasporto utilizzate riportate nei viaggi (in bicicletta o a piedi) dell'indagine *Revealed Preference* (RP)²⁹ in un contesto reale, le emissioni di CO₂ e di inquinanti prodotte sono state considerate trascurabili. Per quanto riguarda il trasporto pubblico, poiché questo servizio di solito funziona indipendentemente dall'utilizzo della capacità, l'offerta è stata assunta costante in tutti gli scenari; quindi, una persona in più che passa al *car sharing* non diminuisce le emissioni del trasporto pubblico.

I risultati sono suddivisi in base agli scenari:

- Scenario di base: la maggior parte dei viaggi stimati su base giornaliera (circa 1,3 milioni) viene effettuata utilizzando auto private (53,7%) e circa un terzo il trasporto pubblico della città. Il *car sharing* soddisfa una piccola parte della domanda di viaggio giornaliera (0,4%). Le emissioni stimate di CO₂ sono pari a 1982 tonnellate.
- Scenario di crescita: le percentuali dei viaggi deviati al *car sharing* sono così suddivisi, i viaggi effettuati con auto private hanno il valore più alto (59,6%), i viaggi con trasporto pubblico (28,8%), e dalle modalità attive (9,7% e 1,9% per i viaggi a piedi e in bicicletta, rispettivamente). Questi risultati confermano che gli spostamenti effettuati all'interno di un'area urbana sia con l'auto che con i mezzi pubblici, hanno caratteristiche che possono essere soddisfatte dai servizi di *car sharing*. Al contrario, gli *switch* da modalità non motorizzate sono inferiori in quanto probabilmente le caratteristiche dei viaggi come la distanza, il tempo e il costo sono diverse. I risultati mostrano che il *car sharing* attrae 116.424 viaggi giornalieri aggiuntivi, che rappresentano il 9,5% dell'attuale domanda giornaliera di viaggio. Infine, osservando la quantità stimata di emissioni di CO₂ si può notare che la riduzione delle emissioni di CO₂ prodotta dallo *switch* modale dall'auto privata al *car sharing* (1.914 tonnellate nello scenario di crescita contro 1.982 tonnellate in quello di base) non è completamente eliminata dall'aumento delle

²⁹ Indagini sui comportamenti effettivi (rivelati) dagli utenti

emissioni di CO₂ prodotte dai viaggi in *car sharing* che erano precedentemente effettuati a piedi, in bicicletta e con il trasporto pubblico (81 tonnellate contro 2 tonnellate).

- Scenario di pianificazione: la minimizzazione dei costi relativi alle emissioni si ottiene quando non ci sono variazioni delle tariffe del *car sharing* e un aumento del 100% delle tariffe di parcheggio. Il numero di viaggi devianti dalle modalità attive e dal trasporto pubblico è lo stesso dello scenario di crescita, poiché la tariffa del *car sharing* è invariata. Tuttavia, il numero totale di viaggi giornalieri che passano al *car sharing* è più alto di quello dello scenario di crescita a causa dell'aumento del numero di viaggi in auto privata. Non sembra esserci alcuna differenza pratica tra gli scenari di crescita e di pianificazione in termini di emissioni. Questo è dovuto principalmente al fatto che qui vengono studiate solo le deviazioni modali verso il *car sharing*. D'altra parte, è chiaro che un aumento dei costi di parcheggio potrebbe anche produrre uno spostamento dall'uso dell'auto privata a un maggiore uso del trasporto pubblico e delle modalità attive.
- Scenario di pianificazione completamente elettrico: le condizioni di base (scelte modali e chilometri o km percorsi) sono le stesse dello scenario precedente da cui si discosta in quanto la flotta è assunta come completamente elettrica; quindi, si differenzia solo per le emissioni prodotte, poiché le emissioni di scarico del *car sharing* elettrico sono assunte pari a zero.
- Scenario senza *car sharing*: stima come si redistribuirebbe la domanda di viaggio servita dai servizi di *car sharing* nello scenario di base in uno scenario ipotetico senza il servizio di *car sharing*. Dai questionari risulta che il 33,2% userebbe l'auto privata, ma il 42,1% sceglierebbe il trasporto pubblico. Inoltre, una piccola percentuale di spostamenti è assegnata al taxi perché alcuni intervistati hanno dichiarato che userebbero un taxi se il *car sharing* non fosse disponibile.

Come risultati si ottiene che la potenziale domanda viaggio giornaliera di *car sharing* potrebbe aumentare di circa l'1% rispetto allo scenario base, fino a circa il 10% stimato nello scenario di pianificazione. La domanda di viaggio soddisfatta con il *car sharing* è principalmente sottratta alle auto private; tuttavia, l'applicazione dei modelli di commutazione mostra viaggi devianti anche dal trasporto pubblico e dalle modalità attive. Questo produce risultati diversi quando si considerano le emissioni di gas serra o di inquinanti atmosferici. La riduzione delle emissioni di CO₂ prodotta dalla deviazione dei viaggi dall'auto privata al *car sharing* è completamente compensata dall'aumento delle emissioni di CO₂ prodotte dai viaggi in *car sharing* che sono stati precedentemente effettuati a piedi, in bicicletta e con il trasporto pubblico. Quindi, se da una parte il *car sharing* può produrre un effetto negativo in termini di emissioni di CO₂, dall'altra i motori meno inquinanti della flotta del *car sharing* ridurrebbero la quantità di emissioni inquinanti. Gli autori poi compiono un passo ulteriore convertendo le quantità stimate in termini monetari, così da poter valutare l'impatto complessivo. I risultati mostrano che lo scenario di pianificazione porterebbe a una riduzione delle esternalità legate ai gas serra e

all'inquinamento atmosferico, pari ad un risparmio dell'1% in termini di costi sociali correlati che può arrivare fino al 3,6% promuovendo le flotte di *car sharing* elettrico.

Di seguito di si riporta la tabella in cui sono stimate le quantità di gas serra e di inquinanti atmosferici per ogni scenario analizzato e la loro rispettiva variazione percentuale rispetto allo scenario di base:

Tabella 1.2 – Emissioni di gas serra per veicolo privato (PKT equivalenti)

Scenario	Emissioni giornaliere stimate (% di variazione rispetto allo scenario base)				
	CO ₂ [t]	NM VOC [t]	NO _x [t]	NH ₃ [kg]	PM2.5 [kg]
Base	1984	2.39	5.89	253	122
Crescita	1995 (+0.55)	2.35 (-1.90)	5.73 (-2.73)	253 (-0.03)	119 (-2.41)
Pianificazione	1994 (+0.52)	2.35 (-1.90)	5.72 (-2.79)	253 (-0.03)	119 (-2.41)
Pianificazione elettrico	1912 (-3.62)	2.31 (-3.56)	5.68 (-3.54)	244 (-3.60)	118 (-3.55)
Senza car sharing	1984 (≈ 0)	2.40 (+0.03)	5.90 (+0.04)	253 (≈ 0)	122 (≈ 0)

Fonte: Chicco e Diana, 2021.

1.3 Conclusioni

L'analisi dei 23 studi sul *car sharing* ha evidenziato quanto segue.

Nove studi hanno utilizzato *survey* per raccogliere informazioni su dati anagrafici, modalità di spostamento, distanze percorse, tipologia di carburante utilizzato, cambiamenti nelle modalità di spostamento dopo l'introduzione del servizio di *sharing*; i dati raccolti tramite questionario sono però auto dichiarati e non rilevati, tali dati possono essere inficiati dagli intervistati con sovrastima o sottostima di tali dati.

Dieci studi hanno realizzato scenari simulati, utilizzando differenti metodologie di calcolo per stimare la riduzione delle emissioni, in particolare in letteratura esistono tre metodi di calcolo comunemente usati per le emissioni di CO₂:

- il metodo *tank-to-wheel* (TTW), che tiene conto delle emissioni e del consumo di carburante derivanti dallo spostamento del veicolo nella fase di esercizio;
- il metodo *well-to-tank* (WTT), che include anche le emissioni coinvolte nella produzione di carburante (sia per la benzina che per l'elettricità) (in questo caso, la produzione di benzina e la produzione di elettricità);
- l'analisi del ciclo di vita (LCA), che tiene conto anche delle emissioni derivanti dalla costruzione, utilizzo, manutenzione e dalla demolizione di un veicolo privato.

Quattro studi hanno utilizzato sia questionari che scenari per integrare al meglio le informazioni raccolte e stimare in modo più accurato il risparmio di emissioni di CO₂.

Dall'analisi degli studi sembra che le famiglie rinuncino all'acquisto di una seconda o terza auto piuttosto che rinunciare completamente all'auto di proprietà e affidarsi esclusivamente ai servizi di *car sharing*. Sembra inoltre che aumenti: l'utilizzo dei veicoli a discapito dei mezzi pubblici, tra coloro che non possiedono l'auto privata; il numero di utenti che utilizzano l'auto per spostamenti brevi con lievi incrementi di emissioni di CO₂, ma che le percorrenze in totale si riducano, con una maggiore riduzione delle emissioni di CO₂ conseguente dall'utilizzo di auto privata su lunghe percorrenze, con preferenza di spostamenti intermodali.

Inoltre, dagli studi emerge che in media, i veicoli in *car sharing* sono più nuovi della maggior parte dei veicoli personali, il che significa che i miglioramenti nella tecnologia dei motori, nell'efficienza dei carburanti e nei livelli di emissione sono più elevati nei veicoli in *car sharing* che nelle auto personali; pertanto, minori sono le emissioni specifiche di CO₂ (-15-20%) delle diverse flotte di *car sharing* rispetto alle auto personali (veicoli nuovi o esistenti). Quindi la *sharing mobility* garantisce l'uso di veicoli più performanti dal punto di vista ambientale perché le autovetture delle flotte sono rinnovate e sostituite con ritmi sicuramente maggiori rispetto a quanto non avvenga nel privato.

Veicoli più nuovi ed efficienti delle flotte di *car sharing* e migliore pianificazione degli spostamenti hanno un ruolo importante nella riduzione delle emissioni di gas serra. In altri casi, invece si riscontra un maggiore utilizzo dei mezzi pubblici e di tipologie di mobilità dolce (andare a piedi e in bicicletta). L'entità di questo effetto varia a seconda delle caratteristiche sociodemografiche dell'utente, delle condizioni geografiche e delle caratteristiche del servizio di trasporto pubblico, della natura e delle distanze da percorrere. L'uso del *car sharing* è preferito per spostamenti per *shopping* sociali mentre l'utilizzo del TPL è preferito dai pendolari. Inoltre, le auto private spesso sono sproporzionate per la tipologia di utilizzo (troppo potenti e troppo grandi per le loro necessità quotidiane) mentre le auto in *sharing* sono scelte in base alle necessità. In aggiunta, il *car sharing* favorisce la "pianificazione del viaggio" da parte degli utenti che si ipotizza comportare l'aggregazione di viaggi più brevi in un minor numero di viaggi più lunghi.

Minori km percorsi e utilizzo più efficiente del motore (partenze a caldo) determinano un consumo di carburante (ed emissioni) significativamente minore, mentre i motori sottoutilizzati e che funzionano in modo poco efficiente (partenze a freddo) determinano maggiori consumi e di conseguenza maggiori emissioni.

Per un viaggiatore che percorre relativamente pochi chilometri ogni anno e vive in un quartiere urbano ad alta densità e con un buon accesso ai mezzi di trasporto e alle modalità non motorizzate, entrare a far parte di un'organizzazione di *car sharing* può ridurre il suo consumo di energia e le emissioni di gas serra dal 33 al 70%. Nello scenario più probabile, entrambi i livelli si riducono di circa il 51% dopo l'adesione ad un servizio di *car sharing*. In altre parole, il contributo più importante alla riduzione dell'impatto del *car sharing* è rappresentato dalla riduzione degli spostamenti con veicoli privati. Il principale fattore che contribuisce ai benefici ambientali sembra derivare dalla necessità di un viaggiatore di

pianificare gli spostamenti e dalla consapevolezza del costo dei viaggi in automobile, dal momento che la maggior parte dei servizi di *car sharing* richiede la prenotazione e opera su base *pay-by-the-minute*.

L'utilizzo del *car sharing* porta ad un risparmio nell'uso di energia per il trasporto privato e nelle emissioni di gas serra. Tale riduzione dei consumi e delle emissioni può essere attribuita principalmente ai cambiamenti delle modalità degli spostamenti (km evitati), seguiti da risparmi nella richiesta di infrastrutture per il parcheggio e del consumo di carburante.

I vantaggi del *car sharing* sono stati illustrati in molti studi precedentemente descritti, tuttavia, pochi tra questi hanno esaminato l'impatto del *car sharing* sul ciclo di vita (comprese le catene di fornitura a monte dei veicoli e del carburante) e sulle infrastrutture. Utilizzando le stime delle riduzioni del ciclo di vita delle emissioni di energia e di gas serra del *car sharing* rispetto a un veicolo privato, è possibile sommare gli effetti della riduzione delle emissioni relative alla proprietà dei veicoli, alla distanza percorsa, al miglioramento dell'efficienza del carburante a livello di flotta, alla riduzione della domanda di infrastrutture di parcheggio.

Per un viaggiatore che soddisfa i criteri di un utente ideale³⁰, si prevede che l'adesione ad un servizio di *car sharing* diminuirà il suo consumo di energia per il trasporto e le emissioni di gas serra del 51%, principalmente grazie alla diminuzione di utilizzo e dei VKT evitati, ma anche per la diminuzione della domanda di infrastrutture dedicate al parcheggio, che contribuisce anche a una significativa riduzione del consumo di energia e delle emissioni di gas serra, come riconosciuto attraverso il processo LCA.

Gli studi esaminati inoltre, suggeriscono che i servizi di *car sharing station-based* sono utilizzati principalmente per viaggi più brevi, con una durata del tempo di parcheggio più breve, mentre i servizi di *car sharing free-floating* tendono ad essere utilizzati per una più ampia varietà di spostamenti e distanze. In termini di modifiche delle modalità, i servizi di *car sharing free-floating* sono generalmente intermodali (a piedi e in bicicletta) rispetto ai sistemi *station-based*. Inoltre, alcuni potenziali impatti non sono ancora quantificati. Il miglioramento dei convertitori catalitici e delle flotte condivise elettrificate, che potrebbero dipendere da materie prime rinnovabili per la loro alimentazione, potrebbe migliorare il contributo del *car sharing* alla riduzione della domanda di energia e delle emissioni

³⁰ Come si desume dai questionari utilizzati negli studi sopracitati, l'utente medio può essere identificato con un giovane che non possiede l'auto di proprietà e che vive in aree poco servite dal TPL.

1.4 Tabella riepilogativa *car sharing*

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Bundesverband e Loose (2009)		Questionario somministrato in 14 Paesi europei (384.749 utenti e 11.909 veicoli).	<p>Quattro diversi scenari</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) lo spostamento non avrebbe avuto luogo senza il servizio di <i>car sharing</i> o sarebbe stato procrastinato ad un momento successivo. 2) il viaggio con l'auto in <i>car sharing</i> sarebbe stato fatto utilizzando il TPL, la bicicletta o una combinazione di modalità di trasporto ecocompatibili, che avrebbero migliorato l'ecobilancio; 3) è probabile che i partecipanti al <i>car sharing</i> avrebbero preso in prestito auto da amici o parenti, apportando un effetto marginale sull'ecobilancio; 4) una parte degli aderenti al servizio avrebbe acquistato una o più auto con cui avrebbe compiuto gli spostamenti. Questo avrebbe notevolmente peggiorato l'ecobilancio in quanto, questa scelta di trasporto, avrebbe anche influenzato altri viaggi 	Ogni veicolo di <i>car sharing</i> è responsabile di una minore quantità di emissioni di CO ₂ all'anno (-140 kg in Germania; -290 kg in Svizzera).

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Firnorn e Müller (2011)	La stima della CO ₂ non ha considerato il LCA relativo alle fasi di costruzione e manutenzione	45-65 domande	Tre possibili scenari diversi in base ai consumi: un caso migliore (consumi 3,4l/100km), uno intermedio (3,6l/100 km) e uno peggiore (3,9 l/ 100km).	Riduzione delle emissioni di CO ₂ pari all'89% nel caso migliore e del 77% nel caso peggiore.
Martin e Shaheen (2011)		Questionario <i>on line</i> , somministrato agli utenti del <i>car sharing</i> e ai gestori del servizio.		I risultati indicano un risparmio di -0,53 t GHG/anno tra i rispondenti
Baptista <i>et al.</i> (2014)	Vengono presentati due metodologie: 1) <i>tank-to-wheel</i> (TTW) che tiene conto delle emissioni e del consumo di carburante derivanti dallo spostamento del veicolo nella fase di esercizio; 2) <i>well-to-tank</i> (WTT) che tiene conto delle emissioni che derivano dal portare un vettore di energia dalla sua fonte fino alle sue fasi di utilizzo.		Nell'analisi vengono presentati tre diversi scenari 1) scenario con auto convenzionali (BAU); 2) scenario con veicoli elettrici interamente ibridi (SC1 HEV); 3) scenario con veicoli elettrici (SC2 EV).	Le stime relative allo scenario BAU (motorizzazione tradizionale) mostrano una riduzione di 9,5 tonnellate di CO ₂ che possono essere ulteriormente ridotte del 35% nello scenario SC1 HEV (motorizzazione ibrida) e del 65% nello scenario SC2 EV (motorizzazione elettrica).
Namazu e Dowlatabadi (2015)			Due scenari, 1) <i>baseline</i> senza <i>car sharing</i> 2) l'altro con viaggi in <i>car sharing</i> per tre tipologie di famiglie: con figli e almeno una persona che lavora, senza figli e almeno una persona che lavora e senza figli e senza lavoro.	Prendendo in considerazione tutti i fattori, il potenziale massimo di riduzione delle emissioni legato al servizio di <i>car sharing</i> dovrebbe essere nell'ordine di 48-55%, soprattutto per le famiglie senza figli.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Nijland <i>et al.</i> (2015)	È stato utilizzato il metodo WTW per confrontare i chilometri percorsi, integrato con l'analisi del ciclo di vita	È stato somministrato un questionario a 363 utenti.		La riduzione dell'uso delle autovetture del <i>car sharing</i> produce, in media, una riduzione annuale di 90 kg di CO ₂ .
Chen e Kockelman (2016)	Si è applicata l'analisi del ciclo di vita per quantificare i risparmi energetici di emissioni di gas ad effetto serra dovuti al <i>car sharing</i> , utilizzando l'approccio tradizionale che prende in considerazione la distanza equivalente, percorsa da ogni persona con il proprio veicolo.		<p>Nell'analisi vengono presentati tre diversi scenari per esaminare la riduzione dell'energia complessiva del ciclo di vita e delle emissioni di gas serra.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) scenario a basso impatto: stima più pessimistica degli studi precedenti; 2) scenario a medio impatto: stima in accordo con studi precedenti; 3) scenario ad alto impatto: stima più ottimistica. 	I risultati suggeriscono che l'uso del <i>car sharing</i> riduce in media il consumo individuale di energia per il trasporto e le emissioni di gas serra di circa il 51%.
Rabbitt e Ghosh (2016)	Un'indagine basata sulla tipologia degli spostamenti, sulla stima delle emissioni di CO ₂ e degli spostamenti, utilizzando i dati del <i>Department Transport Data</i> dell'Irlanda.		<p>Tre scenari: scenario migliore (BCS), uno probabile (MPS) e uno peggiore (WCS).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) scenario migliore: uso di bus, tram e trasporto attivo; 2) scenario più probabile: uso di auto privata, TPL, e <i>car sharing</i>; 3) scenario peggiore: sostituzione dell'auto privata con il <i>car sharing</i>. 	I risultati mostrano una riduzione dei costi e delle emissioni: i proprietari di autoveicoli potrebbero ridurre le loro emissioni di CO ₂ con il <i>car sharing</i> associato al trasporto attivo del 65%; invece se associato al TPL del 14-20%.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Nijland e van Meerkerk (2017)	<p><i>tank-to-wheel</i> (TTW) che calcola solo le emissioni di CO₂ allo scarico;</p> <p><i>well-to-wheel</i> (WTW) che considera anche le emissioni relative alla produzione di petrolio (relative alla produzione di petrolio e di elettricità).</p>	Distribuzione di un questionario riguardante l'utilizzo dell'auto privata (prima e dopo l'introduzione del <i>car sharing</i>).		Una riduzione compresa tra -236 a -392 kg CO ₂ all'anno corrispondente ad una riduzione del 13-18% di emissioni CO ₂ correlate alla riduzione della proprietà dell'autovettura di proprietà e alla riduzione dell'utilizzo dell'automobile.
Jung e Koo (2018)			<p>Tre scenari:</p> <p>1) sostituzione dell'auto privata con un veicolo di <i>car sharing</i></p> <p>2) sostituzione dell'uso del TPL (trasporto pubblico locale) con un veicolo di <i>car sharing</i></p> <p>3) cambiamento nel desiderio di proprietà di un veicolo</p>	L'introduzione del <i>car sharing</i> ha fatto risparmiare nel complesso l'1,2% del totale di CO ₂ dovuta al trasporto su strada, con una riduzione di tonnellate emesse di CO ₂ e nel primo e terzo caso e un aumento nel secondo caso.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Santos (2018)			<p>Quattro scenari ipotizzati:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>sharing</i> di auto <i>peer-to-peer</i> con una società che opera come <i>broker</i> facilitando il noleggio di autovetture di diversi privati attraverso una piattaforma <i>online</i>; 2. noleggio a breve termine di veicoli di proprietà della società che fornisce il servizio; 3. le società non possiedono direttamente le auto, ma sono i proprietari privati delle vetture che lavorano per la società fungendo da autisti; 4. <i>sharing</i> su richiesta di auto private, furgoni, autobus o altri veicoli, come i grandi taxi, condivisi da passeggeri che vanno nella stessa direzione. 	<p>I modelli da 1 a 3 sono modelli che producono profitti per i privati ma non sono chiari i benefici sociali che forniscono in termini di congestione e di emissioni di CO₂.</p> <p>Il modello 4, che prevede che le persone non solo condividano un veicolo, ma che viaggino insieme allo stesso tempo, è promettente in termini di congestione e di riduzione delle emissioni di CO₂, ma anche il più impegnativo, visti gli svantaggi in termini di tempi di attesa e di viaggio, di comfort e di convenienza, rispetto all'auto privata.</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Olszewski <i>et al.</i> (2018)	<p>Esame di un campione casuale rappresentativo. Analisi, attraverso algoritmi, di <i>data mining</i> spaziale per identificare i problemi e le caratteristiche chiave. Elaborazione di una simulazione di cambiamenti del modo in cui i dipendenti di "Mordor" si spostano utilizzando variazioni di <i>gamification</i>. Utilizzo della metodologia di <i>gamification</i> e un adeguato sistema di incentivi</p>	<p>Il sondaggio disponibile per una settimana (dal 28 aprile 2017 al 5 maggio 2017) sulla tipologia di mezzo di trasporto utilizzato. Sono stati raccolti dati relativi alla quantità di tempo trascorso in viaggio per lavoro, al luogo di lavoro, al mezzo di trasporto e alle direzioni</p>	<p>Sono stati ipotizzati diversi scenari con due, tre e più di tre passeggeri che viaggiavano in automobile.</p>	<p>Il modello di <i>gamification</i> avrebbe favorito una riduzione del numero di auto di 20.000 al giorno, con un'emissione totale di CO₂ di 140 tonnellate al giorno, corrispondente in un anno a un'emissione di 34.000 tonnellate per i veicoli a benzina. Supponendo che metà delle auto fosse un veicolo diesel, questo valore aumenta a quasi 50.000 tonnellate di CO₂ all'anno.</p>
Kawaguchi <i>et al.</i> (2019)	<p>Modello di simulazione del ciclo di vita (LCS)</p>		<p>Due gli scenari possibili. Nel primo scenario il modello viene applicato per valutare gli effetti del passaggio da un sistema basato sulla proprietà dell'auto ad un sistema di <i>car sharing</i>. Nel secondo scenario un modello analogo viene applicato per valutare gli effetti derivanti dall'adozione di un sistema di <i>ride sharing</i>.</p>	<p>Si ottiene una riduzione del 47% nello scenario del <i>car sharing</i> ed una del 34% nello scenario del <i>ride sharing</i>. Questo perché le emissioni di CO₂ prodotte dai processi di utilizzo nello scenario di <i>ride sharing</i> aumentano a causa di differenti percorsi, riducendo l'effetto della diminuzione delle emissioni di CO₂ dovute ai processi di produzione.</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Amatuni <i>et al.</i> (2020)			<p>Sono stati sviluppati tre scenari:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. i veicoli che hanno partecipato al <i>car sharing</i> ad un certo punto della loro vita non hanno un chilometraggio (LTM) significativamente diverso rispetto alla media dei veicoli privati. 2. il LTM aumenta per i veicoli del <i>car sharing</i> rispetto ai loro omologhi privati, in tutti casi in cui viene fatto un uso più intensivo dei veicoli in condivisione. 3. i veicoli del <i>car sharing</i> sono soggetti a LTM ancora più bassi rispetto ai loro omologhi privati. 	<p>Per i Paesi Bassi, si stima una diminuzione totale annua di 150-219 kg di CO₂e, 186 kg di CO₂e per lo scenario 1. Ciò si traduce in una riduzione del 7-10% delle emissioni totali annue legate alla mobilità grazie alla partecipazione di <i>car sharing</i>. Le emissioni di San Francisco sono diminuite di 440 - 500 kg di CO₂e per membro (470 per lo scenario 1) con una diminuzione del 16-18% rispetto alle emissioni di partecipazione pre-<i>car sharing</i>. Per il caso studio di Calgary, si stima una riduzione annuale per membro di 84 kg di CO₂e.</p>
Ding <i>et al.</i> (2019)	<p>Lo studio ha preso in esame la sostituzione dell'auto privata con i servizi di <i>car sharing</i>, stimando le emissioni di gas serra in base all'unità funzionale di copertura della distanza percorsa dall'auto privata.</p>			<p>Le emissioni cambiano a seconda della tipologia dei veicoli utilizzati e della durata di utilizzo dello <i>sharing</i>; mentre per l'utilizzo di breve durata le emissioni si riducono solo se la flotta dei veicoli utilizzati per lo <i>sharing</i> è di tipo elettrico, esse aumentano se la flotta è composta da veicoli convenzionali. Nel lungo periodo, il <i>car sharing</i> e il <i>car pooling</i> comportano una riduzione delle emissioni di GHG</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Ferrari Luna <i>et al.</i> (2020)	Per lo sviluppo della ricerca è stato utilizzato un modello di dinamiche del sistema (System Dynamics), già utilizzato in numerosi studi sulla mobilità sostenibile		Gli autori hanno sviluppato 8 scenari messi a confronto con lo scenario <i>business-as-usual</i> è stata effettuata una analisi di sensibilità per calcolare le tre variabili chiave di interesse: flotta CV, flotta EV ed emissioni di CO ₂ .	Le simulazioni hanno mostrato una riduzione del 29% delle emissioni di CO ₂ e l'aumento dell'adozione di veicoli elettrici del 36%, rispetto allo scenario <i>business-as-usual</i> .
Migliore <i>et al.</i> (2020)	COPERT			I NMVOC hanno la massima riduzione (83%), mentre la flotta di <i>car sharing</i> aumenta le emissioni di CH ₄ e NO _x , perché sono presenti veicoli diesel e CNG. CO ₂ e PM10 hanno una riduzione significativa con l'uso del <i>car sharing</i> al posto dell'auto privata, rispettivamente del 38% e del 25%. In generale gli effetti del <i>car sharing</i> risultano positivi in termini di riduzione delle emissioni, ma sono limitati rispetto alle emissioni della flotta che circola a Palermo.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Chicco e Diana (2021)	L'analisi <i>tank-to-wheel</i> (TTW) è stata utilizzata per considerare solo le emissioni di scarico sia di CO ₂ che di inquinanti senza il contributo legato alla produzione e distribuzione dell'energia.	I dati sulle modalità di viaggio sono stati raccolti tramite interviste telefoniche tra 2016/2017 a 4.466 utenti, di cui solo il 51 % è stato selezionato perché gli altri utenti risiedevano fuori Torino. Una seconda indagine è stata effettuata nel 2019 per comprendere le differenze tra chi utilizzava il <i>car sharing</i> e chi non ne faceva uso indagando le modalità di spostamento in città, la proprietà o meno di un'auto privata, ecc. Sono stati intervistati 436 utenti, solo 181 erano registrati al servizio di <i>car sharing</i> .	Sono stati sviluppati cinque scenari di mobilità: uno scenario base, uno di crescita, uno di pianificazione, uno di pianificazione completamente elettrico ed uno di assenza di <i>car sharing</i> .	La domanda potenziale di <i>car sharing</i> potrebbe aumentare da circa l'1% della domanda di viaggio giornaliera servita nello scenario base, fino a circa il 10% stimato nello scenario di pianificazione. La domanda di viaggio soddisfatta con il <i>car sharing</i> è principalmente sottratta alle auto private; tuttavia, l'applicazione dei modelli di commutazione mostra viaggi devianti anche dal trasporto pubblico e dalle modalità attive. Viene osservato che la riduzione delle emissioni di CO ₂ prodotta dalla deviazione dei viaggi dall'auto privata al <i>car sharing</i> è completamente compensata dall'aumento delle emissioni di CO ₂ prodotte dai viaggi in <i>car sharing</i> che sono stati precedentemente effettuati a piedi, in bicicletta e con il trasporto pubblico

2 *Bike sharing*

2.1 Introduzione

Il *bike sharing* (BS) sta diventando una modalità di spostamento alternativo all'auto privata sempre più popolare in molti Paesi. I sistemi di *bike sharing* (BS) esistono da quasi cinquant'anni, ma solo nell'ultimo decennio sono cresciuti in modo significativo in termini di prevalenza e popolarità, fino a essere presenti in oltre 800 città in tutto il mondo con una flotta globale che supera le 900.000 biciclette (Meddin, 2015). Il *bike sharing* prevede la messa a disposizione di un pool di biciclette attraverso una rete di "stazioni" strategicamente posizionate, tipicamente distribuite in un'area urbana, accessibile a diversi tipi di utenti (membri registrati o utenti occasionali) per noleggi di breve periodo.

Diversi ricercatori hanno esaminato i fattori motivanti associati all'uso del *bike sharing*. Tra gli elementi che ne facilitano l'uso, la convenienza economica è il principale fattore motivante, oltre all'eliminazione delle problematiche associate ai furti di biciclette private. Un altro elemento importante è la distanza tra la propria abitazione e la stazione di *bike sharing* più vicina che si è rivelato essere un predittore affidabile dell'utilizzo del *bike sharing*. Alle motivazioni appena elencate, si aggiunge l'aspetto ricreativo, che sembra essere un elemento essenziale per gli utenti occasionali del BS.

Secondo la letteratura i servizi di BS contribuiscono alla realizzazione di una serie di obiettivi:

- ridurre i viaggi in automobile con una sola persona e alleviare la congestione del traffico;
- ridurre le emissioni di anidride carbonica (CO₂) e migliorare la qualità dell'aria riducendo le altre emissioni inquinanti del traffico motorizzato;
- migliorare la salute pubblica ed aumentare i livelli di attività fisica praticata dalla popolazione;
- contribuire a promuovere la mobilità ciclistica urbana (ad esempio, eliminando le problematiche associate ai furti ed al parcheggio delle biciclette di proprietà);
- migliorare l'accessibilità alla mobilità flessibile, migliorando le scelte di trasporto e le opportunità di multimodalità e di intermodalità (ad esempio, agendo come soluzione di "primo" o "ultimo miglio") in relazione al trasporto pubblico;
- migliorare la sicurezza stradale, in particolare per i ciclisti;
- migliorare l'immagine e la vivibilità delle città e sostenere le iniziative locali legate al mondo dell'economia e del turismo.

Valutare i vantaggi dei sistemi di *bike sharing* è utile per favorire lo sviluppo dei programmi di BS in città. Tra i benefici sopra citati, il presente studio si concentra sull'impatto

ambientale dell'implementazione del BS in termini di riduzione dei gas serra. Dopo una ricerca bibliografia effettuata sui *database* PubMed, Science Direct e DOAJ, sono stati selezionati 13 articoli, di cui, 3 hanno utilizzato modelli per la simulazione di scenari per stimare gli effetti del BS mentre un altro studio ha utilizzato tecniche di *big data*, per stimare gli impatti del BS sul consumo di energia e sulle emissioni.

2.2 Stato dell'arte

Steyn e Lane (2012) nel loro studio hanno stimato l'impatto di un sistema di *bike sharing* pubblico (PBS) a Vancouver sulla riduzione delle emissioni di CO₂, dovuta ad una ripartizione modale dalle autovetture private a favore della mobilità ciclistica. I ricercatori hanno formulato un modello numerico per stimare l'entità della riduzione delle emissioni di CO₂ (tonnellate all'anno) a seguito della realizzazione del PBS a Vancouver. Tale modello incorpora alcune variabili ritenute significative come, ad esempio, la stagionalità delle precipitazioni e la normativa che richiede ai ciclisti di indossare il casco. Entrambi questi fattori impattano in modo significativo sull'uso di una PBS a Vancouver. I ricercatori hanno condotto un'indagine con un questionario su un campione di utenti, per raccogliere i dati di *input* del modello. I dati riguardanti le preferenze e le preoccupazioni dei cittadini sono stati raccolti con lo scopo di ottenere informazioni preziose relative al potenziale successo del PBS. Il questionario è stato distribuito a 324 persone ed i rispondenti sono stati 231, nei mesi di febbraio e marzo 2012.

È stata calcolata una riduzione delle emissioni di CO₂ variabile in un *range* compreso tra le 820 e le 990 tonnellate per anno, a seconda dello scenario preso in considerazione. I risultati di questo studio hanno indicato che il potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂, derivante dall'uso di un PBS a Vancouver, è compreso tra lo 0,07% (potenziale minimo) e lo 0,14% (potenziale massimo) del totale delle emissioni annuali dovute al trasporto cittadino. L'uso delle biciclette può essere implementato indicando la sua efficacia in strategie che hanno lo scopo di aumentare l'attività fisica, migliorare la salute e lo stile di vita della popolazione piuttosto che strategie che hanno come obiettivo la riduzione delle emissioni di CO₂.

Con il modello numerico è stato possibile calcolare una stima delle seguenti variabili:

1. emissioni correnti delle autovetture private;
2. percorrenze con altri mezzi di spostamento evitate grazie al *bike sharing* (km);
3. probabilità di utilizzo del BS sotto diverse condizioni.
4. riduzione delle emissioni di CO₂ alla settimana per i diversi scenari ipotizzati;
5. riduzione delle emissioni di CO₂ per stagione (inverno, estate);
6. preoccupazioni espresse dai rispondenti in merito all'implementazione del PBS e loro peso percentuale.

Riguardo le stime di riduzione della CO₂, i ricercatori hanno preso in considerazione i dati sulle emissioni del 2008, che riportavano circa 880.000 tonnellate all'anno di emissioni di CO₂ da parte di veicoli leggeri a Vancouver, e le previsioni che tale profilo emissivo sarebbe rimasto invariato nel 2012. A partire da tale valore, è stata quindi calcolata la riduzione percentuale netta delle emissioni di CO₂.

Dall'analisi dei questionari, si evince che la normativa sull'uso del casco e la stagionalità delle precipitazioni sono i fattori in grado di orientare maggiormente le scelte dei rispondenti in merito all'adesione al PBS, e per tale motivo sono state inserite nel modello come variabili significative.

I risultati del modello mostrano che la riduzione delle emissioni di CO₂ sia significativamente influenzata dalla legge sul casco. Con la legge in vigore e senza il noleggio del casco incluso nel servizio di BS, la riduzione potenziale massima di CO₂ sarebbe di 820 ± 180 tonnellate all'anno. Con l'attuale legge sul casco ed il noleggio del casco incluso, gli autori hanno stimato una riduzione potenziale massima di 930 ± 200 tonnellate all'anno. Infine, in assenza di una legge sul casco la riduzione sarebbe ancora maggiore attestandosi sulle 990 ± 220 tonnellate di CO₂ all'anno. Queste valutazioni sono state basate sui risultati delle indagini che hanno indicato che vi sarebbe una maggiore probabilità di utilizzare il PBS a Vancouver se ci fosse la possibilità di utilizzare caschi a noleggio, o nessuna normativa sui caschi.

Sempre dai risultati dei questionari sono state calcolate le percorrenze evitate³¹ con i PBS. L'indagine ha mostrato che le persone erano più propense a utilizzare la PBS per i viaggi sotto i 7 km.

Riguardo ai problemi di un sistema PBS le principali preoccupazioni riguardavano: il maltempo, la legge sui caschi, la sicurezza stradale e le infrastrutture ciclabili.

Relativamente ai costi, la maggioranza degli intervistati sarebbe stata disposta a pagare un canone mensile massimo di 10 dollari. Molti intervistati hanno dichiarato che avrebbero usato il PBS occasionalmente e quindi avrebbero preferito non acquistare un abbonamento, ma optare invece per il pagamento di una quota di utilizzo.

Fishman *et al.* (2014) hanno esaminato il cambiamento nell'uso dell'auto dopo l'introduzione del *bike sharing* andando a misurare le percorrenze in autovettura evitate grazie all'uso del BS. Un secondo aspetto considerato nello studio è quello relativo ai servizi di supporto come i veicoli a motore utilizzati per la ridistribuzione e la manutenzione della flotta. La ridistribuzione si riferisce alla pratica in base alla quale l'operatore gestisce veicoli speciali che raccolgono le biciclette dalle stazioni che sono a pieno carico per spostarle in stazioni che hanno una ridotta scorta di biciclette. Tale ridistribuzione richiede un consumo non trascurabile di carburante ed è quindi importante che tale aspetto sia preso in considerazione nei programmi di BS. Questi due aspetti sono stati sommati per fornire

³¹ Distanza precedentemente percorsa con altre modalità di spostamento.

un quadro complessivo del contributo del *bike sharing* alle modifiche dei chilometri percorsi dai veicoli a motore (VKT, ovvero i chilometri percorsi dalle autovetture).

Le città prese in esame dagli autori sono Melbourne, Brisbane, Washington, Londra e Minneapolis/St. Paul. Sono stati analizzati i programmi di *bike sharing* degli ultimi 5 anni e sono state raccolte le informazioni sui singoli spostamenti. Anche gli utenti aderenti al servizio di *car sharing* sono stati inviati a compilare un questionario *on line*. Tutte queste indagini sono state di ampio respiro ma con una domanda comune: "pensando al tuo ultimo viaggio, quale modalità di trasporto avresti utilizzato, se non fosse esistito il servizio di *bike sharing*?".

La riduzione dei viaggi in auto è stata stimata moltiplicando la distanza percorsa per il tasso di sostituzione dell'auto. L'analisi mostra che, per il 2012, l'utilizzo del *bike sharing* ha contribuito a ridurre di 115.826 km i viaggi in auto a Melbourne e fino a 632.841 km a Londra. A Washington, invece, nonostante si registri un numero di viaggi quasi dieci volte superiori a quelli di Brisbane, l'impatto della riduzione dell'uso dell'auto è solo di 3,5 volte quella di Brisbane. La differenza è dovuta ad un tasso di sostituzione dell'auto del 21% per Brisbane, rispetto al solo 7% per Washington.

Gli autori hanno condotto anche un'analisi di sensibilità per determinare l'impatto della velocità media delle corse in bicicletta sulla riduzione dell'uso delle autovetture private. Una riduzione della velocità media della bicicletta da 12 a 10 km/h riduce la stima della distanza percorsa in auto del 20%, mentre un aumento a 14 km/h della velocità media della bicicletta aumenta del 20% la distanza percorsa. L'analisi di sensibilità è stata utilizzata anche nella sezione "Impatto della condivisione della bicicletta sui chilometri percorsi dai veicoli" per mostrare il suo impatto complessivo sui cambiamenti nei VKT.

Altro fattore analizzato è stato la redistribuzione delle biciclette, attività necessaria per ridurre la probabilità che le stazioni di attracco siano completamente vuote o piene. La redistribuzione della flotta è tipicamente ottenuta attraverso l'uso di camion e rimorchi, e questi sono responsabili di molti degli impatti (quali congestione, inquinamento) che i sistemi di BS mirano a ridurre.

Confrontando le stime della riduzione degli spostamenti in auto come conseguenza dell'uso di veicoli a motore associato al funzionamento del BS, gli autori hanno stimato l'effetto netto del *bike sharing* sui VKT, per ogni chilometro percorso dai veicoli a motore associati al funzionamento dei programmi di BS. I risultati mostrano che, nelle città esaminate, si sono evitati tra i 2 e i 4 km percorsi da auto private, ad eccezione di Londra, dove la relazione è invertita. Infatti, a Londra per ogni km evitato dalle auto private ci sono 2,2 km percorsi dai veicoli di supporto, probabilmente a causa delle grandi distanze percorse da chi utilizza il BS. A Londra il tasso di sostituzione dell'automobile è del 2,2%.

L'analisi di sensibilità considera anche le velocità medie del *bike sharing*. La riduzione delle velocità medie a 10 km/h mostra una lieve riduzione dell'uso dell'auto privata, mentre un aumento della velocità a 14 km/h mostra una maggiore riduzione dell'uso dell'auto.

Se si sommano i risultati di tutte le città essi indicano un aumento complessivo dei km percorsi con l'uso dei veicoli a motore come conseguenza della redistribuzione (cioè risultano più chilometri percorsi da veicoli di supporto utilizzati per la redistribuzione delle biciclette rispetto ai chilometri evitati con la sostituzione dell'auto privata grazie all'utilizzo del *bike sharing*). Il risultato è fortemente influenzato da Londra, che, come descritto in precedenza, ha registrato una redistribuzione della flotta sostanzialmente più elevata. Rimuovendo Londra dall'analisi, e prendendo in considerazione solo Melbourne, Washington e Minneapolis, l'impatto complessivo del *bike sharing* sull'uso dei veicoli a motore è pari ad una riduzione di 421.895 km dell'utilizzo di veicoli a motore.

L'analisi presentata offre un risultato controintuitivo: i programmi di *bike sharing* possono portare ad un aumento complessivo dell'uso di veicoli a motore. Come già evidenziato in precedenza, l'impatto del *bike sharing* sull'uso dell'auto è determinato in larga misura dal tasso di sostituzione dell'auto.

Quando si confrontano i modelli di trasporto dei pendolari per ciascuna delle città incluse nell'analisi, si possono distinguere due gruppi: città ad alto e basso utilizzo dell'auto privata. Secondo i dati raccolti³², nelle città di Brisbane, Melbourne e Minneapolis il 70-76% dei residenti si reca al lavoro in auto. In queste città si registrano anche tassi relativamente elevati di sostituzione delle auto: valori compresi tra il 19% e il 21% di utenti che avrebbero utilizzato l'auto per gli spostamenti. A Londra e Washington, invece, solo il 36% e il 46% dei residenti rispettivamente va al lavoro in auto³³ e i programmi registrano un tasso di sostituzione dell'auto rispettivamente del 2% e del 7%. Sulla base dell'analisi condotta dagli autori è evidente la relazione, tra l'uso dell'auto e il tasso di sostituzione con l'introduzione dei servizi di BS.

Alla base dei diversi tassi di sostituzione potrebbero esserci altre motivazioni quali la densità e l'accesso al trasporto pubblico. Londra e Washington hanno densità di popolazione più elevate rispetto alle altre città incluse nell'analisi. Sono necessarie ulteriori ricerche per determinare la presenza e la forza di queste e l'esistenza di altri potenziali fattori esplicativi per i diversi tassi di sostituzione delle auto.

Nello studio si evidenzia come gli ostacoli all'utilizzo del BS possano essere suddivisi in due categorie: ostacoli di carattere generale all'uso della bicicletta, come le preoccupazioni degli utenti inerenti alla sicurezza stradale o le distanze da percorrere, e ostacoli più specifici, come ad esempio l'ubicazione delle stazioni.

I risultati di questo lavoro dimostrano che, affinché i programmi di BS ottimizzino il loro impatto sulla riduzione dell'uso dell'automobile, è necessario attuare misure volte a favorire il passaggio da una modalità di trasporto basata sull'autovettura privata al BS.

³² Australian Bureau of Statistics, 2013; United States Census Bureau, 2013.

³³ Transport for London, 2011b; United States Census Bureau, 2014.

Shaheen (2014) ha analizzato il *bike sharing* pubblico in Canada, negli Stati Uniti e in Messico. Nel 2014, i programmi di *bike sharing* pubblico esistevano in 712 città di cinque continenti, con circa 806.200 biciclette in 37.500 stazioni.

Il BS basato sulla tecnologia informatica può essere facilitato attraverso una rete di stazioni (tipicamente incustodite) o attraverso il BS senza banchina, dove i ciclisti usano il loro dispositivo elettronico per localizzare la posizione di una bicicletta nelle vicinanze. La maggior parte dei programmi di *bike sharing* copre il costo della manutenzione, stoccaggio e parcheggio della bicicletta. I viaggi possono essere da un punto ad un altro, andata e ritorno, o entrambi, permettendo l'uso della bicicletta per spostamenti a senso unico e come integrazione per la connettività multimodale. In generale, i viaggi inferiori ai 30 minuti sono gratuiti.

Nello studio è stato valutato il cambiamento nel comportamento in materia di spostamento degli utenti che hanno aderito ai diversi programmi di BS presenti ed è stata fatta una revisione della letteratura sugli impatti del BS.

I risultati della revisione della letteratura suggeriscono che il *bike sharing* potrebbe ridurre le emissioni per effetto del cambiamento modale di spostamento. Ad esempio, con una media di 78.000 viaggi al giorno e circa 20 minuti per viaggio, gli utenti di Vélib³⁴ percorrono circa 312.000 chilometri al giorno³⁵. Un'automobile che percorre questa stessa distanza avrebbe prodotto circa 57.720 chilogrammi di CO₂ al giorno. Inoltre, dopo il lancio di Vélib nel 2007, la quota di utilizzo della bicicletta a Parigi è aumentata da circa l'1% nel 2001 al 2,5% nel 2007³⁶. Lo studio Citi Bike a New York City³⁷ ha registrato quasi 529.000 viaggi e 2.092.147 milioni di chilometri percorsi dopo un solo mese di funzionamento (dati dal 27 maggio al 26 giugno 2013³⁸). A Boston, i dati di Hubway³⁹ mostrano una compensazione di 285 tonnellate di carbonio da quando il *bike sharing* pubblico è iniziato a luglio 2011⁴⁰. Sebbene limitati, i dati disponibili suggeriscono anche che il *bike sharing* pubblico abbia contribuito a cambiare le abitudini nelle modalità di spostamento. Durante il primo anno di Velo'v⁴¹, Lione ha documentato un aumento del 44% dei viaggi in bicicletta⁴². Il 96% dei membri del *bike sharing* pubblico di Lione era costituito da nuovi

³⁴ Vélib è un programma pubblico di noleggio biciclette di Parigi. Il servizio è stato lanciato il 15 luglio 2007 con 10.000 bici e 750 stazioni automatiche.

³⁵ DeMaio P., 2009. *Bike-Sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future*. Journal of Public Transportation 14-4, pp. 41-56.

³⁶ The Globe and Mail, 2009. *Paris's Pedal Power Sets Free Uncivilized Behaviour*. <http://velo optimum.net/velonouvelles/9/ART/6juin/GlobeMail20.htm>

³⁷ Citi bike a New York City è un programma pubblico di noleggio biciclette con 14,500 biciclette e 900 stazioni

³⁸ Citi Bike, 2013. <https://www.citibikenyc.com/how-it-works>

³⁹ <https://www.boston-discovery-guide.com/hubway.html>

⁴⁰ Hinds, Kate. 2011. *In Its First Season, Boston Bike Share Exceeds Projections; Will Expand Next Spring*. <http://transportationnation.org/2011/11/29/in-its-first-season-boston-bike-share-exceeds-projections-will-expand-next-spring/>

⁴¹ Società di *bike sharing* di Lione.

⁴² Bührmann, S., 2007. *New Seamless Mobility Services: Public Bicycles*.

utenti che in precedenza non avevano mai utilizzato la bicicletta nel centro della città. L'uso della bicicletta a Parigi è aumentato del 70% dopo il lancio di Vélib⁴³.

I risultati degli studi indicano anche che programmi di *bike sharing* pubblico hanno un impatto positivo sulla percezione pubblica del ciclismo come modalità di trasporto praticabile.

Sembra inoltre esserci una correlazione tra *bike sharing* e tassi di utilizzo più elevati di mezzi pubblici. La maggior parte delle stazioni BS, quelle più utilizzate, era nei pressi delle fermate della Métro di Parigi ed il 54% degli utenti del BS ha iniziato o concluso un viaggio in *bike sharing* in una stazione di transito.

L'indagine degli autori esamina l'impatto del *bike sharing* pubblico sia dal punto di vista sociale che ambientale; i questionari sono stati distribuiti *on line* agli utenti (6.373 rispondenti), mentre agli operatori (205 rispondenti) sono state fatte interviste; l'indagine è stata svolta in 5 cinque città in Messico, Canada e Stati Uniti. Il questionario ha raccolto informazioni sulla demografia, sul reddito, sull'età, genere, razza, sui cambiamenti nelle modalità di spostamento, prima e dopo l'introduzione del *bike sharing*, sull'utilizzo del TPL (maggiore o minore frequenza di utilizzo), sull'utilizzo dell'auto personale e sulla mobilità pedonale, infine sono state poste domande sulla sicurezza stradale.

I risultati del questionario mostrano un minor utilizzo dei mezzi pubblici da parte degli utenti del *bike sharing*, ma anche una riduzione dell'auto privata (a Montreal e Toronto, il 29% e il 35% ha dichiarato di guidare meno; a Minneapolis San Paolo e Salt Lake City, il 53% e il 55% e a Città del Messico, il 53%). Inoltre, vi è un aumento degli spostamenti a piedi a Città del Messico, Minneapolis-Saint Paul e Salt Lake City, mentre vi è una riduzione a Montreal e a Toronto.

Incrociando i dati dei viaggi in *bike sharing* con i dati di spostamento modale si evidenzia che gli intervistati che utilizzavano il BS per sostituire altre modalità, lo impiegavano più frequentemente, facendo (in media) più viaggi rispetto a quelli che lo utilizzavano come complemento ad altre modalità.

Sebbene questo studio fornisca stime aggiornate e quantitative dei benefici ambientali del *bike sharing*, vi sono diverse limitazioni. In primo luogo, a causa del problema della *privacy*, i dati di condivisione delle bici sono stati pre-elaborati dalla società Mobike. Ogni viaggio, inoltre, conteneva solo una raccolta di posizioni spaziali cronologicamente non ordinate, senza informazioni temporali. Di conseguenza, non è stato possibile recuperare con precisione il percorso reale dell'utente dalle informazioni di viaggio. In futuro, sarebbe opportuno ottenere i dati di viaggio originali tracciati con GPS.

In secondo luogo, vi sono incertezze nella stima dei benefici ambientali di un'intera città utilizzando i dati di una sola società di *bike sharing* (ovvero Mobike, in questo studio). I benefici ambientali totali sono stati calcolati supponendo che tali benefici corrispondano

⁴³ Vogel M. *et al.*, 2014. *From bicycle sharing system movements to users: a typology of Vélo'v cyclists in Lyon based on large-scale behavioural dataset*. Journal of Transport Geography. <http://liris.cnrs.fr/Documents/Liris-6880.pdf>

al numero di biciclette utilizzate mentre altri parametri, quali ad esempio posizione e condizioni meteorologiche, sono stati ignorati.

In terzo luogo, sarà importante esaminare le relazioni tra impatti ambientali e fattori socioeconomici, come la popolazione, il livello di istruzione e i costi del servizio.

Ricci (2015) ha effettuato una revisione della letteratura analizzando diversi aspetti del BS ed esaminando il fenomeno crescente del BS nel mondo e gli impatti positivi che potrebbe comportare sulla salute e sull'ambiente.

Il documento è suddiviso in sezioni: la sezione 1 introduce la problematica; la sezione 2 fornisce una panoramica critica del numero crescente di fonti di informazione e conoscenze sul BS; le sezioni 3 e 4 riassumono le informazioni sugli utenti, sull'uso e sull'impatto del *bike sharing*, analizzandone i risultati e i limiti; la sezione 5 fornisce una sintesi del mercato del servizio e sulle prospettive di sviluppo per gli utenti; la sezione 6 raccoglie le conclusioni del documento in cui sono analizzati i dati presentati, mostra la possibile utilità del trasferire i risultati osservati (impatti e processi) in altri contesti e individua le aree chiave che meritano un'ulteriore investigazione.

La sezione 4 è quella che interessa maggiormente l'impatto del BS sulla riduzione delle emissioni. I risultati mostrano che il BS causa, nella maggioranza dei casi, uno spostamento modale (80,2%) dalle altre modalità di spostamento sostenibili alla bicicletta, in particolare riducendo gli spostamenti a piedi (45,6%) e con gli autobus (25,8%) e con i treni (8,8%). L'impatto sembra minore sul trasferimento modale dall'auto privata (19,8%). L'analisi statistica ha mostrato che il trasferimento modale tra le persone a reddito più elevato era più probabile che avvenisse dall'auto alla bicicletta o dalla ferrovia alla bicicletta, mentre per le persone a minore reddito il trasferimento modale dei gruppi, verso la bicicletta, era più probabile che si verificasse da autobus alla bicicletta o a piedi.

Tali dati sulle sostituzioni delle modalità di spostamento non offrono informazioni dettagliate sull'entità di ulteriori impatti, ad esempio sui livelli di traffico e sulla salute pubblica. Sono necessari altri dati quali la frequenza, la durata e lunghezza dei viaggi in automobile sostituiti dal BS, dati che normalmente non vengono raccolti in modo coerente nelle indagini.

Il BS sembra, comunque, aumentare la frequenza di utilizzo della bicicletta (personale o condivisa), contribuendo così ad aumentare i livelli complessivi di mobilità ciclistica.

Altro aspetto analizzato è il cambiamento di utilizzo dei mezzi pubblici, tali modelli di cambiamento sono correlati a fattori importanti quali la qualità, livello di servizio del trasporto pubblico disponibile.

Numerosi studi hanno analizzato e correlato i dati, per comprendere meglio i modelli di *bike sharing* e le interazioni con il trasporto pubblico.

Analizzando i dati (Shaheen *et al.*, 2014) si è visto che le persone che utilizzano meno il trasporto pubblico in risposta al *bike sharing* sono più numerose nelle aree urbane centrali, caratterizzate da un'elevata densità di popolazione, mentre chi risiede in periferia, in aree

a bassa densità di popolazione, utilizza maggiormente il trasporto pubblico. Nelle aree dove vi è minore disponibilità/frequenza di trasporto pubblico, il *bike sharing* può essere utile per integrare i mezzi del TPL, come collegamento per il primo o l'ultimo miglio.

Un'altra analisi (Fishman *et al.*, 2014 (b)) ha rivelato che il numero di viaggi è stato significativamente più alto per le stazioni di BS situate in aree ove il trasporto pubblico era relativamente meno accessibile suggerendo che il BS stava potenzialmente sostituendo il trasporto pubblico piuttosto che collegarsi ad esso. In altre città come Londra (Goodman e Cheshire, 2014), Washington e Parigi (Shaheen *et al.*, 2014), l'uso del *bike sharing* è stato significativamente più elevato in corrispondenza delle stazioni ferroviarie (Londra e Washington) e delle stazioni della metropolitana (Parigi).

Relativamente all'impatto ambientale del BS, numerosi studi hanno stimato i risparmi di emissioni di CO₂ derivanti dall'uso del *bike sharing*, suggerendo un impatto ambientale positivo. Tuttavia, la significatività di questi risultati è discutibile, perché tali stime non sono normalmente supportate da solide prove (dati di utilizzo del BS e/o indagini sugli utenti), ma si basano sull'ipotesi, non sempre valida e veritiera, che tutti i viaggi in *bike sharing* sostituiscano quelli in auto. Anzi i risultati di uno studio (Fishman *et al.*, 2014) suggeriscono che il *bike sharing*, in alcuni casi potrebbe aumentare piuttosto che ridurre l'uso complessivo dei veicoli a motore, quando si prende in considerazione l'impatto della manutenzione e della redistribuzione delle biciclette.

Da questa analisi è emerso che l'evidenza complessiva sugli impatti, e soprattutto sui benefici, del *bike sharing* è in crescita, ma è ancora limitata in termini di tipologia di casi studio disponibili, metodi utilizzati, dati raccolti e/o generati, e la varietà di caratteristiche e impatti esaminati. In termini di impatto e processi, il *bike sharing* può essere di supporto alla politica per sviluppare una mobilità sostenibile e per favorire l'utilizzo della bicicletta. Lo sviluppo di una cultura della mobilità ciclistica, l'aumento dei livelli di mobilità ciclistica e le misure politiche a favore del ciclismo sono stati tutti identificati come importanti fattori a supporto del *bike sharing* durante e dopo l'implementazione.

Altro aspetto sottolineato è che il raggiungimento del successo in termini di generazione di percorsi ciclabili, ad esempio, non garantisce che i servizi di BS siano anche socialmente inclusivi. Dai risultati della revisione di Ricci (2015) si evince che il *bike sharing* tenda ad attrarre un particolare profilo di utenti: maschi, bianchi, occupati e, rispetto alla popolazione media, più giovani, più benestanti, più istruiti e con maggiori probabilità di essere già impegnati nella mobilità ciclistica indipendentemente dal *bike sharing*.

Se i promotori e gli operatori dei sistemi di BS desiderano raggiungere l'equità di accesso, allora i sistemi dovrebbero essere resi disponibili, accessibili, convenienti e attraenti per una varietà di gruppi sociali e tipi di utenti. Ad esempio, sviluppando speciali politiche di prezzo/sconti per i gruppi a basso reddito o altri gruppi *target*, e fornendo, inoltre, diverse tipologie di biciclette adatte a diversi usi.

I sistemi di *bike sharing* non possono diventare socialmente inclusivi se sono progettati e commercializzati per favorire la sensibilità e gli interessi di particolari tipologie di utenti, e

se vengono implementati prevalentemente nelle aree in cui tali tipologie di utenti vivono o lavorano. Anche se i sistemi di BS possono coprire aree più svantaggiate, come a Londra, rimane problematico conciliare la necessità di garantire il successo finanziario e di utilizzo da un lato, e l'inclusione sociale dall'altro.

I risultati sul profilo medio degli utenti del BS e le relative disuguaglianze di accesso aiutano a identificare un'area chiave in cui è necessaria una maggiore ricerca. I gruppi sociali attualmente sottorappresentati nel *bike sharing* sono quelli che sono in grado di andare in bicicletta ma non vanno in bicicletta, come le minoranze etniche, i gruppi sociali svantaggiati, le donne e gli anziani. Per colmare queste lacune sono necessarie indagini quantitative e qualitative, ricerche partecipative, condotte con utenti e non utenti appartenenti a categorie sottorappresentate. Ciò potrebbe essere particolarmente utile nei luoghi in cui il *bike sharing* è considerato un "servizio pubblico" e l'equità di accesso è considerata un obiettivo importante. Inoltre, le evidenze sui fattori abilitanti per il *bike sharing* suggeriscono che un impegno pubblico efficace e continuo può aiutare ad attrarre e mantenere tipologie di utenti differenti.

Zhang e Mi (2018) nel loro studio hanno stimato quantitativamente i benefici ambientali del *bike sharing*. Utilizzando tecniche di analisi di *big data*, sono stati stimati gli impatti della condivisione di biciclette sul consumo di energia e sulle emissioni di anidride carbonica (CO₂) e ossidi di azoto (NO_x) a Shanghai nel 2016.

Sulla base dei risultati ottenuti, gli autori hanno discusso i benefici ambientali da una prospettiva spazio-temporale.

Le distanze percorse sono state calcolate utilizzando i punti di partenza e di arrivo, anche se tale metodologia sottostima le percorrenze. Per stimare la distanza di viaggio in modo più accurato, gli autori propongono un metodo che utilizzi informazioni sulla base di un *set* di dati sul *bike sharing* su larga scala fornito dall'azienda Mobike.

Si è valutato il consumo complessivo di energia e gli impatti ambientali associati a tutte le fasi dei combustibili. Il ciclo dei carburanti per veicoli può essere diviso in due fasi: dal pozzo al serbatoio e dal serbatoio alle ruote.

In questo studio, è stato considerato lo sfruttamento e la distribuzione per la prima fase e la combustione per la seconda fase. È stata impostata una soglia per calcolare il numero di chilometri percorsi dai veicoli (VKT) e i carburanti risparmiati dall'utilizzo del *bike sharing*. Se la distanza è elevata le persone preferiscono prendere un taxi; in caso contrario, le persone optano per l'alternativa, ovvero camminare (gli autori hanno identificato la lunghezza media di un tragitto in 2,4 km).

Le emissioni generate dai carburanti dei veicoli possono essere suddivise in emissioni di gas di scarico, come CO₂, CO, NO_x, PM_{2,5} e PM₁₀, ed emissioni evaporative, come gli idrocarburi (HC). In questo studio, gli autori si sono concentrati su CO₂ e NO_x. Sono state, quindi, calcolate le emissioni generate dal consumo di carburante. Sono stati considerati gli spostamenti con distanze di viaggio superiori al valore soglia di 1 km al fine di stimare

il risparmio energetico e la corrispondente riduzione delle emissioni. I campioni utilizzati coprono il periodo di un mese, agosto 2016, e sono relativi ad una società di *bike sharing*.

Per calcolare i benefici ambientali totali del *bike sharing* a Shanghai nel 2016, i risultati della stima sono stati divisi per il rapporto di campionamento (ovvero, 56,6%), per le quote di mercato dell'azienda (ovvero, 56,6%) e moltiplicato per il numero di mesi (cioè 12).

Per costruire un inventario delle emissioni di carbonio a livello settoriale per la città di Shanghai è stato utilizzato l'approccio del Gruppo intergovernativo sui cambiamenti climatici (IPCC).

Nel 2016, con il *bike sharing* a Shanghai sono state risparmiate 8.358 tonnellate di benzina e sono state ridotte le emissioni di CO₂ e NO_x di 25.240 e 64 tonnellate, rispettivamente. Dal punto di vista spaziale, i benefici ambientali sono molto più elevati nei distretti più sviluppati di Shanghai, dove si trova la densità di popolazione più elevata.

Dal punto di vista temporale, i benefici ambientali maggiori, dovuti alla condivisione di biciclette, si osservano la mattina e la sera e quelli serali sono maggiori di quelli mattutini. Il *bike sharing* ha un grande potenziale per ridurre il consumo di energia e le emissioni grazie al suo rapido sviluppo.

Sobolevsky *et al.* (2018) hanno studiato come l'implementazione di Citi Bike possa cambiare il panorama della mobilità urbana a New York City, fornendo un esempio di soluzione che molte altre grandi città possono adottare. Una simile implementazione comporterebbe grandi benefici per l'impatto del *bike sharing* sul trasporto urbano, nonché implicazioni economiche, sociali e ambientali. I dati sull'utilizzo di Citi Bike sono pubblicamente disponibili, la sfida principale di tale valutazione è stata quella di fornire uno scenario di base su quello che sarebbe accaduto in città senza il sistema Citi Bike.

La maggior parte dei dati acquisiti per l'analisi era disponibile pubblicamente tramite Open Data di New York e siti *web* di autorità pubbliche⁴⁴. La valutazione dell'impatto è stata eseguita sulla base di tutti i viaggi di Citi Bike attraverso New York e Jersey City (una città vicina nel New Jersey lungo il fiume Hudson), come indicato dai dati, che includono il tempo, l'inizio e la fine del viaggio.

Il modello di base considera le principali alternative di trasporto disponibili per ogni viaggio in Citi Bike: a piedi, con i mezzi pubblici, con i veicoli privati o per il noleggio di veicoli (FHV), e stima le probabilità di prendere ciascuno. Le diverse modalità di trasporto offrono diversi costi e benefici per l'utente, il grado ottimale di ciascuno dipende dal compromesso tra costi e benefici. Solitamente bisogna scegliere se preferire un trasporto più veloce ma più costoso, o più lento ma più economico. Per definire l'utilità della modalità di trasporto gli autori hanno convertito sia il tempo che i costi in valori monetari, ad esempio valutando il tempo a livello di un salario orario medio per i pendolari.

⁴⁴ Dati sull'utilizzo e le posizioni di Citi Bike, percorsi ciclabili di New York, sull'utilizzo di taxi / Uber, utilizzo e ubicazioni della metropolitana e dati specifici di New York provenienti dall'Ufficio del censimento degli Stati Uniti.

Il tempo di viaggio è stimato in base al tempo di percorrenza medio a cui è attribuito un costo a cui si aggiunge il costo della modalità di spostamento scelta (nulla per chi va piedi, costo biglietto per i TPL, la tariffa al km per i taxi, per auto privata il costo medio del carburante, più la manutenzione, il costo del parcheggio, divisi per i passeggeri). Una volta stimati i parametri del modello, questo è stato applicato per stimare lo scenario di base: quali modalità di trasporto avrebbero usato gli utenti del Citi Bike, se esso non fosse disponibile, ed è stato valutato l'impatto. Per ogni spostamento in bici osservato sono state considerate le alternative disponibili (camminare, trasporto pubblico, taxi o veicolo privato) ed è stato stimato il tempo-costo.

Il modello sopra riportato consente di stimare il vantaggio marginale economico diretto per i ciclisti Citi Bike, in termini di costi di viaggio più i risparmi di tempo rispetto a modalità di trasporto alternative; vengono separati i viaggi ricreativi, in cui l'effetto economico non è rilevante, dai viaggi di pendolarismo in cui il risparmio economico e di tempo sono importanti.

L'impatto economico è diverso per le diverse aree. Le distribuzioni di Manhattan mostrano un notevole impatto economico annuale di oltre 100 dollari per ogni stazione, mentre le stazioni di Brooklyn e Jersey City mostrano un impatto più modesto da dieci a poche decine di migliaia di dollari ciascuna. Esso potrebbe essere attribuito al fatto che le distribuzioni di *bike sharing* dipendono in gran parte dall'effetto della densità della rete, le nuove stazioni apportano maggiori vantaggi nelle aree con una maggiore densità di popolazione e una rete Citi Bike esistente più densa.

Altri vantaggi sono il risparmio di tempo, ed anche esso è correlato alla densità della rete di biciclette. I risparmi previsti per il tempo di viaggio totale per gli utenti variano da 185 ore all'anno risparmiate per stazione media a Jersey City a circa 1.000 a Brooklyn e circa 2.000 ore risparmiate per ogni stazione a Manhattan.

L'uso della *Citi Bike* comporta anche un ulteriore vantaggio per la salute dei ciclisti, il beneficio apportato da esercizio aggiuntivo può essere stimato in media a 650 calorie all'ora per un ciclista medio (camminare fa consumare in media 411 calorie all'ora). Poiché la camminata di solito richiede più tempo, la quantità di calorie della bicicletta potrebbe non necessariamente superare la quantità di calorie della camminata lungo lo stesso percorso.

Se la bicicletta sostituisce l'uso di auto private o taxi, vi sono ulteriori vantaggi ambientali nel risparmio di carburante, che determina una riduzione corrispondente delle emissioni dei veicoli. Il beneficio del carburante viene stimato rispetto a un consumo medio di gas di 25 miglia per gallone (9,5 l / 100 km). Secondo la stima del modello, ogni stazione di Citi Bike determina un risparmio medio di carburante che varia da 85 litri all'anno a Jersey City e 840 litri l'anno a Manhattan. Tali risparmi possono essere direttamente tradotti in emissioni veicolari risparmiate da 0,2 a 2 tonnellate di anidride carbonica all'anno, e di altri inquinanti atmosferici quali PM, NO_x, SO₂, VOC e CO.

Tra i limiti dello studio, si segnala che:

-
1. il modello di base riferito alle scelte di trasporto in assenza di Citi Bike, utilizzato per stimare i benefici, dipende da una serie di ipotesi sul comportamento delle persone;
 2. l'incertezza quantificabile è stata incorporata nelle stime;
 3. le ipotesi qualitative del modello di base utilizzato sono fondamentali per la validità delle stime.

La sintesi di tutti gli impatti identificati, convertiti in termini monetari, consente di concludere che la valutazione complessiva della Citi Bike come innovazione urbana è positiva. Risulta essere particolarmente vantaggioso per gli utenti finali, con un rapporto costi-benefici complessivo da 3,33 a 8,27 a seconda del tasso sconto sull'abbonamento. Quest'ultimo è spesso applicato alla popolazione a basso reddito, ad esempio i residenti delle abitazioni sovvenzionate dall'autorità abitativa di New York.

Lo studio potrebbe essere utile per una comprensione olistica dell'efficienza dell'implementazione di Citi Bike per diversi tipi di *stakeholder* economici, sociali e ambientali, comprese le agenzie cittadine, nonché per informare le decisioni future sulle implementazioni di *bike sharing* in altre aree.

Wang e Szeto (2018) hanno valutato nel loro studio la problematica della redistribuzione delle biciclette rotte e il loro impatto ambientale.

Gli autori propongono una metodologia per riposizionare sia le biciclette funzionanti che quelle rotte, in una rete di condivisione, al fine di raggiungere un perfetto equilibrio tra domanda e offerta di *bike* in ciascuna stazione e assicurarsi che tutte le biciclette rotte vengano riportate al deposito. L'obiettivo di questa operazione di riposizionamento è di minimizzare le emissioni totali di CO₂ di tutti i veicoli che vengono ridistribuiti. Viene presentato un modello MILP (*Mixed Integer Linear Program*) per analizzare tale problematica e trovare una soluzione commerciale per risolverla. Gli autori analizzano il problema del riposizionamento delle biciclette nella città di Vienna per confrontare le soluzioni di minimizzazione delle emissioni e delle distanze e studiare la complessità del tempo di esecuzione del modello proposto.

Oltre al riposizionamento, per il calcolo dei benefici ambientali, è importante considerare nel BS l'impatto delle biciclette rotte, fattore non preso in considerazione in altri studi. La presenza di biciclette rotte implica uno spreco di risorse, poiché tali veicoli occupano gli stalli di solito limitati in una stazione e sono inutilizzabili e anche una piccola parte di biciclette inutilizzabili può avere un effetto significativo sull'insoddisfazione degli utenti. Pertanto, quando si pianificano i lavori di riposizionamento, le biciclette rotte devono essere considerate insieme alle emissioni dovute al riposizionamento. La redistribuzione delle biciclette può essere fatta con un singolo veicolo o con più veicoli, a seconda della loro capacità.

Vengono considerate le emissioni totali di CO₂ di tutti i veicoli utilizzati per le operazioni di riposizionamento, partendo dal presupposto che le emissioni di CO₂ sono prodotte solo

quando un veicolo è in movimento e ignorando le emissioni durante l'attesa. Inoltre, la quantità di emissioni stimata è riferita solo al carico e alle percorrenze fatte dai veicoli.

Gli autori analizzano gli effetti di diversi fattori sulla strategia operativa di riposizionamento e le emissioni di CO₂ legate agli effetti:

1. della tolleranza della domanda (la deviazione accettabile dalla domanda *target*);
2. della percentuale di bici rotte nella rete;
3. delle distanze tra le stazioni (gli autori hanno simulato differenti scenari a seconda delle distanze tra le stazioni e i depositi utilizzati);
4. delle visite multiple al deposito e alle stazioni per diversi motivi: (1) per eccesso di offerta o di domanda, (2) per la rimozione delle biciclette rotte e (3) per la minimizzazione delle emissioni;
5. della capacità del veicolo. Quando la capacità del veicolo aumenta, le emissioni di CO₂ e il numero di fermate sono funzioni crescenti della capacità del veicolo. Il percorso e il carico del veicolo possono essere adattati in base alla variazione della capacità del veicolo. Tuttavia, quando la capacità supera un certo valore, non avrà alcun effetto sulle soluzioni ottimali.

Gli autori mettono in evidenza la differenza esistente nella gestione tra biciclette utilizzabili e quelle rotte: mentre le biciclette utilizzabili possono essere trasferite tra le stazioni, quelle rotte rimangono sul veicolo fino al deposito. Pertanto, le emissioni riconducibili ad una bicicletta rotta, in media, sono maggiori rispetto a quelle delle biciclette utilizzabili ed è consigliabile portare le biciclette rotte nel deposito ogni volta che è possibile. Pertanto, in alcuni casi, sebbene la capacità del veicolo sia sufficiente per gestire entrambe le tipologie di biciclette durante il trasporto, il veicolo torna comunque al deposito per lasciare le bici rotte per ridurre il carico. Le emissioni sono determinate non solo dalla distanza di percorrenza, ma anche dal carico del veicolo.

I risultati indicano che consentire più visite al deposito potrebbe ridurre le emissioni dei veicoli. L'aumento percentuale di bici rotte nel sistema, comunque, determina un aumento delle emissioni di CO₂, e la dimensione di tale aumento dipende da vari fattori come la distanza dalle stazioni al deposito e la capacità di carico dei veicoli utilizzati per la redistribuzione delle biciclette.

Per il raggruppamento di reti di grandi dimensioni con più veicoli, gli autori hanno utilizzato un metodo basato sull'euristiche dei vicini più vicini⁴⁵ per scomporre la rete in diversi gruppi, ciascuno dei quali è stato affrontato in modo sequenziale utilizzando il modello proposto. I risultati ottenuti dallo studio confermano la possibilità di utilizzare

⁴⁵ L'algoritmo della catena del vicino più vicino è utilizzato per rendere più rapidi i metodi per raggruppamento gerarchico agglomerativo; metodi che hanno come input una raccolta di punti e creano una gerarchia di gruppi di punti unendo ripetutamente coppie di cluster più piccoli per formare cluster più grandi.

l'applicazione del clustering per ridurre i tempi di esecuzione di istanze di rete di grandi dimensioni con più veicoli.

Kou *et al.* (2020) nel loro studio propongono un modello "*Emission Reduction Estimation Model*" (BS-EREM) per quantificare i benefici ambientali dei viaggi in BS e confrontare le riduzioni delle emissioni di gas serra (GHG) dei servizi di BS in otto città degli Stati Uniti: New York, Chicago, Boston, Philadelphia, Washington, Los Angeles, San Francisco e Seattle. Il modello BS-EREM stima stocasticamente le modalità di trasporto sostituite dai viaggi in *bike sharing*, considerando fattori quali la distanza del viaggio, lo scopo del viaggio, l'orario di partenza del viaggio, l'accessibilità dei transiti pubblici e le distribuzioni storiche delle scelte di modalità di trasporto.

I contributi peculiari di questo studio sono stati i seguenti: 1) è stato proposto un modello per stimare la sostituzione delle modalità di spostamento in *bike sharing*, tenendo conto della distanza percorsa, dello scopo del viaggio, dell'orario di partenza e dell'accessibilità dei mezzi pubblici in prossimità delle stazioni di *bike sharing*; 2) la stima della sostituzione delle modalità è stata basata sui dati delle indagini di viaggio e sui dati reali del BS, tale metodologia è applicabile per tutte le città che dispongono di tali dati; e 3) l'analisi, non solo quantifica i benefici ambientali complessivi a livello di sistema, ma valuta anche i benefici ambientali per unità di distanza percorsa e la distribuzione spaziale dei benefici ambientali a livello di stazione di *bike sharing*, informazioni utili per avere indicazioni sulla localizzazione e la pianificazione della collocazione di nuove stazioni di BS.

I dati di ingresso utilizzati nel modello comprendono: (1) dati relativi ai viaggi in BS; (2) i dati del *National Household Travel Survey* (NHTS)⁴⁶, che fornisce le informazioni sulla scelta della modalità prima di avviare i programmi del BS; (3) accessibilità del TPL: stazioni di transito pubblico/fermate vicino a stazioni di BS e (4) i fattori di emissione di gas serra utilizzati per il calcolo dei benefici ambientali del viaggio.

I fattori di emissione sviluppati in questo studio includono diversi tipi di transito pubblico (ad esempio, autobus e metropolitana) e di veicoli (ad esempio, auto, SUV e *pickup*). Gli autori hanno considerato la media ponderata o i fattori di emissione specifici per ogni categoria di modalità di trasporto e per semplificare l'analisi hanno incluso quattro modalità di trasporto: a piedi, in bicicletta, con veicolo privato e trasporto pubblico.

La differenza tra i fattori di emissione del ciclo di vita delle modalità di trasporto, che vengono sostituite dalla bicicletta, viene poi utilizzata per calcolare la riduzione delle emissioni di gas serra. Ad esempio, se un viaggio in BS sostituisce un viaggio con veicolo privato, la riduzione delle emissioni per questo viaggio sarebbe di 408 g CO_{2eq}/ miglio (la bicicletta genera 408 g di CO_{2eq} in meno rispetto ai veicoli per ogni miglio percorso da un passeggero) moltiplicato per la distanza percorsa (in miglia).

⁴⁶ Indagine condotta a livello nazionale dalla U.S. Federal Highway Administration, che registra i comportamenti personali e domestici dei residenti locali negli Stati Uniti.

Gli autori si sono basati sui fattori di emissione del ciclo di vita medio delle diverse modalità di trasporto e la loro analisi rileva che:

- le riduzioni annuali delle emissioni di gas serra, apportate dagli otto servizi di BS nel 2016, variano da 41 tonnellate di CO_{2eq} (Seattle) a 5.417 tonnellate di CO_{2eq} (New York City), mentre le riduzioni delle emissioni per viaggio variano da 283 a 581 g CO_{2eq}.
- la riduzione delle emissioni del BS esprime solo una piccola parte delle emissioni totali di gas serra dovute al trasporto settore, che va dallo 0,0002% allo 0,007% per i quattro sistemi più piccoli e dallo 0,026% allo 0,077% per i quattro sistemi più grandi. Tra queste città, Los Angeles ha il rapporto più basso perché ha elevate emissioni dovute al settore dei trasporti, ma un BS relativamente piccolo.

La riduzione delle emissioni di gas serra varia nelle diverse città: Chicago, Boston e Philadelphia hanno le prestazioni migliori, riducendo di 352,7 g, 345,0 g e 340,9 g CO_{2eq} per ogni miglio di viaggio percorso, rispettivamente. In queste tre città, una percentuale più alta di viaggi in BS ha sostituito i viaggi in auto (74% per Chicago, 75% per Boston e 75% per Philadelphia), questa è la ragione principale per cui hanno un maggiore risparmio di GHG per ogni miglio percorso. La riduzione delle emissioni di gas serra per ogni viaggio in BS a Chicago è leggermente più elevata, perché Chicago ha la maggiore rete di stazioni di *bike sharing* che consente agli utenti di viaggiare su distanze più lunghe. In generale, la maggior parte della riduzione delle emissioni di gas serra deriva dal contributo di viaggi relativamente brevi (inferiori alle 5 miglia). La rete di stazioni di BS gioca un ruolo importante nel modello di viaggio scelto dagli utenti e la capacità del BS di ridurre le emissioni di gas serra.

Per comprendere meglio come la posizione delle stazioni di *bike sharing* influisca sulla riduzione delle emissioni di gas serra, sono stati anche analizzati i modelli spaziali di riduzione delle emissioni a livello di stazione, utili per il processo decisionale nella scelta delle future stazioni di *bike sharing*. I risultati mostrano che, sebbene il centro città abbia più utenti di BS rispetto alle aree lontane dal centro città, una percentuale più alta degli utenti della periferia adotta il BS in sostituzione del camminare.

La riduzione totale annuale delle emissioni mostra una correlazione lineare con il numero di viaggi, di biciclette e di rastrelliere con sistemi di blocco/sblocco. Le stazioni di *bike sharing* situate nel centro di una città hanno contribuito a una maggiore riduzione delle emissioni totali di gas serra grazie all'elevato volume di viaggi, mentre le stazioni più lontane hanno una maggiore riduzione delle emissioni per ogni viaggio grazie a percorrenze più lunghe e a un più alto tasso di sostituzione dell'auto.

Come gli autori hanno evidenziato, il contributo alla riduzione delle emissioni da parte dei servizi di BS attualmente è ancora relativamente limitato (meno dello 0,1%) nel contesto delle emissioni totali di gas serra dell'intero settore dei trasporti in queste città.

L'ampliamento delle dimensioni del sistema di BS (ad esempio, costruzione di più stazioni e stalli, rendendo disponibili un maggior numero di biciclette) potrebbe contribuire ad

umentare la riduzione delle emissioni di gas serra favorendo gli spostamenti in *bike sharing*. Anche il miglioramento delle infrastrutture ciclistiche, come le piste ciclabili, potrebbe contribuire a favorire l'uso del *bike sharing*.

Il beneficio ambientale è influenzato anche dalla sostituzione della modalità di trasporto, cioè quale modalità di trasporto sostituisce il viaggio in *bike sharing*. In questa analisi, il *bike sharing* sostituisce gli spostamenti con veicoli e a piedi, mentre la distribuzione delle modalità sostituite varia da una città all'altra. Anche la rete di stazioni di *bike sharing* potrebbe influenzare la riduzione delle emissioni di GHG, in periferia ad esempio se le stazioni di BS sono meno presenti, questo scoraggia i potenziali utenti.

I limiti dello studio sono i seguenti. In primo luogo, i risultati si basano sul presupposto che gli utenti del BS dispongano dello stesso modello di spostamento di una persona media nell'area urbana di ogni città. L'analisi di sensibilità ha mostrato che i risultati sono molto sensibili alla distribuzione della modalità di trasporto. Pertanto, la ricerca futura necessita di una raccolta più dettagliata della modalità di trasporto, in particolare gli utenti del BS possono contribuire a migliorare l'accuratezza dei risultati. Inoltre, altri fattori, come il tempo e la demografia dell'utente possono influenzare le decisioni di sostituzione delle modalità. Ad esempio, è stata valutata nel modello solo la presenza delle stazioni e delle fermate dei mezzi pubblici nelle vicinanze alle stazioni di *bike sharing*, ma non sono stati considerati i tempi di attesa e i percorsi effettivi delle reti di trasporto pubblico. È possibile che gli utenti debbano aspettare per un lungo periodo di tempo o dover compiere trasferimenti tra due stazioni di *bike sharing* per avere accesso al trasporto pubblico, rendendo meno praticabile la sostituzione del trasporto pubblico.

In secondo luogo, il fattore di emissione utilizzato in questo studio può sopravvalutare i benefici dei viaggi in *bike sharing*, in quanto le emissioni di altre infrastrutture del sistema (quali le stazioni di *bike sharing* e la ridistribuzione delle biciclette) non sono state incluse. L'analisi di sensibilità ha mostrato che le stazioni di *bike sharing* e il riposizionamento potrebbero diminuire la riduzione complessiva delle emissioni di gas serra di circa il 30%. Fattori di emissione desunti da una valutazione più completa del ciclo di vita per le diverse modalità di trasporto, compreso il *bike sharing*, su misura per ogni città contribuirebbero a migliorare la stima utilizzando BS-EREM. Inoltre, gli operatori di sistema di BS possono applicare diversi programmi di riposizionamento e utilizzare diversi veicoli (ad esempio, camion, furgoni o tricicli elettrici). Altri fattori che influenzano i fattori di emissione, come l'aumento delle emissioni dovuto all'uso estensivo di aria condizionata nei veicoli in determinate stagioni, comportamenti di guida diversi, le età dei veicoli, ecc., non sono stati considerati nello studio. I servizi di BS possono utilizzare biciclette e stazioni prodotte con materiali o processi diversi e applicare pratiche di manutenzione e smaltimento diverse, fattori che influenzano le emissioni di gas serra.

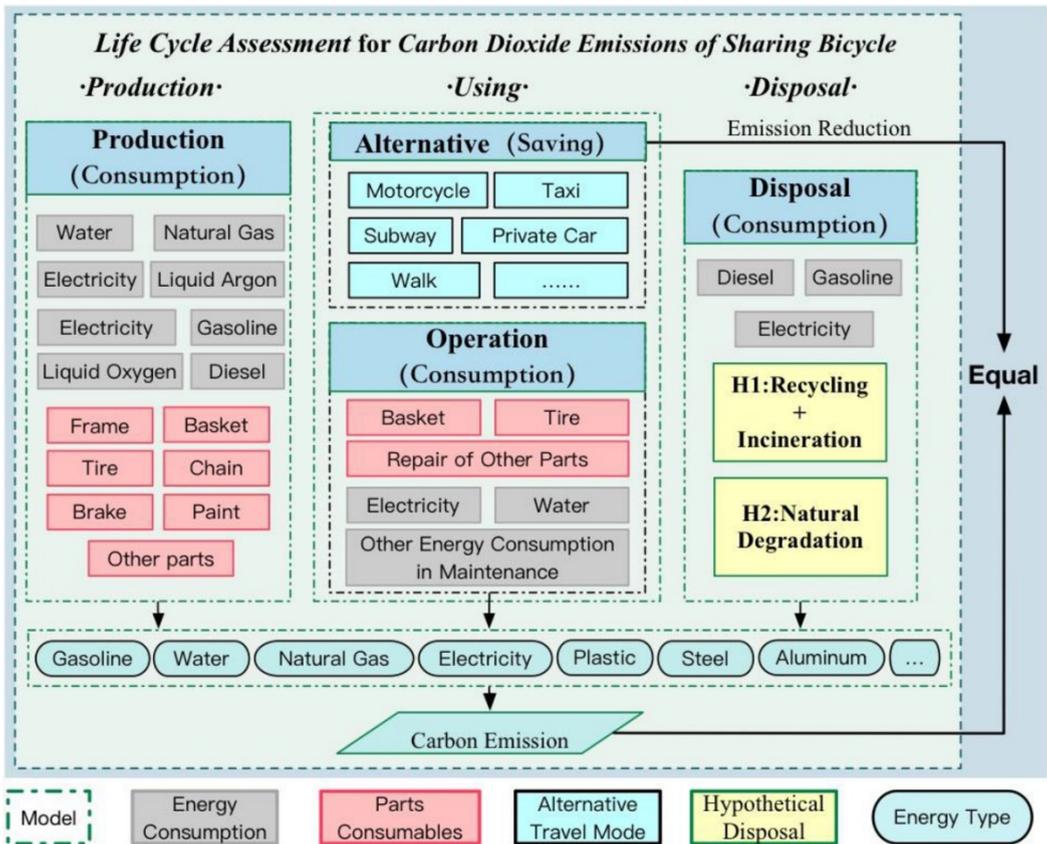
In terzo luogo, questo studio prende in considerazione solo i casi in cui il *bike sharing* sostituisce l'intero viaggio. Il BS potrebbe anche servire come soluzione "ultimo miglio" e contribuire a sostituire un viaggio monomodale (ad esempio, viaggio in auto) con un viaggio multimodale (ad esempio, catena di mobilità bici-treno-bici). A causa della

mancanza di dati a supporto di tale analisi, la sostituzione del viaggio multimodale non è considerata, il che potrebbe sottovalutare i benefici ambientali del *bike sharing*.

Chen *et al.* (2020), basandosi sulla revisione della letteratura, hanno visto che nessuno studio precedente ha analizzato la quantità di emissioni di CO₂ imputabili al *bike sharing* in termini di produzione, funzionamento, manutenzione e smaltimento nell'intero ciclo di vita, né la relazione tra uso della bicicletta, risorse e ambiente dal punto di vista dei benefici economici, né l'analisi delle intenzioni comportamentali dei consumatori e l'impatto effettivo delle politiche sulle emissioni di CO₂. Nella loro ricerca hanno utilizzato le emissioni di CO₂ come indice integrato per calcolare il consumo di energia nel ciclo di vita delle biciclette condivise, che comprende l'integrazione di vari indicatori, come l'ambiente, le risorse e la società. Questo indice globale può essere utilizzato per valutare la sostenibilità dell'intero sistema. Ad oggi, la situazione dello smaltimento delle biciclette viene effettuato con tre modalità: incenerimento, discarica e riciclo.

L'intero ciclo di vita di una bicicletta può essere diviso in tre fasi: produzione, uso e smaltimento (Figura 2.1). Le tre fasi includono quattro sezioni: di produzione, alternativa, operativa e di smaltimento. La sezione di produzione (l'energia usata per produrre le biciclette), la sezione operativa (l'energia usata per spedire e mantenere le biciclette) e la sezione di smaltimento (l'energia usata per smaltire le biciclette) coinvolgono il consumo di energia; invece, la sezione alternativa comporta un risparmio energetico sostituendo altri mezzi di trasporto, come taxi, veicoli privati, e così via.

Figura 2.1 - Valutazione del ciclo di vita per le emissioni di anidride carbonica del *bike sharing*



Fonte: Chen et al., 2021.

Oggetto di ricerca di questo studio è l'industria cinese del *bike sharing*. Quasi il 39,8% della quota di mercato, è rappresentata da OFO (la principale piattaforma cinese di *bike sharing*); questo il motivo per cui gli autori hanno scelto di concentrarsi sulle biciclette condivise gestite da OFO.

Per la costruzione di un inventario del ciclo di vita sono necessari quattro set di dati:

1. la distanza media giornaliera percorsa dalle biciclette condivise e le modalità alternative di viaggio;
2. il consumo di energia per la produzione di biciclette condivise;
3. il consumo di energia per il funzionamento delle biciclette condivise;
4. il consumo di energia per lo smaltimento delle biciclette condivise.

Inoltre, è stato somministrato un sondaggio all'OFO. Attraverso i dati raccolti, sono stati calcolati la distanza media di viaggio e il periodo di utilizzo di una bicicletta in un giorno, grazie l'*Application Programming Interface* di Baidu map.

Il consumo di materiale e di energia nella fase di produzione della bicicletta è ottenuto dal produttore della bicicletta. Ogni bicicletta pesa circa 20 kg, compresi 15,181 kg di acciaio, 0,171 kg di alluminio, 1,105 kg di plastica, 2,143 kg di carta, 1,400 kg di gomma, ecc. L'energia necessaria per produrre ogni veicolo include 0,001m³ di acqua, 0,37 kWh di elettricità e 0,85m³ di gas naturale. La distanza media di trasporto di ogni veicolo è stata stimata in 2 km.

I dati relativi al consumo di energia nella fase di manutenzione delle biciclette condivise sono stati ottenuti dall'indagine di monitoraggio effettiva di OFO. I risultati del calcolo sono: l'emissione media di anidride carbonica dei materiali di consumo per la manutenzione di ogni bicicletta condivisa è di 0,319 kg di CO₂. La frequenza della manutenzione delle biciclette condivise aumenta esponenzialmente nel tempo.

Anche i dati sul consumo di energia nella fase di funzionamento delle biciclette condivise sono stati ottenuti dall'indagine di OFO. Le emissioni di carbonio dei veicoli sostitutivi e dei nuovi veicoli rappresentano meno dell'1% delle emissioni totali di carbonio. Il coefficiente di correzione delle emissioni di CO₂ del funzionamento e della manutenzione è di 0,213 kgCO₂/km. Durante il processo di funzionamento e manutenzione, ogni bicicletta viene trasportata per 1,67 km. Questo presuppone che il 25% delle biciclette siano trasportate ogni giorno, quindi l'emissione di CO₂ generata dallo smaltimento sia di 0,087 kg CO₂.

I dati sul consumo di energia nella fase di smaltimento sono tratti dal rapporto IPCC. Lo smaltimento comprende due modi: incenerimento di recupero e degradazione naturale.

Lo studio presuppone che la riduzione delle emissioni di CO₂ sia conseguente al non utilizzo di auto e taxi a favore del *bike sharing*, partendo dal presupposto che la sostituzione di altre modalità di spostamento quali il camminare e l'utilizzo di mezzi pubblici non influenzino le emissioni, poiché si presuppone che camminare non produca emissioni di CO₂, e che non saranno ridotte le corse dei mezzi pubblici anche qualora il flusso di passeggeri si riduca.

Le persone che viaggiano in bicicletta condivisa al posto di taxi e auto sono associate a una riduzione delle emissioni; quindi, i fattori di emissione di CO₂ corrispondenti sono moltiplicati per 45% (46%-1%), e 39,6% (40%-0,4%), rispettivamente. I fattori di emissione, espressi per chilometro, di taxi e veicoli privati sono 0,156 kgCO₂/km e 0,180 kgCO₂/km, rispettivamente. I fattori di emissione dei taxi e dei veicoli privati provengono da Carbonstop; utilizzando un fattore di adattamento per ottenere un fattore di emissione per la modalità di viaggio risulta 0,14145 kgCO₂/km.

I risultati possono essere riassunti come segue: il numero medio di volte in cui ogni bicicletta è stata utilizzata al giorno era 4,552, la distanza media percorsa era di 0,356 km e l'utilizzo complessivo delle biciclette condivise è in media del 50%. Inoltre, l'impronta di carbonio dell'intero ciclo di vita di una bicicletta è di 34,56 kgCO₂. La produzione di energia tramite incenerimento produce 1,9916 kg di CO₂ in meno rispetto a una discarica. Se una bicicletta viene depositata direttamente in una discarica, impiegherà 31 anni per

degradarsi. I calcoli finali mostrano che, sulla base del numero attuale di biciclette, ciascuna deve essere utilizzata almeno 686 giorni per ottenere una riduzione netta positiva delle emissioni.

Questo documento fornisce una base per la gestione della capacità e la gestione operativa delle biciclette condivise dal punto di vista della sostenibilità e fornisce una nuova angolazione per la ricerca sull'impatto ambientale della *sharing economy*.

Anche una recente ricerca ha integrato il calcolo LCA nella stima dell'impatto ambientale del BS. D'Almeida *et al.* 2021, infatti, hanno analizzato l'impatto ambientale del sistema di *bike sharing Just Eat Cycles* recentemente adottato nella città di Edimburgo in 5 anni di attività.

Per il reperimento dei dati uno degli autori è stato distaccato tre giorni a settimana per un periodo di due mesi al *Transport for Edinburgh* (TfE) e ha raccolto dati relativi al BS, comprese le fasi del ciclo di vita della produzione e della manutenzione, la localizzazione GPS e gli scenari di fine vita per le biciclette condivise.

Il calcolo delle emissioni di CO₂ è stato concepito secondo il processo di *Life Cycle Assessment* ed è stato integrato da un sondaggio sul campo, al fine di raccogliere dati direttamente dagli utenti, tra cui l'informazione sulle modalità di viaggio alternative nel caso in cui il *bike sharing* non fosse stato disponibile. L'obiettivo è stato quello di stabilire un approccio per valutare gli impatti ambientali del BS che è stato implementato a Edimburgo nel settembre 2018. Questo approccio è stato applicato su un periodo relativamente breve perché il BS è in funzione solo da poco tempo.

La durata di un ciclo *Just Eat Cycles* è stata stimata in 5 anni secondo Serco, l'operatore del sistema. Per questo studio, i dati primari provengono dai primi dieci mesi di funzionamento, da settembre 2018, che vengono utilizzati per stimare un periodo di 5 anni.

Le emissioni di CO₂ relative alla produzione di 1.000 biciclette sono calcolate in base al peso di ogni materiale che costituisce la bicicletta, sono poi assegnati dei fattori di emissione di CO₂ ai materiali, fattori che tengono conto sia dell'approvvigionamento delle risorse, sia della loro trasformazione.

Dopo 5 anni, si presume che tutte le biciclette debbano essere sostituite a causa di vandalismo e usura. Di conseguenza, si considera la produzione di 2.000 biciclette per lo scenario su un periodo di 5 anni.

I componenti sono prodotti in Cina, poi portati via nave e assemblati a Stratford-upon-Avon, e infine trasportati per circa 540 km su strada a Edimburgo. È interessante notare che la flotta di 1.000 biciclette è stata assemblata in due fasi: la prima nel settembre 2018, la seconda all'inizio del 2019 in risposta al successo del BS; è stato quindi necessario considerare due volte il trasporto.

Andare in bicicletta richiede un maggiore dispendio calorico rispetto a guidare un'auto o fare il pendolare in autobus o in tram. Nel calcolo del consumo di cibo e degli impatti

respiratori dell'attività umana (ciclismo), ci sono grandi incertezze; pertanto, si è deciso di non includerli nei calcoli LCA per il *bike sharing* rispetto alle altre modalità di trasporto.

I gas serra sono rilasciati anche dalle operazioni organizzative del BS. In primo luogo, attraverso le operazioni di redistribuzione, che consistono nello spostamento di alcune biciclette da una stazione all'altra in base alla domanda, e nello spostamento di biciclette malfunzionanti e riparate al deposito o di nuovo in servizio; tale spostamento viene effettuato da due furgoni diesel. Non erano disponibili le informazioni sui km totali percorsi da questi furgoni, ma sulla base dei dati di luglio 2019, è stato stimato che hanno percorso 37.000 km dalla data di lancio di *Just Eat Cycles* nel settembre 2018, e quindi che avrebbero percorso 210.000 km in un periodo di 5 anni. In secondo luogo, nel deposito vengono utilizzate macchine elettriche per riparare pezzi di ricambio meccanici e computer; inoltre, gli uffici utilizzano il riscaldamento e il deposito richiede una manutenzione regolare. Così, il consumo elettrico (kWh) risultante dal funzionamento del deposito si traduce in emissioni di CO₂. Nel 2018 in Scozia, il mix di generazione di energia elettrica era costituito da rinnovabili (55%), nucleare (28%), gas e petrolio (17%) (BEIS, 2019).

Queste proporzioni permettono di calcolare l'impatto di carbonio corretto in kW basato sull'impatto di CO₂ di ogni mezzo di generazione di energia.

Come viene gestito il fine vita di un prodotto dipende molto dalla cultura per lo smaltimento e il riciclo dei rifiuti. In Scozia, l'acciaio e l'alluminio vengono riciclati, la plastica anche a seconda di quante volte è stata riutilizzata. La plastica viene esportata per essere riciclata, il che aumenta l'impatto iniziale di CO₂ dell'operazione; tuttavia, questa osservazione non viene presa in considerazione nel calcolo per mancanza di informazioni.

Un fattore critico per calcolare il risparmio di emissioni del *bike sharing* è la modalità di trasporto che sarebbe stata utilizzata in assenza del servizio. Poiché i dati del BS in possesso di *Transport for Edinburgh* coprono solo vendite, le condizioni delle biciclette e la localizzazione GPS, le informazioni sono state integrate con un'indagine sul campo per comprendere le modalità degli spostamenti degli utenti su un campione di 200 individui di entrambi i sessi e di tutte le età. È fondamentale conoscere quale modalità gli utenti avrebbero utilizzato se non avessero avuto accesso ai servizi di BS, per calcolare il risparmio di emissioni di CO₂ derivante dall'uso del sistema. Il sondaggio si è svolto presso le stazioni del BS e gli utenti sono stati avvicinati quando prendevano o parcheggiavano la bicicletta. A ciascuno dei 200 utenti del BS intervistati è stato chiesto quanto segue riguardo ai suoi spostamenti:

- tipo di viaggio (viaggio da/per, affari, tempo libero, shopping, scuola, visita turistica);
- distanza tra l'origine e la destinazione;
- mezzo di trasporto alternativo (auto, autobus, tram, a piedi, scuola, Uber/ taxi, bicicletta);

-
- uso del loro principale mezzo di trasporto (per esempio il treno) in combinazione con un altro mezzo.

I principali limiti del metodo sono i seguenti: in primo luogo, non tutti i dati di input provengono dalla stessa fonte. Ciò è dovuto ai requisiti e alla disponibilità dei dati e alla natura multidisciplinare della analisi, che spazia dalla produzione di materiali ai cicli respiratori delle attività umane. In secondo luogo, a causa della natura mista dei dati e dal fatto che alcuni di essi provengono da fonti secondarie, non è possibile offrire una solida valutazione della qualità complessiva dei dati di input. In particolare, non è stato possibile ottenere dati sui gas serra di produzione dalla provincia cinese in cui sono prodotte le biciclette, e quindi sono stati utilizzati fattori standard di gas serra del Regno Unito, il che rappresenta un'ulteriore limitazione.

Le maggiori incertezze empiriche nei dati sono i chilometri percorsi dal furgone che riequilibra le biciclette in giro per la città; gli impatti climatici del consumo di cibo e dell'attività dei ciclisti rispetto a quelli che si avrebbero se viaggiassero con altre modalità; e la risposta della compagnia di autobus alla riduzione della domanda causata dal passaggio dei ciclisti dall'autobus al *bike sharing*.

I risultati mostrano che il BS, dopo i primi 5 anni di funzionamento ha rilasciato 3.630 tonnellate di CO_{2eq}. Applicato alla bicicletta, il suo utilizzo determina 87 g CO_{2eq}/km. Escludendo l'attività umana, il *bike sharing* ha rilasciato 195 tonnellate di CO_{2eq}.

È stata effettuata un'analisi di sensibilità per valutare le variazioni nei risultati LCA attraverso la modifica delle ipotesi e dei parametri dichiarati. In ogni fase del ciclo di vita del sistema, si può osservare come le emissioni di CO₂ possano fluttuare in base ai parametri inizialmente selezionati. L'inclusione delle emissioni derivanti dall'attività umana coinvolta nell'uso della bicicletta, l'assunzione di un viaggio di andata e ritorno o di un viaggio di sola andata per la consegna delle biciclette, la variazione dei km percorsi per l'operazione di redistribuzione, la variazione del valore dei kWh a seconda di come viene prodotta l'elettricità - che varia spazialmente e nel tempo - e infine il modo in cui vengono gestiti i rifiuti, influenzerà il risultato finale.

Nella maggior parte delle categorie di impatto, l'intensità ambientale della fase di utilizzo è la singola variabile più influente (97,1%). All'interno di questo, le emissioni di carbonio dell'attività umana rappresentano il 97,2% delle emissioni del periodo d'uso e quindi il 94,5% di tutte le emissioni. Il cibo costituisce l'88% delle emissioni dell'attività umana; tuttavia, la revisione della letteratura ha evidenziato alcune incertezze in relazione a questo fattore. Non potendo verificare in modo affidabile questo fattore è stato rimosso dal calcolo finale, così come il ciclo di respirazione umana, al fine di consentire un confronto coerente. Si è assunto che utilizzare una bicicletta in condivisione è una significativa fonte indiretta di emissioni di CO_{2eq} fino a 416 tonnellate di CO_{2eq} se si includono le emissioni derivanti dalla respirazione umana. Tuttavia, se si eliminano le emissioni dal cibo e dalla respirazione umana, l'utilizzo di una bicicletta *Just Eat Cycle* rilascia 9,6 g CO_{2eq}/km.

La stima delle emissioni conseguenti al trasporto durante la produzione e consegna apporterebbe un incremento dell'1,7% portando le emissioni totali da 200 a 204 tonnellate di CO_{2eq}. Le operazioni di redistribuzione non sono ottimizzate e potrebbero essere migliorate del 30%, con una riduzione dell'1% di tutte le emissioni.

Il fattore di CO₂ kWh è stato calcolato sulla base dell'infrastruttura di produzione di energia della Scozia per essere il più realistico possibile ed è stato stimato a 0,2550 kg CO₂ rispetto a 0,2556 del fattore di conversione del Regno Unito, supponendo che non ci siano variazioni significative.

La gestione del fine vita del prodotto ha un'influenza relativamente piccola sull'impatto della CO₂ (5,3%), il riciclo è stato ipotizzato per il metallo e la plastica sulla base delle tendenze di trattamento delle biciclette condivise, dal momento che rispettivamente il 71 e il 46,2% sono stati riciclati nel 2017 (*Department for Environment Food & Rural Affairs*, 2019). È interessante notare che l'aspetto della discarica potrebbe modificare il fattore CO₂, ma non sono disponibili dati.

Viene anche calcolato il risparmio di emissioni del *bike sharing* rispetto ad altre modalità di trasporto: i fattori di emissioni di CO₂ dell'auto e dell'autobus includono la produzione, l'uso e lo smaltimento, ma non l'attività umana (respirazione e calorie alimentari), per mantenere la coerenza. È per questo motivo che le emissioni di CO₂ del camminare sono considerate zero. È stato calcolato che le emissioni di carbonio del BS, escludendo l'attività umana, ammontano a 200 tonnellate, estrapolate su un periodo di 5 anni (durata stimata di una bicicletta *Just Eat Cycles*). A livello di unità funzionale, una bicicletta *Just Eat Cycles* rilascia 9,6 g CO_{2eq}/km, che è 50 volte meno di un'auto media a benzina (259 g CO_{2eq}/km).

L'indagine sul campo ha permesso di valutare la proporzione di modalità alternative alla bicicletta in città, sulla base di un campione diversificato di 105 utenti (lavoratori, studenti, turisti, ecc.): se il BS non fosse stato disponibile, il 47% avrebbe viaggiato in autobus, il 17% in auto e il 36% a piedi.

Supponendo che questi utenti percorrano la distanza media di un viaggio in auto, autobus o a piedi in Scozia, allora il risparmio di emissioni di carbonio realizzato dall'intera flotta del BS in un periodo di 5 anni è stimato in 4.300 tonnellate di CO_{2eq}, quasi l'equivalente di un centinaio di viaggi Edimburgo-Londra in aereo di 200 passeggeri.

Per stimare il risparmio di emissioni di CO₂, i fattori di CO₂ sono stati assegnati a modalità alternative, compreso l'autobus dove sono stati calcolati 0,167 kg CO_{2eq}/km/passeggero. Supponendo che non saranno ridotte le corse dei mezzi pubblici anche qualora il flusso di passeggeri si riduca, la scelta modale del BS apporterebbe un risparmio di emissioni di CO₂ inferiore: circa 716 tonnellate di CO_{2eq}.

Quindi, data la difficoltà nell'assumere zero o 0,167 kg CO_{2eq}/km/passeggero di risparmio di emissioni dal viaggio in autobus, si stima che il risparmio di emissioni di carbonio varierà significativamente tra i due scenari, tra 716 e 4.300 tonnellate. Partendo dalle 4.300 tonnellate per un periodo di funzionamento di cinque anni, è possibile estrapolare i risparmi di emissioni su un ulteriore periodo.

Anche se si presume che in questi cinque anni il numero di utenti e i chilometri percorsi rimangano costanti, che il *bike sharing* continui a sostituire le stesse quote di spostamenti a piedi, in autobus e in auto, che ogni bicicletta sia sostituita e prodotta con un processo identico, e che 1,2 batterie siano la media per una bicicletta, si prevede che più di 12.000 tonnellate di CO_{2eq} saranno risparmiate nel primo decennio di funzionamento.

Altri benefici derivanti dal BS sono relativi ad alcuni miglioramenti limitati al flusso del traffico (meno auto), il miglioramento della forma fisica degli utenti e la creazione di posti di lavoro a livello locale per la gestione del BS. È degno di nota il fatto che il *bike sharing* si sia rivelato un grande successo in termini di utilizzo delle biciclette nonostante le mediocri condizioni meteorologiche di Edimburgo e il terreno accidentato. Tuttavia, l'analisi ha mostrato che il *bike sharing* come intervento politico per ridurre le emissioni di CO_{2eq} ha un piccolo impatto rispetto alle altre emissioni dei trasporti a causa del piccolo numero di viaggi effettuati rispetto alla mobilità totale, a causa delle brevi distanze dei viaggi effettuati, e perché la maggior parte dei viaggi non sostituisce l'auto privata.

Durante la pandemia covid-19 il BS è prosperato mentre l'utilizzo del trasporto pubblico si è ridotto a favore di modi di trasporto individuali sostenibili. D'altra parte, sono aumentati i fenomeni di vandalismo con la conseguente richiesta di una maggiore manutenzione, gestione dei rifiuti, ordini di produzione di parti e biciclette intere. Inoltre, si sono registrati anche maggiori furti e di conseguenza maggiore spesa per recuperare le biciclette tramite la geolocalizzazione con ulteriore consumo di carburante. Tutte queste operazioni generano ulteriori emissioni di carbonio, non quantificate in questo documento.

2.3 Conclusioni

Il numero di programmi di *bike sharing* è cresciuto notevolmente negli ultimi dieci anni, in particolare in Nord America, in Europa e in Cina. Si ipotizza che l'uso di questo servizio possa portare alla riduzione dell'uso dell'auto, anche se i risultati degli studi mostrano che solo una minoranza dei viaggi in bici sostituisce i viaggi in auto.

Il settore dei trasporti contribuisce in modo sostanziale al consumo di energia e alle emissioni. I contributi del settore dei trasporti aumentano con lo sviluppo economico e i cambiamenti dello stile di vita. Un'economia di condivisione, come la condivisione di biciclette o automobili, è una modalità possibile per ridurre il consumo di energia e le emissioni nel settore dei trasporti. I programmi di *bike sharing* possono promuovere l'uso delle biciclette nelle città, come dimostrato in numerosi studi. Di conseguenza, altre tipologie di trasporto (ad esempio auto privata, taxi e autobus) possono in parte essere sostituite da biciclette, in particolare per risolvere il "problema del primo o dell'ultimo miglio".

La valutazione dei benefici dei sistemi di *bike sharing* nelle città è importante per guidare le decisioni per sostenerne lo sviluppo. Il BS potrebbe portare diversi benefici sociali e ambientali, come il risparmio dei tempi e delle spese di trasporto, l'alleggerimento della

congestione del traffico, la riduzione delle emissioni di gas serra e di inquinanti atmosferici e il miglioramento dei collegamenti di trasporto multimodale.

Tra i benefici sopra citati, in questa analisi ci siamo concentrati sul beneficio ambientale, che è uno dei principali fattori che motivano i decisori a introdurre il BS nelle città. Capire il trasferimento modale è importante per valutare i benefici ambientali netti del BS. Infatti, il consumo di energia per il trasporto si riduce a seconda della modalità di trasporto che viene sostituita dal BS. Se il *bike sharing* sostituisce gli spostamenti dei veicoli personali o dei taxi, viene ridotto il consumo di carburante e le corrispondenti emissioni. D'altra parte, se gli spostamenti in *bike sharing* sostituiscono i viaggi a piedi, possono effettivamente aumentare il consumo di energia per il trasporto, a causa del consumo energetico necessario per costruire le stazioni, produrre le biciclette e far funzionare il sistema (ad esempio, si devono considerare le attività di trasferimento delle biciclette tra le stazioni per riequilibrare la disponibilità dei veicoli e la manutenzione delle biciclette rotte). Pertanto, al fine di stimare i benefici ambientali dei sistemi di *bike sharing*, è fondamentale avere informazioni circa le modalità di trasporto sostituite con viaggi in *bike sharing*.

Il BS sembra comunque una possibile strategia per espandere le opportunità di trasporto sostenibile in contesti prevalentemente urbani.

2.4 Tabella riepilogativa *bike sharing*

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Steyn e Lane (2012)	Gli autori hanno formulato un modello numerico per stimare l'entità della riduzione delle emissioni di CO ₂ (tonnellate all'anno) a seguito della realizzazione del <i>bike sharing</i> a Vancouver. Tale modello incorpora alcune variabili significative come, ad esempio, la stagionalità delle precipitazioni.	Un questionario è stato distribuito a 324 persone ed i rispondenti sono stati 231, nei mesi di febbraio e marzo 2012.		I risultati di questo studio hanno indicato che il potenziale di riduzione delle emissioni di CO ₂ , derivante dall'uso del <i>bike sharing</i> a Vancouver, è compreso tra lo 0,07% (potenziale minimo) e lo 0,14% (potenziale massimo) del totale delle emissioni annuali dovute al trasporto cittadino.
Fishman <i>et al.</i> (2014)		Gli utenti aderenti al servizio di <i>car sharing</i> sono stati inviati a compilare un questionario <i>on line</i> .		La riduzione dei viaggi in auto è stata stimata moltiplicando la distanza percorsa per il tasso di sostituzione dell'auto. L'analisi mostra che, per il 2012, l'utilizzo del <i>bike sharing</i> ha contribuito a ridurre di 115.826 km i viaggi in auto a Melbourne e fino a 632.841 km a Londra.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Shaheen (2014)		Questionari sono stati distribuiti <i>on line</i> agli utenti (6.373 rispondenti), mentre agli operatori (205 rispondenti) sono state fatte interviste; l'indagine è stata svolta in 5 cinque città in Messico, Canada e Stati Uniti. Il questionario ha raccolto informazioni sulla demografia, sul reddito, sull'età, genere, razza, sui cambiamenti nelle modalità di spostamento, prima e dopo l'introduzione del <i>bike sharing</i> , sull'utilizzo del TPL (maggiore o minore frequenza di utilizzo), sull'utilizzo dell'auto personale e sulla mobilità pedonale, infine sono state poste domande sulla sicurezza stradale.		I risultati del questionario mostrano un minor utilizzo dei mezzi pubblici da parte degli utenti del <i>bike sharing</i> , ma anche una riduzione dell'auto privata (a Montreal e Toronto, il 29% e il 35% ha dichiarato di guidare meno; a Minneapolis San Paolo e Salt Lake City, il 53% e il 55% e a Città del Messico, il 53%). Inoltre, vi è un aumento degli spostamenti a piedi a Città del Messico, Minneapolis-Saint Paul e Salt Lake City, mentre vi è una riduzione a Montreal e a Toronto.
Ricci (2015)				I risultati mostrano che il <i>bike sharing</i> causa, nella maggioranza dei casi, uno spostamento modale (80,2%) dalle modalità di spostamento sostenibili alla bicicletta, in particolare riducendo gli spostamenti a piedi (45,6%) e con gli autobus (25,8%) e con i treni (8,8%). L'impatto sembra minore sul trasferimento modale dall'auto privata (19,8%).

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Zhang e Mi (2018)	Le distanze percorse sono state calcolate utilizzando i punti di partenza e di arrivo, anche se tale metodologia sottostima le percorrenze. Per stimare le distanze in modo più accurato, gli autori propongono un metodo che utilizzi informazioni sulla base di un set di dati sul <i>bike sharing</i> fornito dall'azienda Mobike.			Nel 2016, con il <i>bike sharing</i> a Shanghai sono state risparmiate 8.358 tonnellate di benzina e sono state ridotte le emissioni di CO ₂ e NO _x di 25.240 e 64 tonnellate, rispettivamente. Dal punto di vista spaziale, i benefici ambientali sono molto più elevati nei distretti più sviluppati di Shanghai, dove si trova la densità di popolazione più elevata.
Sobolevsky <i>et al.</i> (2018)	Il modello adottato considera le principali alternative di trasporto disponibili per ogni viaggio in Citi Bike: a piedi, con i mezzi pubblici, con i veicoli privati o per il noleggio di veicoli, e stima le probabilità di prendere ciascuno. Le diverse modalità di trasporto offrono diversi costi e benefici per l'utente, il grado ottimale dipende dal compromesso tra costi e benefici. Per definire l'utilità della modalità di trasporto gli autori hanno convertito sia il tempo che i costi in valori monetari, ad esempio valutando il tempo a livello di un salario orario medio per i pendolari.			Secondo la stima del modello, ogni stazione di Citi Bike determina un risparmio medio di carburante che varia da 85 litri all'anno a Jersey City e 840 litri l'anno a Manhattan. Tali risparmi possono essere direttamente tradotti in emissioni veicolari risparmiate da 0,2 a 2 tonnellate di anidride carbonica all'anno, e di altri inquinanti atmosferici quali PM, NO _x , SO ₂ , VOC e CO.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Wang e Szeto (2018)	Gli autori propongono una metodologia per riposizionare sia le biciclette funzionanti che quelle rotte, in una rete di condivisione, al fine di raggiungere un perfetto equilibrio tra domanda e offerta di bike in ciascuna stazione e assicurarsi che tutte le biciclette rotte vengano riportate al deposito. Viene presentato un modello MILP (<i>Mixed Integer Linear Program</i>) per analizzare tale problematica e trovare una soluzione commerciale per risolverla.			L'aumento percentuale di bici rotte nel sistema, comunque, determina un aumento delle emissioni di CO ₂ , e la dimensione di tale aumento dipende da vari fattori come la distanza dalle stazioni al deposito e la capacità di carico dei veicoli utilizzati per la redistribuzione delle biciclette.
Kou <i>et al.</i> (2020)	Il modello BS-EREM stima stocasticamente le modalità di trasporto sostituite dai viaggi in <i>bike sharing</i> , considerando fattori quali la distanza del viaggio, lo scopo del viaggio, l'orario di partenza del viaggio, l'accessibilità dei transiti pubblici e le distribuzioni storiche delle scelte di modalità di trasporto.			La riduzione delle emissioni di gas serra varia nelle diverse città: Chicago, Boston e Philadelphia hanno le prestazioni migliori, riducendo di 352,7 g, 345,0 g e 340,9 g CO _{2eq} per ogni miglio di viaggio percorso, rispettivamente.
Chen <i>et al.</i> (2020)	È stata analizzata la quantità di emissioni di CO ₂ imputabili al <i>bike sharing</i> in termini di produzione, funzionamento, manutenzione e smaltimento nell'intero ciclo di vita delle biciclette.			I calcoli finali mostrano che, sulla base del numero attuale di biciclette, ciascuna deve essere utilizzata almeno 686 giorni per ottenere una riduzione netta positiva delle emissioni.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
D'Almeida <i>et al.</i> (2021)	Il calcolo delle emissioni di CO ₂ è stato concepito secondo il processo di <i>Life Cycle Assessment</i> ed è stato integrato da un sondaggio sul campo, per raccogliere dati direttamente dagli utenti, tra cui le modalità di viaggio alternative nel caso in cui il <i>bike sharing</i> non fosse stato disponibile.	Molte informazioni sono state integrate con un'indagine sul campo per comprendere le modalità degli spostamenti degli utenti su un campione di 200 individui di entrambi i sessi e di tutte le età.		L'indagine sul campo ha permesso di valutare la proporzione di modalità alternative alla bicicletta in città, sulla base di un campione diversificato di 105 utenti se il <i>bike sharing</i> non fosse stato disponibile, il 47% avrebbe viaggiato in autobus, il 17% in auto e il 36% a piedi. Supponendo che questi utenti percorrano la distanza media di un viaggio in auto, autobus o a piedi in Scozia, il risparmio di emissioni di CO ₂ realizzato dall'intera flotta del <i>bike sharing</i> in un periodo di 5 anni è stimato in 4.300 t di CO ₂ .

3 Carpooling

3.1 Introduzione

Le principali sfide che la mobilità sostenibile deve affrontare sono l'invecchiamento della popolazione, le migrazioni e la mobilità interna; il fenomeno dell'urbanizzazione passerà dal 72%, registrato nel 2007, all'84% previsto nel 2050⁴⁷. I sistemi di trasporto devono tenere in considerazione questi elementi, trovando soluzioni che mitighino l'impatto negativo sull'ambiente. L'innovazione tecnologica potrebbe contribuire in modo significativo al miglioramento delle prestazioni ambientali, dell'efficienza e della sicurezza, individuando nuove possibilità di trasporto in grado di assicurare livelli più elevati di integrazione tra il trasporto stradale con le altre modalità di spostamento.

Negli Stati Uniti, il *Bureau of Transportation Statistics* (BTS) ha indicato che, negli USA, oltre il 75% dei viaggi è "drive alone" e il restante 25% comprende tutti i modi di trasporto alternativi. Uno studio condotto in California riporta che negli Stati Uniti il settore dei trasporti è responsabile da solo di quasi il 70% di tutti i consumi di petrolio e di circa il 30% di tutte le emissioni di gas serra, consumando circa il 96% di tutta l'energia sotto forma di benzina o diesel (Martin e Shaheen, 2011). L'Agenzia per la protezione dell'ambiente degli Stati Uniti (US EPA)⁴⁸ afferma che la maggior parte delle emissioni di gas serra legate ai trasporti è dovuta alla combustione di combustibili fossili, con conseguente emissione di anidride carbonica (CO₂). La maggior parte del monossido di carbonio (CO) viene emessa quando i veicoli si muovono lentamente o nei casi di congestione del traffico, elemento responsabile anche di una maggiore produzione di gas serra.

Stimolare la crescita dell'utilizzo del servizio di *carpooling* è una strategia utile per la riduzione del traffico, che potrebbe comportare una riduzione del consumo di energia.

Il *carpooling* è definito come "condivisione di un'automobile da parte di più persone che devono fare lo stesso percorso",⁴⁹ si è diffuso negli ultimi anni, grazie alla presenza piattaforme web che facilitano l'incontro tra gli utenti (chi cerca e chi offre un passaggio). Spesso è utilizzato per gli spostamenti casa-scuola, casa-lavoro.

Il *carpooling* casuale o occasionale (chiamato anche "*slugging*"), invece, è un sistema di *carpooling* che non prevede la pianificazione delle corse viaggio per viaggio. Questo tipo di servizio interessa, in particolare, gli itinerari ad alta percorrenza e i conducenti di veicoli a singolo occupante (SOV⁵⁰). Gli equipaggi si formano casualmente, non in maniera preorganizzata, e ogni punto d'incontro serve più persone ogni giorno. Nel caso in cui fossero fruibili numerosi itinerari, il *carpooling* casuale potrebbe garantire una notevole riduzione del traffico totale di un'area metropolitana. Tale approccio è stato sperimentato

⁴⁷ Comunicazione della Commissione "Un futuro sostenibile per i trasporti: verso un sistema integrato, basato sulla tecnologia e di agevole uso", COM/2009/0279.

⁴⁸ *Environmental Protection Agency*.

⁴⁹ https://www.treccani.it/vocabolario/carpooling_%28Neologismi%29/.

⁵⁰ Single-Occupancy Vehicle.

in alcune città degli USA (Washington, San Francisco, Houston), nel Regno Unito e in Canada.

In questa analisi sono stati esaminati gli studi che hanno preso in considerazione l'impatto del *carpooling* sulla riduzione delle emissioni. Dalla ricerca condotta sono stati selezionati 11 articoli, di questi 8 hanno utilizzato dei modelli per simulare scenari per calcolare il risparmio di emissioni e 3 studi hanno utilizzato anche il questionario per la raccolta dei dati.

3.2 Stato dell'arte

Minett e Pierce (2011) hanno condotto uno studio in cui si sono posti l'obiettivo di dimostrare se il *carpooling* occasionale riducesse il consumo finale di energia e, in caso affermativo, di quanto. Per stimare l'impatto del *carpooling* gli autori hanno proposto l'utilizzo del modello *Auckland Region Traffic* (ART), già applicato dall'*Auckland Regional Council* (ARC) nel 2005 utilizzando come *input* punti di partenza e le destinazioni di 5.000 SOV. Lo studio del 2005 riteneva che i SOV potessero essere eliminati dalla strada utilizzando un sistema di *carpooling* con equipaggi composti da tre persone. L'*output* del modello aveva suggerito una riduzione del 4% del consumo di energia da parte del traffico di veicoli conseguente all'introduzione del servizio e un aumento della velocità media di viaggio da 37,81 a 40,44 km/h.

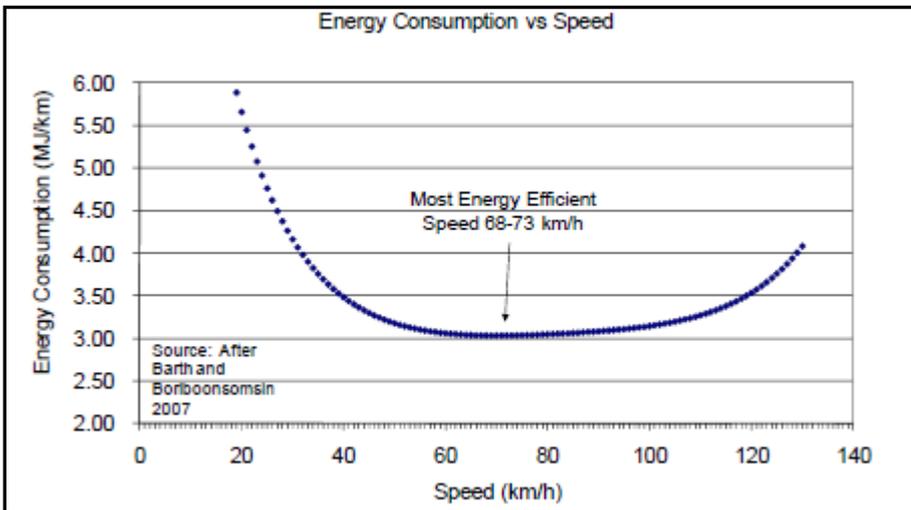
La stima del consumo energetico dei trasporti è molto complessa e le variabili che dovrebbero essere prese in considerazione nel modello sono numerose: i tempi, le modalità e costi di viaggio in diversi periodi dell'anno, il parcheggio, le tariffe di pedaggio, la convenienza delle alternative, la cordialità degli altri *carpooler*. Inoltre, ogni percorso stradale ha caratteristiche che portano a diverse ipotesi sulla velocità del traffico.

Per stimare i consumi in base alla velocità sono stati utilizzati modelli, basandosi innanzitutto sul lavoro di Barth e Boriboonsomsin⁵¹, che mostrano che le velocità più elevate e le più lente causano maggiori consumi per unità di distanza, la velocità ottimale è di circa 70 km/h (Figura 3.1).

Utilizzando le velocità medie, iniziali e modificate, riportate nello studio dell'ARC, applicando il modello di Barth e Boriboonsomsin, gli autori ottengono una riduzione dei consumi di carburante di circa il 3,6%, dato coerente con i risultati del 2005.

⁵¹ Barth M. e Boriboonsomsin K., 2008. *Real-World CO₂ Impacts of Traffic Congestion*. TRB 2008 Annual Meeting CD-ROM. Proceedings of the 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, USA, 13–15 January 2008.

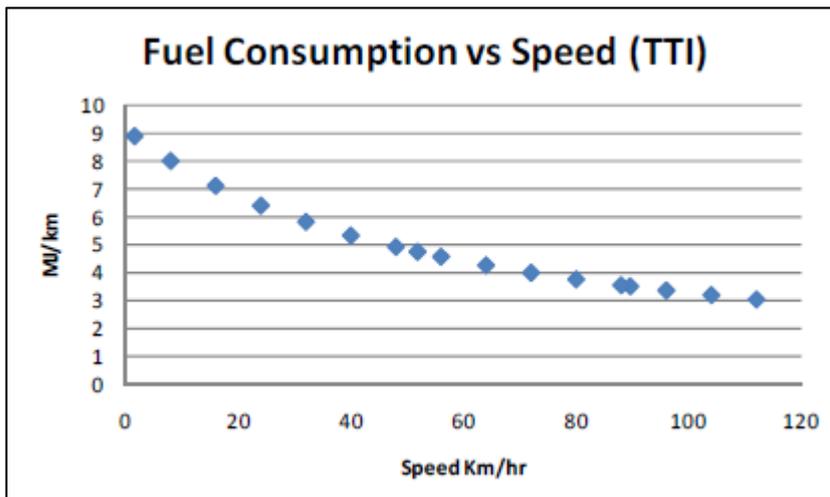
Figura 3.1 – Impatto sul consumo energetico delle diverse velocità di traffico



Fonte: Minett e Pierce, 2011.

Un secondo elemento preso in considerazione è stato il lavoro svolto dall'Istituto dei trasporti del Texas (TTI) che tramite il modello stima il consumo di energia in funzione delle diverse velocità di traffico. Il TTI per stimare i consumi in caso di traffico congestionato utilizza la seguente formula: $8,8 \text{ MPG}^{52} + (0,25 \times \text{velocità})$ (Figura 3.2).

Figura 3.2 – Consumo di carburante in funzione della velocità (TTI)



Fonte: Minett e Pierce, 2011.

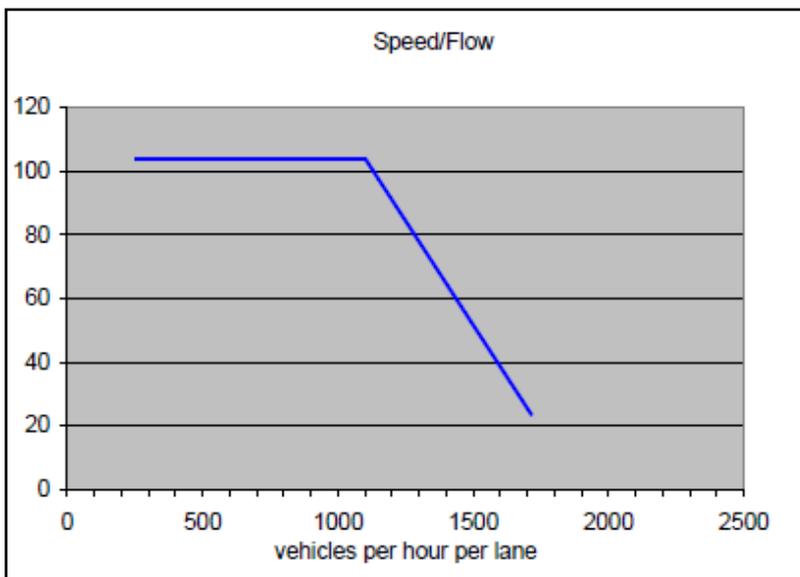
⁵² Miglia per gallone (MPG) è un'unità di misura che misura quante miglia un veicolo può viaggiare con un gallone di carburante.

Utilizzando le velocità medie, iniziali e modificate, riportate nello studio dell'ARC, e applicando il modello TTI gli autori stimano una riduzione dell'uso di carburante del 2,8%, circa il 70% del livello raggiunto dalla modellazione ARC. Lo studio del TTI non ha fornito una spiegazione delle differenze tra i due modelli di consumo energetico. Il fatto che il modello TTI non aumenti il consumo ad alta velocità avviene poiché il modello è utilizzato principalmente per la stima dei consumi di carburante nel traffico; quindi, gli autori ritengono probabile che sia stato convalidato per velocità inferiori.

Queste metodologie suggeriscono che sia possibile stimare la variazione del numero di veicoli rispetto al *carpooling* casuale e l'impatto sulla velocità media e sul consumo energetico.

La relazione velocità/flusso presuppone che il traffico si svolga senza problemi a velocità sostenute, con un numero di veicoli per corsia all'ora fino a 1.100. Quando i veicoli per corsia superano 1.100 ci si può aspettare che la velocità si riduca. Il modello utilizza un tasso costante di variazione di velocità del 12% per ogni 100 veicoli aggiunti o rimossi da una corsia in un'ora, il che costituisce una significativa semplificazione del complesso rapporto tra la velocità e il flusso (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Modello semplificato del rapporto tra la velocità e il flusso di traffico.



Fonte: Minett e Pierce, 2011.

Il *carpooling* riduce il consumo di energia, nel caso in cui le stesse persone che ne fanno uso avessero utilizzato, in alternativa, il proprio veicolo da soli, ma se alcuni *carpooler* occasionali utilizzassero altri metodi di trasporto (autobus o treno) la questione sarebbe diversa. Gli autori propongono tre modelli di consumo energetico:

1. il consumo di energia è stimato per i *carpooler* occasionali in un unico percorso di *carpooling* occasionale, rispetto a un misto di viaggio in autobus e guida SOV;

-
2. è stato creato un modello semplice per stimare l'impatto del *carpooling* occasionale su altri tipi di traffico nello stesso percorso;
 3. è stato utilizzato un modello semplice per stimare l'impatto totale del *carpooling* occasionale.

È stato distribuito un questionario ai *carpooler*, nei luoghi di incontro di *carpooling* occasionale, coinvolgendo 600 partecipanti (200 *carpooling* a tre persone), dai cui si evince che con il *carpooling* occasionale circolerebbero 200 veicoli, mentre senza il *carpooling* occasionale ne circolerebbero 128 (più gli autobus). Poiché i partecipanti utilizzano il *carpooling* occasionale, non è possibile essere sicuri del tipo di servizio di trasporto pubblico che i partecipanti utilizzerebbero, se non potessero usare il *carpooling* occasionale. Sono stati stimati scenari per confrontare il fabbisogno energetico del *carpooling* occasionale con il fabbisogno energetico per la combinazione di autobus e SOV che verrebbero sostituiti. Sono stati descritti due scenari, ognuno dei quali coinvolge 600 viaggiatori, che percorrono una distanza di 22,4 km (la lunghezza media ponderata di tutti i percorsi del *carpooling* occasionale di San Francisco):

- scenario 1: 200 *carpooling* occasionali, (600 viaggiatori),
- scenario 2: 128 SOV più un numero sufficiente di autobus per 440 persone.

Il risultato basato su questi presupposti è che la combinazione di autobus e SOV utilizza il 24% in più di energia rispetto allo scenario del *carpooling* occasionale. Questa analisi confronta solo il consumo energetico del trasporto dei partecipanti in automobile o in autobus e non include l'impatto energetico del traffico casuale. Per stimare l'impatto sul resto del traffico, è necessario confrontare il consumo di energia nei flussi di traffico con e senza *carpooling* casuale.

Le variabili chiave utilizzate sono le velocità stimate con e senza *carpooling* casuale, che a loro volta dipendono da quanto il traffico si è modificato rispetto al traffico esistente. L'impatto energetico sarà proporzionalmente maggiore, quando le velocità del traffico sono basse (maggiore congestione) e i consumi per unità di distanza sono elevati, mentre sarà proporzionalmente minore quando le velocità di traffico sono alte (maggiore fluidità).

Gli impatti energetici giornalieri dei 600 membri di un singolo percorso di *carpooling* occasionale vengono utilizzati per stimare l'impatto di 9.000 utenti (punto mediano dell'intervallo 8.000-10.000) dell'intero sistema. I risultati suggeriscono che il *carpooling* occasionale farebbe risparmiare da 250 a 500 GJ al giorno (l'equivalente di 1,7-3,5 milioni di litri /450.000-900.000 galloni di benzina all'anno). Questo beneficio aumenterebbe con l'aumento della congestione, o se il consumo medio di energia delle auto fosse maggiore rispetto alle cifre utilizzate nel modello, e diminuirebbe se la congestione diminuisse o se le auto fossero più efficienti.

I benefici non energetici del *car pooling* casuale includono il tempo risparmiato, gli autobus non acquistati e gestiti, i conducenti di autobus non pagati e i vantaggi del *flow-on*, come la riduzione delle emissioni e la diminuzione degli incidenti. Gli autori

concludono affermando che il *carpooling* occasionale determina un risparmio di energia e genera altri benefici collaterali.

L'obiettivo di questo documento è stato quello di stimare l'impatto sul consumo energetico del *carpooling* occasionale, esso sposta grandi volumi di persone a costi molto bassi. È stato stimato che il beneficio per la città di San Francisco superi i 30 milioni di dollari all'anno, compreso il risparmio di 1,7-3,5 milioni di litri (0,45-0,9 milioni di galloni USA) di carburante, a fronte di una spesa pubblica quasi nulla. Esso mostra che la maggior parte dei benefici attribuiti al *carpooling* occasionale sono costituiti dall'impatto sul resto del traffico (90% dell'energia conservata) e dal risparmio di tempo.

Syedabrishamia *et al.* (2012) hanno effettuato uno studio con l'obiettivo di stimare l'impatto del *carpooling* sul consumo di carburante, per verificare se la sua implementazione determini o meno un risparmio energetico, e di analizzare i fattori che possono spingere maggiormente gli utenti a adottare questa forma di mobilità.

Gli autori, in particolare, stimano la quantità di carburante che potrebbe essere risparmiata annualmente a Teheran se si sviluppasse il *ridesharing*⁵³. Le stime considerano l'effetto dell'aumento del numero medio di passeggeri in un veicolo e la diminuzione del numero di chilometri percorsi dal veicolo. In questo studio, al fine di rappresentare in modo opportuno la domanda di *carpooling*, è stato applicato un modello di deviazione della domanda. Questo tipo di modelli, derivati dai modelli di regressione non lineare, possono essere utilizzati per stimare la percentuale di viaggiatori che scelgono una nuova infrastruttura o un nuovo sistema di trasporto. In particolare, il modello proposto stima la percentuale degli utenti di veicoli a singola occupazione, che scelgono il *carpooling* (veicoli ad alta occupazione). Inoltre, conoscendo le prestazioni del sistema di trasporto di Teheran, è stato possibile calcolare il risparmio di carburante. Preliminarmente all'applicazione del modello, gli autori, tramite *survey*, hanno raccolto dati con l'obiettivo di registrare gli spostamenti e il comportamento dei viaggiatori dopo l'introduzione del *carpooling* e per determinare la riduzione dei tempi di viaggio. I fattori che, secondo gli autori, influenzano la scelta del *carpooling* possono essere classificati in tre gruppi:

- caratteristiche socioeconomiche del viaggiatore,
- caratteristiche del viaggio e delle strutture di trasporto,
- preferenza dei viaggiatori per il *carpooling*.

Il questionario, diviso in tre parti, è composto da 13 domande relative a ciascuna delle tre categorie sopra elencate. Il questionario è stato distribuito nell'ottobre 2011 a 550 persone, 470 questionari sono stati restituiti. Più del 90% dei rispondenti ha dichiarato di effettuare spostamenti per motivi di lavoro (82%) o di studio (11%). I primi risultati hanno mostrato che la maggior parte dei viaggiatori interessati al *carpooling* aveva difficoltà a trovare un *partner* appropriato per condividere il proprio viaggio, e che, sul 25% degli

⁵³ Il concetto di *ridesharing* si riferisce in generale all'attività di condivisione di passaggi in auto, anche al fine di produrre un guadagno (in questo caso definito *ridesharing on demand*) mentre il concetto di *carpooling* presuppone che la condivisione del viaggio non preveda un guadagno per il conducente ma solo una condivisione dei costi.

intervistati, la riduzione dei tempi di viaggio non aveva alcuna influenza. Si sono stimati il numero degli spostamenti risparmiati con l'utilizzo del *carpooling* e il conseguente risparmio di carburante. Poiché la maggior parte degli utenti ha utilizzato il *carpooling* per spostamenti di lavoro, sono stati presi in considerazione solo i viaggi di lavoro per stimare la quantità di risparmio annuale di carburante. Il tempo di viaggio e la percentuale di riduzione del tempo di viaggio hanno influito direttamente sulla scelta del *carpooling*.

Il modello di deviazione della domanda è stato utilizzato per prevedere la domanda deviata verso il *carpooling*. I risultati mostrano che il 44% degli intervistati sceglie il *carpooling* in modo indipendente dal conoscere o non conoscere qualcuno per condividere l'autoveicolo e l'utilizzo del *carpooling* porterebbe un risparmio di 336,5 milioni di litri di carburante all'anno. Se i viaggiatori che conoscono un *rideshare*, utilizzassero il *carpooling*, il risparmio annuale di carburante si ridurrebbe a 97,9 milioni di litri. Questo conferma che l'utilizzo di strategie appropriate, come i siti *web* di *carpooling*, potrebbe aumentare la domanda del 30% e questo comporterebbe una riduzione del consumo annuo di carburante di circa 240 milioni di litri. L'implementazione del sistema di *carpooling* potrebbe contribuire a migliorare l'efficienza energetica nell'area urbana di Teheran, a ridurre la produzione di sostanze inquinanti e a migliorare la qualità dell'aria.

Tra gli studi condotti in Europa, si segnala quello di Stewart (2015). Il suo lavoro riporta i risultati di una modellizzazione, applicata al contesto specifico della Scozia, che quantifica le riduzioni relative di CO₂ e della congestione del traffico, conseguenti all'implementazione di misure ICT (*Information and Communication Technology*) per migliorare i tempi di viaggio in autobus e di misure ICT per migliorare il *car sharing*. I risultati della modellizzazione, validi per la scala locale scozzese, sono stati successivamente testati su scala europea. In particolare, l'autore utilizza i risultati del progetto europeo COMPASS⁵⁴ che ha analizzato l'impatto di una serie di strumenti ICT che potrebbero migliorare la co-modalità di spostamento.

Nello studio viene utilizzato il modello di trasporto esistente per la Scozia, di proprietà del *Transport Scotland* (l'agenzia nazionale dei trasporti scozzese), per produrre stime quantitative per la riduzione del traffico e delle emissioni derivanti dalla potenziale implementazione di soluzioni ICT (applicazioni che forniscono miglioramenti dei tempi di percorrenza degli autobus).

Le riduzioni delle emissioni di CO₂ sono state stimate utilizzando il Modello LATIS (*Land Use and Transport Integration in Scotland*), un modello integrato di utilizzo del territorio e di trasporto per la valutazione strategica in tutta la regione scozzese. La natura del modello

⁵⁴ Gli obiettivi del progetto COMPASS sono stati:

- fornire un quadro complessivo delle future esigenze dei viaggiatori alla luce delle principali tendenze socioeconomiche;
- analizzare come le applicazioni ICT e ITS possano favorire l'integrazione di soluzioni di trasporto multimodale;
- valutare come queste soluzioni possono contribuire alla de-carbonizzazione delle attività di trasporto;
- valutare le potenzialità delle applicazioni ICT e ITS per fornire dati comportamentali e informazioni per migliorare le indagini sui viaggi e favorire l'armonizzazione;
- validare le soluzioni ICT con gli *stakeholder* radicati nei contesti nazionali.

è tale che l'impatto relativo dei possibili effetti dello scenario ICT potrebbe essere valutato in diverse sotto-regioni, in particolare nelle regioni urbane, interurbane e rurali.

Il modello è stato applicato vagliando tipologie di scenari. Una prima tipologia di scenari si propone di valutare l'impatto della riduzione dei tempi di viaggio dei veicoli del trasporto pubblico su strada, che può essere il risultato di misure di bigliettazione intelligenti e di altre misure ICT, come il miglioramento delle informazioni ai viaggiatori e la priorità dei segnali degli autobus. Una seconda tipologia di scenari è stata progettata per considerare l'impatto dell'aumento dell'occupazione dei veicoli, conseguente al *lift-sharing* derivante dalle iniziative ICT. L'effetto stimato è un aumento dell'occupazione di 5 punti percentuali (da 1,03 a 1,08).

In generale, gli impatti stimati con ciascuno scenario sono relativamente marginali (se confrontati con grandi progetti, come quelli infrastrutturali), ma nonostante gli impatti stimati siano marginali, le riduzioni delle emissioni di CO₂ sono evidenti e in alcuni casi potrebbero essere abbastanza significative.

Si potrebbero ottenere riduzioni significative delle emissioni complessive di CO₂ se si riuscisse ad aumentare il tasso di occupazione delle automobili a livello nazionale. Qualsiasi programma, volto a promuovere questo obiettivo, dovrebbe dare buoni risultati per quanto riguarda le misure di riduzione delle emissioni. Le misure prese a livello locale hanno un beneficio prevalentemente locale, la condivisione dei veicoli in ambito urbano ha un grande impatto su scala regionale, ma un piccolo impatto nelle zone rurali.

L'impatto di una soluzione ICT per aumentare il tasso di occupazione dell'auto è molto più significativo in termini di riduzione delle emissioni rispetto alle percentuali di miglioramento di soluzioni analoghe applicate al trasporto pubblico. In termini di modellizzazione, il vantaggio di ridurre i tempi di attesa e di percorrenza del TPL e quindi l'aumento della capacità di trasporto sarà limitata dall'eventuale diminuzione della congestione del traffico. Le misure relative al trasporto pubblico richiedono misure aggiuntive, mentre l'aumento del tasso di occupazione dell'automobile soffre meno di tali problematiche.

Per testare i risultati su scala europea sono state prese in considerazione altre soluzioni ICT relative a:

1. gestione più efficiente delle infrastrutture, dei servizi e del traffico, tra cui un'ottimizzazione dell'infrastruttura e della gestione dei servizi;
2. riduzione dei costi stradali: A) migliori prestazioni dei veicoli e regimi di guida più efficienti attraverso veicoli semi o completamente autonomi; B) meno congestione grazie agli assistenti di traffico e ad un GPS più intelligente;
3. ottimizzazione dell'intermodalità e interconnessioni più semplici;
4. ottimizzazione della gestione del traffico.

Le misure ICT non sempre determinano la conseguenza "desiderata" in termini di riduzione delle emissioni di carbonio e il trasferimento modale verso modalità più

sostenibili. La tecnologia ICT contribuirà a velocizzare i tempi di viaggio su strada, a beneficio, in parte del trasporto pubblico, ma soprattutto a vantaggio dell'auto privata in quanto riduce il tempo di percorrenza.

L'impatto aggregato sulla CO₂ è che il trasferimento modale implica un aumento complessivo del consumo di carburante e delle conseguenti emissioni di CO₂ (fino al 4,2%), a condizione che i fattori di emissione siano mantenuti stabili. Il tempo di viaggio diminuisce, soprattutto per la modalità stradale, dato che la strada ha la quota modale di emissioni più grande. Quindi se le soluzioni ICT agevolano il trasporto su strada, è probabile che l'impatto sulle emissioni sia peggiorativo a meno che non vengano implementate altre misure per decarbonizzare le automobili.

Altre soluzioni ICT, che possono contribuire ad aumentare il tasso di occupazione dei veicoli possono essere: opzioni di *carpooling* e *ridesharing*, destinate ad aumentare in futuro, ed una tariffazione intelligente.

Le politiche HOT/HOV⁵⁵ che inducono un migliore utilizzo dello spazio dei veicoli danno luogo a quattro scenari ICT (tasso di occupazione base: 1,5; medio: 1,75; alto: 2; molto alto: 2,25). Aumentando l'occupazione dei veicoli del 50% si ottiene una riduzione del 33% dei chilometri percorsi dai veicoli, una diminuzione del 20% dei costi generalizzati e una diminuzione del consumo di carburante. I costi di viaggio del sistema di trasporto diminuiscono fino al 20% a causa dell'aumento dell'occupazione dell'auto, rendendo il viaggio medio in auto per persona molto più economico.

Javid *et al.* (2016 (a) e 2016 (b)) hanno analizzato il contributo delle corsie riservate ai veicoli ad alta occupazione (HOV) e del *carpooling* sugli inquinanti atmosferici e sulle emissioni di CO₂. Le corsie HOV sono corsie speciali riservate all'uso esclusivo dei veicoli ad alta occupazione, compresi veicoli del *carpooling*, del *vanpooling* e gli autobus. Queste corsie possono contribuire a mitigare le emissioni di gas serra promuovendo il *carpooling* (veicoli con due o più passeggeri), riducendo il numero di veicoli sulle strade e alleggerendo la congestione del traffico. Nello studio è stata sviluppata una serie di modelli statistici per indagare l'impatto delle corsie HOV e di altri fattori sul comportamento degli utenti del *carpooling* in tutti i 50 Stati degli USA e nel Distretto di Columbia. Successivamente, è stata stimata la riduzione media delle emissioni in seguito all'implementazione del *carpooling* in ogni Stato. In letteratura vi sono dati limitati su come le corsie HOV possano influenzare il comportamento del *carpooling* e su come il *carpooling* possa influenzare il tasso di emissioni delle autovetture. Inoltre, i *set* di dati non sono stati utilizzati molto spesso per modellizzare la propensione al *carpooling* all'interno degli Stati e per confrontare le emissioni dei veicoli in tutti gli Stati. L'obiettivo di questa ricerca è quello di colmare il divario attuale utilizzando i dati esistenti a livello macro. L'analisi della propensione al *carpooling*, in funzione della disponibilità di corsie HOV, ha lo scopo di quantificare

⁵⁵ *High Occupancy Vehicle (HOV)* si riferisce a veicoli con un elevato numero di persone a bordo. *High Occupancy Toll lane (HOT)* si riferisce alle corsie preferenziali per i veicoli ad elevata occupazione.

l'influenza di variabili multiple sul tasso di adesione al *carpooling*, attraverso lo sviluppo di un modello di regressione multipla.

I fattori che potrebbero influenzare la propensione al *carpooling* possono essere classificati in tre categorie principali: fattori infrastrutturali, fattori legati ai costi e fattori sociodemografici. Questo studio ha utilizzato un *set* di dati contenente sette variabili che potrebbero influenzare la scelta del *carpooling*. I risultati del modello hanno mostrato che:

1. la variabile infrastrutturale HOV ha un impatto positivo statisticamente significativo sul tasso di *carpooling* (aumento del *carpooling* dell'1,26% per ogni ulteriore aumento dell'1% di chilometri di corsie preferenziali).
2. Il tempo di viaggio per recarsi al lavoro ha mostrato un ruolo negativo nella propensione al *carpooling* (-0,31%), il che significa che più breve è il viaggio medio per recarsi al lavoro, più alto sarà il tasso di adesione al *carpooling*.
3. Il prezzo della benzina ha mostrato un ruolo positivo nel tasso di crescita del *carpooling* (0,33%) e anche l'aumento del prezzo della benzina favorisce il *carpooling* (aumento del 2,33% del tasso di *carpooling* per ogni dollaro di aumento del prezzo del carburante per gallone).
4. Le variabili sociodemografiche quali il grado di istruzione e il reddito sono risultate inversamente correlate all'utilizzo del *carpooling*.

Per stimare la riduzione delle emissioni di tutti i gas serra gli autori utilizzano i fattori di emissione dell'EPA.

L'analisi calcola la mitigazione delle emissioni per due scenari: uno scenario *business as usual* (BAU) e uno scenario alternativo. Lo scenario del BAU descrive le variabili osservate nel 2008, mentre lo scenario di espansione descrive le variabili dopo l'introduzione di una corsia HOV, supponendo un incremento della percentuale di corsie HOV di 0,5 metri, per ogni ora del tempo totale giornaliero di viaggio per recarsi al lavoro. Il modello è stato utilizzato per stimare l'aumento del tasso di *carpooling* dovuto allo scenario alternativo in ogni stato. La percentuale di riduzione delle emissioni per lo scenario di espansione rispetto allo scenario BAU è stata calcolata sia per i gas serra che per gli inquinanti atmosferici.

I risultati hanno mostrato che il Distretto di Columbia ha il più grande potenziale di riduzione della CO_{2eq} annuale nello scenario di espansione, pari al 4,53%. L'aumento dei chilometri di corsia HOV in tre Stati - Hawaii, New York e New Jersey - ha un impatto moderato sulla riduzione di CO_{2eq} rispettivamente dell'1,64%, 1,37%, 1,35%. Gli altri Stati, tra cui Maryland, California, Massachusetts, Connecticut e Rhode Island, hanno un'influenza minore sulla riduzione delle emissioni di gas serra dall'1,13% allo 0,68% della riduzione di CO_{2eq}; tuttavia, essi contribuiscono al cambiamento climatico, poiché l'impatto cumulativo è significativo. La riduzione minore è stata stimata nel Nord Dakota, Sud Dakota e Montana, rispettivamente dello 0,02%, 0,03% e 0,05%.

Concludendo, il modello di propensione al *carpooling* mostra che a livello nazionale il *carpooling* viene scelto principalmente per ridurre i costi di viaggio. La riduzione annuale nazionale di CO_{2eq} ottenuta aumentando i chilometri di corsie HOV in base allo scenario alternativo è stimata in 1,57 milioni di tonnellate.

Javid *et al.* (2017) nel loro studio hanno esaminato il contributo delle corsie HOV⁵⁶ nell'influenzare i tassi di *carpooling*, e quantificando gli effetti del *carpooling* sulle emissioni di anidride carbonica (CO_{2eq}) e di inquinanti atmosferici. Hanno sviluppato una serie di modelli di regressione multipla per indagare e identificare l'impatto delle corsie HOV e di altri potenziali fattori infrastrutturali e socioeconomici sulla propensione al *carpooling* negli Stati Uniti. Successivamente, hanno stimato le riduzioni delle emissioni che potrebbero derivare in uno scenario con incremento di corsie HOV. I risultati della modellizzazione potrebbero avere un'ampia gamma di applicazioni: valutazione dell'efficacia del *carpooling* a supporto alle autorità cittadine, ai responsabili politici e i pianificatori dei trasporti nell'ottimizzazione del *marketing* e degli investimenti infrastrutturali.

Per quantificare l'influenza delle variabili infrastrutturali, di costo e sociodemografiche sui tassi di *carpooling* negli Stati Uniti, è stata sviluppata una serie di modelli di regressione multipla, aggregando dati a livello statale e a livello di contea. È stato utilizzato per l'analisi un modello di regressione, utile per indagare la relazione tra variabili e quantificare l'impatto individuale di ogni variabile per diversi livelli di aggregazioni di dati. L'obiettivo di quantificare i fattori che potevano contribuire ad aumentare il tasso di *carpooling* quali le infrastrutture delle corsie HOV, e altri sette potenziali fattori che possiamo ricondurre a tre categorie principali: infrastrutture (TPL⁵⁷), costi e fattori sociodemografici.

Il *carpooling* è stato definito come la quota di *carpooling* sul totale dei lavoratori, sia formale (ad esempio, i club di *carpooling*) che informale (ad esempio, la condivisione del tragitto tra i membri della famiglia, i vicini e gli amici) di chi fa *carpooling* per andare al lavoro.

Per calcolare le emissioni di inquinanti atmosferici, sono stati utilizzati i fattori di emissione dell'Agenzia per la protezione dell'ambiente (EPA, 2008a⁵⁸). Le emissioni di metano, protossido di azoto e carbonio sono stimate in termini netti di CO_{2eq}.

Sono state, quindi, calcolate le emissioni che si verificherebbero in uno scenario di *business as usual* (BAU) e in uno scenario medio di espansione HOV (ogni Stato/contea incrementa la propria percentuale di corsie HOV di 0,5 metri per ogni ora del tempo totale di viaggio impiegato per gli spostamenti giornalieri per lavoro, per tutti i lavoratori).

Si è ipotizzato che: (1) i *carpooler* passino dalla guida in solitaria al *carpooling*, (2) la quota di persone che utilizzano altri mezzi di trasporto (ad esempio il trasporto pubblico, il lavoro

⁵⁶ HOV corsie per il *carpooling*, corsie espresse o corsie a diamante, sono costruite per incoraggiare gli automobilisti a scegliere il *carpooling* fornendo viaggi più brevi tempi e maggiore affidabilità dei tempi di viaggio.

⁵⁷ Trasporto Pubblico Locale.

⁵⁸ EPA, 2008a. *Sample Calculation of Emission Reductions and Fuel Savings from a Carpool Program – Emission Facts* (EPA-420-F-08-028).

a domicilio, a piedi e in bicicletta) rimanga la stessa, e (3) due autisti singoli scelgano il *carpooling*, condividendo il viaggio per tutto l'anno, esclusi i fine settimana e i giorni festivi (250 giorni lavorativi).

Poiché le emissioni sono principalmente (anche se non del tutto) correlate ai VMT (*Vehicle Miles Traveled*), non si è tenuto conto di eventuali riduzioni di velocità imposte sulle corsie generali. La percentuale di riduzione delle emissioni per lo scenario di espansione, rispetto allo scenario BAU, è stata calcolata per entrambi i gas serra e gli inquinanti atmosferici.

È stata stimata una riduzione annuale delle emissioni di CO_{2eq}, ottenute nello scenario HOV, di 1,83 milioni di tonnellate, pari a circa lo 0,16% delle emissioni dei veicoli leggeri americani e allo 0,23% delle emissioni di CO_{2eq} delle autovetture americane. Le emissioni totali di CO_{2eq} degli Stati Uniti associate ai veicoli leggeri sono pari a 1.148 milioni di tonnellate; quelle associate alle autovetture sono pari a 798 milioni di tonnellate (EPA, 2008b⁵⁹). È stata stimata una riduzione delle emissioni annuali di inquinanti atmosferici COV, CO e NO_x di circa 0,14%, 0,12% e 0,04% rispettivamente, mentre le emissioni di PM10 e PM2,5 sono ridotte di quasi 0,007% delle emissioni dei veicoli stradali statunitensi.

Gli scenari di espansione delle corsie HOV potrebbero ridurre le emissioni di CO_{2eq} e di inquinanti atmosferici nell'ordine di almeno un decimo di un milione di tonnellate.

Infine, è stato stimato l'impatto dei chilometri di linea HOV per lo stato della California, utilizzando, nel modello, i dati a livello di contea. Nello scenario ipotetico, il tasso di *carpooling* aumenterebbe dello 0,55% in tutto lo Stato.

I dati per alcune delle variabili di questo studio (tempo medio di viaggio per andare al lavoro, dimensioni della famiglia, numero di veicoli) si basano sui risultati delle indagini ACS⁶⁰ e CHTS⁶¹ che forniscono i dati più affidabili e completi ai fini di questo studio. La distanza media degli spostamenti si è ottenuta dalle risposte al sondaggio CHTS 2012.

Il modello mostra maggiori riduzioni per le contee con maggiore densità di popolazione: le maggiori riduzioni sono previste per la contea di San Francisco, con il 4,4%. Seguono Los Angeles, Alameda e Orange che mostrano una riduzione moderata. Le altre contee, tra cui San Mateo, Santa Clara, Contra Costa e San Diego hanno una risposta minore. Contee con densità di popolazione estremamente bassa, tra cui Modoc, Trinity, Siskiyou, e Inyo hanno riduzioni in media intorno al centesimo di punto percentuale. I risultati indicano che questa strategia è poco utile nelle contee a bassa densità di popolazione. Le riduzioni annuali di CO_{2eq} in tutto lo Stato sono stimate in circa lo 0,31% delle emissioni di CO_{2eq} dei veicoli leggeri della California, ovvero lo 0,03% delle emissioni di CO_{2eq} dei veicoli leggeri

⁵⁹ EPA, 2008b. *Air Pollutant Emissions Trends Data*.

<https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/air-pollutant-emissions-trends-data>

⁶⁰ ACS, 2012. U.S. *Census Bureau, American Community Survey*

<https://factfinder.census.gov/faces/nav/jsf/pages/searchresults.xhtml?refresh=t>

⁶¹ Caltrans, 2013a. *2010-2012 California Household Travel Survey Final Report*.

http://www.dot.ca.gov/hq/tpp/offices/omsp/statewide_travel_analysis/chts.html

degli Stati Uniti, con riduzioni analoghe anche per quanto riguarda le emissioni di inquinanti atmosferici.

I risultati mostrano che il numero di chilometri di corsia HOV e i prezzi del gas sono correlati con i tassi di *carpooling* in tutta l'Europa e negli USA, invece, il tempo medio di viaggio per recarsi al lavoro non sembra influenzare in modo considerevole la scelta del *carpooling* a livello statale, mentre, a livello di contea anche l'impatto di questa variabile sembra essere importante.

In tutti gli Stati Uniti, la dimensione media delle famiglie e il reddito hanno una forte influenza sulla propensione al *carpooling*. A livello di contea, in California, tuttavia, nessuna variabile sociodemografica ha mostrato una forte influenza sul tasso di *carpooling*.

Bruck *et al.* (2017) nel loro articolo hanno analizzato il *carpooling* attraverso lo studio di un caso pratico di una grande società di servizi, con sede a Reggio Emilia, che aveva l'obiettivo di incoraggiare i propri dipendenti a scegliere il *carpooling* per ridurre i costi di trasporto e le emissioni di CO₂. È stato realizzato un caso pilota in cui tutti i dipendenti sono diretti verso lo stesso luogo di lavoro, ma con diversi turni di lavoro giornalieri. Le persone con lo stesso turno avrebbero potuto ricorrere al *carpooling* per raggiungere e/o tornare dal luogo di lavoro nello stesso momento. Gli autori hanno valutato, attraverso l'uso di algoritmi di ottimizzazione e modelli matematici, la quantità di emissioni di CO₂ che potrebbe essere risparmiata in questo studio pilota, per poi sviluppare un'applicazione *web* per i dipendenti per commutare e concordare le corse in condivisione. Nell'articolo viene presentata una breve rassegna della letteratura sul *carpooling* e descritto il problema. Successivamente sono presentati i modelli matematici e gli algoritmi euristici. Infine, sono discussi i dettagli del caso di studio. I dati raccolti includono informazioni dettagliate sui turni relativi ad un periodo che va da febbraio a dicembre 2012. Una prima analisi è stata effettuata per capire la distribuzione dei turni lungo la settimana; i dipendenti sono stati suddivisi in quelli che guidano la propria auto e quelli che prendono i mezzi pubblici. È stato analizzato il numero medio di dipendenti per ciascun tipo di turno: turni con lo stesso orario di inizio (andata); turni con lo stesso orario di fine (ritorno) e i turni che condividono sia l'orario di inizio che quello di fine (entrambi). I risultati hanno mostrato che i possibili gruppi di *carpooling*, che condividono una sola tratta del viaggio, sono probabilmente più numerosi e potrebbero produrre maggiori risparmi. Complessivamente questi risultati sembrano suggerire che l'implementazione di un'applicazione di *carpooling* in questo scenario, potrebbe portare a interessanti riduzioni della distanza percorsa e delle emissioni di CO₂. Gli algoritmi vengono utilizzati per determinare le emissioni di CO₂ per il viaggio di andata, una volta impostati i coefficienti per le emissioni di CO₂ relative alle distanze percorse⁶². Le emissioni per il viaggio di ritorno vengono valutate invertendo la matrice dei costi (asimmetrica).

⁶² $\gamma_c = 0,17$ kg/km e $\gamma_b = 0,07$ kg/km: sono due coefficienti che stimano la quantità di emissioni di CO₂ in kg per ogni km percorso rispettivamente in auto e con i mezzi pubblici.

La valutazione è stata effettuata su due scenari diversi: nel primo scenario, chiamato raggruppamento a due vie, sono stati raggruppati i dipendenti che hanno lo stesso turno, stessi orari di andata e di ritorno. Nel secondo scenario, chiamato raggruppamento a senso unico (*1-way*), viene proposta una soluzione diversa per ciascuno dei due viaggi, cercando di raggruppare i dipendenti che hanno lo stesso orario di partenza nel viaggio di andata in funzione del viaggio di ritorno, o viceversa. In questo caso le soluzioni di *carpooling* sono calcolate per entrambi i viaggi, tenendo conto della matrice asimmetrica, ma considerando anche possibili gruppi diversi. Per ognuno degli approcci è stata mostrata la media delle emissioni di CO₂ in kg, le riduzioni percentuali rispetto al caso di assenza di *carpooling* e il tempo di calcolo in secondi dell'elaborazione. Il *carpooling* potrebbe ridurre in media le emissioni di circa il 22%. Lo scenario 1 a senso unico mostra un beneficio maggiore e potrebbe portare a una riduzione media di circa il 28%. Le maggiori riduzioni ottenute rispetto allo scenario a 2 vie sono dovute al fatto che, per lo scenario a 1 via, le dimensioni dei gruppi di dipendenti che possono utilizzare il *carpooling* sono maggiori. Valutando le emissioni totali nell'intero periodo di 276 giorni, la differenza totale tra il caso di non *carpooling* (scenario peggiore) e la soluzione a senso unico (scenario migliore) ammonta a circa 7,7 tonnellate di CO₂.

Gli autori mostrano un prototipo dell'applicazione *web* che è stato distribuito presso l'azienda per essere testato. L'applicazione è divisa in due moduli principali, il nucleo di ottimizzazione e il nucleo visivo, che comunicano tra loro attraverso un database MySQL per memorizzare e recuperare i dati elaborati durante le operazioni. L'applicazione è disponibile solo per i dipendenti che hanno deciso di partecipare al *carpooling*. L'utente può comunicare via *e-mail* con gli altri partecipanti, scegliendoli tra i *carpooling* proposti o semplicemente guardando quelli più vicini. Il sistema non forza alcun *carpooling* e gli utenti possono rifiutare di accettare una richiesta di viaggio. Inoltre, non suggerisce un modo per condividere i costi, in quanto questo aspetto è lasciato agli accordi comuni tra i partecipanti. In conclusione, i risultati indicano che l'azienda potrebbe influenzare direttamente l'efficienza della pratica del *carpooling* ottimizzando i turni dei dipendenti al fine di creare gruppi più numerosi. Un altro aspetto interessante da implementare è la possibilità di trovare strategie appropriate per la condivisione dei costi tra gli utenti.

Liu *et al.* (2019) nel loro studio hanno unito i dati sullo sviluppo tecnologico dei servizi di *carpooling*. Hanno sviluppato una metodologia basata su un approccio *data-driven* per elaborare politiche efficaci per stimolare ulteriormente la crescente domanda di *carpooling*, soprattutto nelle città con una popolazione di pochi milioni di abitanti e un alto tasso di veicoli di proprietà. Tale approccio potrebbe comportare: (1) la promozione del *carpooling* come alternativa di viaggio soprattutto per i pendolari, e (2) la riduzione del numero di utenti di veicoli con un solo occupante, che si rifletterebbe su una serie di problematiche quali il trasporto, il parcheggio, il traffico, l'energia, il consumo e le emissioni. Nello studio è stata esaminata l'efficacia delle politiche dei sussidi a favore del *carpooling*.

I dati sul *carpooling* sono stati raccolti da un sistema di applicazione di *ridesharing* basato su *smartphone* chiamato *DiDi Hitch*⁶³. *DiDi* è la più grande società di servizi di *ride-hailing*⁶⁴ in Cina e una delle più grandi piattaforme di servizi di *sourcing on-demand* al mondo. Essa raccoglie due tipi di *dataset* di *carpooling* per i conducenti (raccoglie informazioni dettagliate sull'origine e la destinazione dei conducenti, compresa una serie di distanze di viaggio, nonché la data e l'ora del viaggio) e il *dataset* per i passeggeri (raccoglie informazioni sul numero di passeggeri e l'origine dei loro viaggi e la destinazione).

La stima del risparmio di carburante del *carpooling* e le politiche di incoraggiamento del *carpooling* si focalizzano sui potenziali utenti del *carpooling*. Considerando tutti i *carpooler* come potenziali utenti del *carpooling*, sono stati stimati i limiti superiori del risparmio di carburante dell'utilizzo del *carpooling*. Il *carpooling* potrebbe far risparmiare carburante aumentando il numero di passeggeri per veicolo e riducendo il numero di chilometri necessari gli spostamenti.

Tuttavia, con il *carpooling* aumenta anche il peso trasportato da ogni veicolo, e richiede una deviazione aggiuntiva per il prelievo dei passeggeri, entrambi fattori che aumentano il consumo di carburante. Esiste una relazione lineare tra un cambiamento nel peso del veicolo e la corrispondente variazione del risparmio di carburante, FE (misurato dal consumo di carburante per cento chilometri percorsi). Sono stati ipotizzati tre scenari che differiscono per il numero di passeggeri (tasso di occupazione).

La quantità del consumo totale di carburante durante un viaggio è la somma del consumo di carburante in ogni scenario di occupazione del veicolo (1 solo occupante, senza *carpooling*; un passeggero; più di un passeggero), che deriva dal prodotto del risparmio di carburante specifico dai chilometri percorsi nello scenario corrispondente.

Il calcolo della lunghezza del percorso di viaggio, con diverse occupazioni del veicolo, si fonda sui dati di funzionamento dei servizi di *carpooling* basati sull'uso di internet con il telefono. L'applicazione mette in comunicazione i conducenti e i passeggeri con itinerari simili, che insieme concordano la tariffa di viaggio. Viene anche considerato l'aumento delle distanze delle percorrenze (deviazione) e della durata del viaggio che i conducenti sono disposti a fare per prendere e lasciare i passeggeri.

Gli autori hanno sviluppato nuovi modelli di *ridesharing* basati sull'utilizzo effettivo dei servizi di *ridesharing online*, per calcolare la lunghezza del percorso basandosi sul *matching* conducente-passeggero, identificando quattro *pattern*:

1. percorsi identici (schema 1): sia l'origine che la destinazione dei due gruppi di passeggeri sono identiche;
2. percorsi inclusivi (schema 2): il percorso del gruppo 2 è totalmente coperto dal percorso del gruppo di passeggeri 1;

⁶³ *DiDi*, 2018. <http://static.xiaojukeji.com/pinche/pages/websitediallift>

⁶⁴ Servizio di autovettura con autista (es: taxi, Uber o Lyft).

-
3. percorsi sovrapposti (schema 3): una parte del percorso tra il gruppo 1 e il gruppo 2 si sovrappongono;
 4. percorsi distinti (schema 4): non ci sono sovrapposizioni tra i percorsi dei due gruppi di passeggeri.

In questo documento è stato considerato solo il caso più comune in cui un l'autista può offrire corse fino a un massimo di due ordini di passeggeri.

La metodologia sviluppata è stata testata nella città di Pechino e i risultati hanno mostrato che il *ridesharing* potrebbe essere un'alternativa al trasporto pubblico, per supportare le richieste di pendolarismo dei lavoratori residenti nelle aree suburbane.

In media, il risparmio di carburante di un viaggio in *carpooling* sarebbe di 1,23 litri e il risparmio annuale di carburante potrebbe raggiungere i 36 milioni di litri. Il risparmio medio di carburante di un viaggio con più passeggeri per veicoli è più del doppio di quello di un viaggio con un solo passeggero per veicolo.

Rispetto al TPL i benefici ambientali del *carpooling* sono d'altra parte inferiori: il *carpooling* consuma più carburante del servizio di metropolitana. La metà dei *carpoolers* intervistati era auto-dipendente; se si considera la stima del risparmio di carburante nelle modalità di trasporto alternative, il risparmio medio di carburante sarebbe ridotto dello 0,32 litri per viaggio. Nelle ore di punta il numero dei viaggi in *carpooling* era pari al 30% del totale dei viaggi, indice del pendolarismo dei viaggi di *ridesharing*. La distanza media di viaggi in *ridesharing* è di circa 22 km e oltre l'85% dei viaggi è più lungo di 10 km, suggerendo l'utilizzo per spostamenti di media e lunga distanza.

Una forma particolare di condivisione è il *ridesplitting*⁶⁵ i cui benefici ambientali sono stati studiati da Li *et al.* (2021) in Cina. Si tratta di un servizio che consente ai passeggeri di condividere una corsa e una tariffa. Le caratteristiche principali del *ridesplitting* sono l'autista a noleggio e un servizio di mobilità su richiesta più efficiente e conveniente. Alla fine del 2019 il numero totale dei passeggeri che hanno scelto i servizi di *ridesplitting* in Cina ha raggiunto 2,9 miliardi. Il *ridesplitting* è una modalità di spostamento che potrebbe migliorare l'efficienza del traffico, ridurre le congestioni e l'inquinamento atmosferico.

Da una revisione della letteratura sui benefici ambientali del *ridesplitting* gli autori hanno rilevato una carenza di studi su tale tematica prefiggendosi pertanto l'obiettivo di colmare tale lacuna. Nello studio sono stati calcolati i fattori di emissione di anidride carbonica (CO₂), monossido di carbonio (CO), ossido di azoto (NO_x), e idrocarburi (HC) dovuti sia ai viaggi singoli (*ridesourcing*⁶⁶ regolare) che condivisi (*ridesplitting*) utilizzando i dati del servizio GPS. Le riduzioni delle emissioni per km di corsa dal *ridesplitting* sono state valutate confrontando i fattori di emissione delle corse singole e condivise in diverse fasce

⁶⁵ Nel *ridesplitting* "i rider con origini e destinazioni simili sono abbinati allo stesso autista a noleggio e veicolo in tempo reale, e la corsa e i costi sono divisi tra gli utenti" definizione di Shaheen, S., Chan, N., Bansal, A., Cohen, A., 2015. Shared mobility: Definitions, industry developments, and early understanding. Transportation Sustainability Research Center, Innovative Mobility Research.

⁶⁶ Nel *ridesourcing* i conducenti utilizzano veicoli personali (vedi Uber e Lyft).

orarie e griglie spaziali. Infine, è stato adottato un modello di regressione spaziale, *Spatial Error Model* (SEM) per identificare i fattori che influenzano le riduzioni delle emissioni.

Lo studio è stato svolto a Chengdu, la capitale della provincia del Sichuan, con una popolazione che supera i 16 milioni di abitanti. La piattaforma di *ridesplitting* utilizzata, Didi Chuxing, è stata lanciata nel 2015. È stato calcolato che dal 2018 al 2019, la piattaforma Didi Chuxing a Chengdu ha ridotto 107 mila tonnellate di emissioni di CO₂ e 400,5 tonnellate di inquinanti atmosferici (CO, NO_x, PM2,5 e PM10).

I dati consistono in set di informazioni relative sui percorsi viaggio e traiettoria GPS di Didi Express e Didi Premier, due dei servizi di traiettoria GPS degli utenti. Le corse sono suddivise in singole e condivise in base all'algoritmo di identificazione del viaggio *ridesplitting*.

Il modello COPERT è stato utilizzato per stimare le emissioni dei veicoli. Le variabili relative al viaggio che sono state considerate sono i fattori che possono influenzare la riduzione delle emissioni del *ridesplitting*, come il numero totale di autisti, il numero totale di ordini, la distanza totale di viaggio, la velocità media di viaggio, il tasso di corse condivise e il tasso di sovrapposizione della traiettoria delle corse condivise. Sono state anche prese in considerazione le variabili dell'ambiente costruito: "5D: Densità, Diversità, Design, Accessibilità della destinazione e Distanza dal transito" che possono contribuire alla riduzione delle emissioni del *ridesplitting*. I risultati principali dello studio sono i seguenti:

- esistono differenze significative nei fattori di emissione per corsa-km di *ridesourcing* regolare e *ridesplitting*. Le riduzioni medie delle emissioni di CO₂, CO, NO_x e HC dal *ridesplitting* sono 51.35 g/ride-km, 0.069 g/ride-km, 0.017 g/ride-km, e 0.004 g/ride-km, rispettivamente. I corrispondenti tassi medi di riduzione delle emissioni sono rispettivamente del 28,7%, 32,5%, 27,7% e 31,2%.
- I modelli temporali di riduzione delle emissioni di CO₂, CO, NO_x e HC del *ridesplitting* sono relativamente stabili (ad eccezione della fascia 4:00-6:00 del mattino). I tassi di riduzione delle emissioni di CO₂ e NO_x sono leggermente più alti durante le ore di punta.
- Esistono aree urbane in cui la riduzione delle emissioni di CO₂, CO, NO_x e HC è più significativa come in prossimità e sulle superstrade.
- Le variabili relative ai viaggi e all'ambiente costruito di ogni griglia spaziale sono significativamente associate alle riduzioni delle emissioni da *ridesplitting*. Queste variabili includono il tasso di sovrapposizione della traiettoria delle corse condivise, la velocità media di viaggio, il numero totale di conducenti, il tasso di corse condivise, la densità delle superstrade, la densità delle strade primarie, la densità dei punti di interesse e la diversità di uso del suolo.
- Il tasso di sovrapposizione della traiettoria delle corse condivise è il fattore più importante che influenza i benefici ambientali del *ridesplitting*. Le riduzioni delle emissioni da *ridesplitting* aumentano significativamente con l'aumento del tasso di sovrapposizione della traiettoria delle corse condivise.

I limiti di questa ricerca sono, prima di tutto che questo studio si concentra principalmente sulla riduzione delle emissioni da *ridesplitting* rispetto al *ridesourcing* regolare. Tuttavia, il *ridesplitting* potrebbe sostituire modalità di viaggio a basse emissioni di CO₂, quali la bicicletta, a piedi, e quindi non contribuire alla riduzione delle emissioni. Inoltre, non sono stati affrontati tutti i fattori che possono influenzare la riduzione delle emissioni come le condizioni meteorologiche, la condizione della strada, i ritardi del traffico e la percentuale di veicoli elettrici. Infine, un fattore limitante consiste nell'utilizzo dei soli dati di un tipico giorno della settimana in una zona specifica di Chengdu, in Cina. Sarebbe quindi utile avere dati convalidati da altre città in un intervallo di tempo lungo per avvalorare le conclusioni di questo studio.

3.3 Conclusioni

La mobilità condivisa è un servizio collettivo che possiede un grande potenziale per la riduzione delle emissioni di gas serra. Tuttavia, esistono alcune limitazioni, in termini di politiche, che devono essere affrontate in modo analitico, per facilitare una transizione fluida tra le differenti modalità di mobilità. Le scelte della politica giocano un ruolo importante affinché queste modalità condivise si inseriscano nel quadro più ampio del modello di *business* dei trasporti, altrimenti potrebbero portare alla riduzione delle alternative esistenti a basse emissioni da parte di auto di minore capacità che effettuano viaggi multipli per facilitare le esigenze degli utenti (Rayaprolu, 2018).

Il successo del *carpooling* è legato alla presenza di una serie di vantaggi che dovrebbe risultare sufficiente ad attrarre il numero di utenti desiderato. Il *carpooling* occasionale aggiunge l'elemento della flessibilità ai vantaggi già riscontrati del *carpooling*. Questo sistema, se implementato, porterebbe benefici quali una riduzione dei consumi energetici per i partecipanti e del traffico per il resto della popolazione.

Per favorire il *carpooling*, è necessario considerare:

- sistemi di incentivazione differenziati adattati per età, genere, luogo di residenza, preferenze di incentivazione, ecc.;
- i tempi di inizio e fine del lavoro/scuola;
- il luogo di residenza;
- le esigenze individuali prima e/o dopo il lavoro/scuola;
- la volontà della persona di condividere gli spostamenti.

Una politica mirata a promuovere un maggiore tasso di occupazione di una singola automobile ha evidenti benefici, prima di tutto la diminuzione del consumo di carburante che contribuisce direttamente a ridurre le emissioni e inoltre, riduce la domanda di parcheggio. Pertanto, se da un lato i miglioramenti globali delle tecnologie e dell'informazione e della comunicazione comportano uno scarso beneficio sulle emissioni di CO₂ (e in alcune circostanze potrebbero comportare un aumento), lo sviluppo mirato

della tecnologia, verso obiettivi specifici di riduzione delle emissioni di anidride carbonica, quali l'incremento del tasso di occupazione dell'auto, potrebbe contribuire in modo significativo alla riduzione delle emissioni dovute ai trasporti.

3.4 Tabella riepilogativa *carpooling*

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Minett e Pearce (2011)	<ul style="list-style-type: none"> • modello Auckland Region Traffic (ART), • modello di Barth e Boriboonsomsin, • modello (TTI) che stima il consumo di energia in funzione delle diverse velocità di traffico. 	2.350 questionari distribuiti e 725 restituiti.	Due scenari, ognuno dei quali coinvolge 600 viaggiatori	I risultati suggeriscono che il <i>carpooling</i> occasionale farebbe risparmiare da 250 a 500 GJ al giorno (l'equivalente di 1,7-3,5 milioni di litri /450.000-900.000 galloni di benzina all'anno).
Seyedabrishamia <i>et al.</i> (2012)	Modello di regressione non lineare	550 questionari distribuiti e 470 restituiti.	Un solo scenario basato sulle risposte al questionario.	L'utilizzo del <i>carpooling</i> porterebbe un risparmio di 336,5 milioni di litri di carburante all'anno. L'utilizzo di strategie appropriate, come i siti <i>web</i> di <i>carpooling</i> , potrebbe aumentare la domanda del 30% e questo comporterebbe una riduzione del consumo annuo di carburante di circa 240 milioni di litri.
Stewart (2015)	Modello LATIS (<i>Land Use and Transport Integration in Scotland</i>), un modello integrato di utilizzo del territorio e di trasporto per la valutazione strategica in tutta la regione scozzese.		Due scenari, il primo valuta l'impatto della riduzione dei tempi di viaggio dei veicoli del trasporto pubblico su strada (misure di bigliettazione intelligenti e altre misure ICT), il secondo considera l'impatto dell'aumento dell'occupazione dei veicoli.	Aumentando l'occupazione dei veicoli del 50% si ottiene una riduzione del 33% dei chilometri percorsi dai veicoli, una diminuzione del 20% dei costi generalizzati e una diminuzione del consumo di carburante.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Javid <i>et al.</i> (2016)	Modello di regressione multipla.		Due scenari, uno scenario <i>business as usual</i> e uno scenario alternativo.	I risultati hanno mostrato che il Distretto di Columbia ha il più grande potenziale di riduzione della CO _{2eq} annuale nello scenario di espansione, del 4,53%. L'aumento dei chilometri di corsia HOV in tre stati - Hawaii, New York e New Jersey - ha un impatto moderato sulla riduzione di CO _{2eq} rispettivamente dell'1,64%, 1,37%, 1,35%. Gli altri stati, tra cui Maryland, California, Massachusetts, Connecticut e Rhode Island, hanno un'influenza minore sulla riduzione delle emissioni di gas serra dall'1,13% allo 0,68% della riduzione di CO _{2eq} . La riduzione minore è stata stimata nel Nord Dakota, Sud Dakota e Montana rispettivamente dello 0,02%, 0,03% e 0,05%.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Javid <i>et al.</i> (2017)	Modello di regressione multipla.		Due scenari, uno scenario <i>business as usual</i> e uno scenario alternativo.	È stata stimata una riduzione annuale delle emissioni di CO _{2eq} , ottenute nello scenario HOV, di 1,83 milioni di tonnellate, pari a circa lo 0,16% delle emissioni dei veicoli leggeri americani e allo 0,23% delle emissioni di CO _{2eq} delle autovetture americane. È stata stimata una riduzione delle emissioni annuali di inquinanti atmosferici COV, CO e NO _x di circa lo 0,14%, lo 0,12% e lo 0,04% rispettivamente, mentre le emissioni di PM10 e PM2,5 sono ridotte di quasi lo 0,007% delle emissioni dei veicoli stradali statunitensi.
Bruck <i>et al.</i> (2017)	Le emissioni di CO ₂ sono stimate in base alle distanze percorse in macchine o con i mezzi del TPL.	Dati sulle abitudini di mobilità raccolti a partire da un campione di 135 dipendenti di un'azienda.	Nel primo, scenario (raggruppamento a due vie) sono stati raggruppati i dipendenti che hanno lo stesso turno, stessi orari di andata e ritorno. Nel secondo scenario, (raggruppamento a senso unico) viene proposta una soluzione diversa per ciascuno dei due viaggi, sono stati raggruppati i dipendenti che hanno lo stesso orario di partenza nel viaggio di andata in funzione del viaggio di ritorno, o viceversa.	Il <i>carpooling</i> potrebbe ridurre in media le emissioni di circa il 22%. Lo scenario 1 a senso unico mostra un beneficio maggiore e potrebbe portare a una riduzione media di circa il 28%. Valutando le emissioni totali nell'intero periodo di 276 giorni, la differenza totale tra il caso di non <i>carpooling</i> (scenario peggiore) e la soluzione a senso unico (scenario migliore) ammonta a circa 7,7 tonnellate di CO ₂ .

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Liu <i>et al.</i> (2019)	Il calcolo della lunghezza del percorso di viaggio, con diverse occupazioni del veicolo, si basa sui dati funzionamento dei servizi di <i>carpooling</i> basati sull'uso di internet con il telefono.	<i>Dataset</i> di <i>carpooling</i> della società DiDi, una delle più grandi piattaforme di servizi di <i>sourcing on-demand</i> al mondo. 1.063 questionari distribuiti da DiDi.	Tre scenari costruiti in base al numero di passeggeri (tasso di occupazione del veicolo): 1 solo occupante, senza <i>carpooling</i> ; un passeggero; più di un passeggero.	In media, il risparmio di carburante di un viaggio in <i>carpooling</i> sarebbe di 1,23 litri e il risparmio annuale di carburante può raggiungere i 36 milioni di litri. Il risparmio medio di carburante di un viaggio con più passeggeri per veicoli è più del doppio di quello di un viaggio con un solo passeggero per veicolo.
Li <i>et al.</i> (2021)	Il modello COPERT è stato utilizzato per stimare le emissioni dei veicoli.	I dati consistono in <i>set</i> di informazioni relative sui percorsi viaggio e traiettoria GPS di Didi Express e Didi Premier, due dei servizi di traiettoria GPS degli utenti.		Le riduzioni medie delle emissioni di CO ₂ , CO, NO _x , e HC dal ridesplitting sono 51.35 g/ride-km, 0.069 g/ride-km, 0.017 g/ride-km, e 0.004 g/ride-km, rispettivamente. I corrispondenti tassi medi di riduzione delle emissioni sono rispettivamente del 28,7%, 32,5%, 27,7% e 31,2%.

4 Zone 30 e *traffic calming*

4.1 Introduzione

Uno dei più comuni sistemi di gestione del traffico utilizzati è la conversione di interi quartieri, singole strade o tratti di strada in zone a 30 km/h, specialmente nelle zone residenziali dove il precedente limite di velocità era di 50 km/h. Queste misure, volte ad aumentare la sicurezza stradale, sono di solito viste o addirittura promosse come vantaggiose per l'ambiente grazie alla riduzione del consumo di carburante e delle emissioni.

Altre misure di gestione del traffico, considerate in numerose città, perseguono lo spostamento del traffico dalle ore di punta alle ore non di punta con l'introduzione di pedaggi, la riduzione dei limiti di velocità, la sincronizzazione dei semafori lungo le arterie principali, la sostituzione delle intersezioni con rotatorie e l'aggiunta di ulteriori corsie ove possibile. Inoltre, sono stati messi in atto interventi per modificare il comportamento dei conducenti (guida dinamica, segnaletica a messaggio variabile, *cruise control*⁶⁷).

La riduzione del numero di eventi di accelerazione e decelerazione, associati a fermate e ripartenze, migliora l'efficienza del motore, garantendo una riduzione dei consumi di carburante e di emissioni. L'ottimizzazione della temporizzazione delle segnalazioni e del coordinamento dei semafori lungo le strade principali rende più fluido il flusso del traffico. Tali sistemi sono progettati per creare "onde verdi" lungo le arterie stradali principali. D'altra parte, le riduzioni di velocità, ad esempio attraverso l'introduzione di zone con un limite di velocità di 30 km/h, stanno diventando misure adottate frequentemente per aumentare la sicurezza stradale delle aree residenziali o delle zone in prossimità degli istituti scolastici, in quanto forniscono benefici in termini di sicurezza stradale, deviazione del traffico, così come flussi più fluidi. Recentemente molte città hanno convertito interi quartieri in zone 30 (con un limite di velocità a 30 km/h). La riduzione della velocità massima è stata promossa dai decisori politici perché si è ipotizzato che possa non solo aumentare la sicurezza stradale, ma anche ridurre l'impatto sull'ambiente grazie a minori consumi di carburante e a minori emissioni. Tali ipotesi, tuttavia, non sono state scientificamente convalidate. Ad esempio, la riduzione di velocità nelle aree urbane o sulle autostrade può però avere effetti molto diversi sulle emissioni di particolato.

È noto che le emissioni dei veicoli sono fortemente correlate con il comportamento di guida, anche se le misurazioni dirette di questo tipo di effetti sono molto difficili. Le emissioni in condizioni reali di traffico differiscono notevolmente a seconda dello stile di guida. Una guida aggressiva comporta un forte aumento nel consumo di carburante e

⁶⁷ È il regolatore automatico di velocità, ossia il dispositivo elettronico che permette di impostare e mantenere una determinata velocità di marcia.

nelle emissioni rispetto ad una guida più rilassata e regolare (MISE, 2021⁶⁸), in quanto la guida aggressiva genera un numero maggiore di micro-viaggi transitori, che alla fine si traducono in un superamento delle emissioni (Shahariar *et al.*, 2022). Il consumo di carburante aumenta del 12-40% e le emissioni di CO₂ aumentano di un fattore da 1 a 8 in caso di guida poco regolare. Per VOC e NO_x l'aumento delle emissioni dovuto alla guida aggressiva varia rispettivamente tra il 15-400% e tra il 20-150% (Casanova e Fonseca, 2012; Panis *et al.*, 2007; 2011). Tendenze confermate anche in un recente studio (Shahariar *et al.*, 2022) in cui è stato osservato un moderato aumento delle emissioni di CO₂ e NO_x (rispettivamente fino al 37% e al 38%) e un elevato aumento delle emissioni di CO (fino all'88%). In generale è stato mostrato come uno stile di guida normale comporti una riduzione del 22% delle emissioni inquinanti rispetto ad uno stile di guida aggressivo (Rivera *et al.*, 2022)⁶⁹.

Un notevole sforzo è stato quindi dedicato allo sviluppo di modelli per descrivere le emissioni e l'inquinamento derivante dall'attuazione delle politiche di gestione del traffico. Per la stima delle emissioni dei veicoli alcuni modelli macroscopici si basano sulla velocità media di viaggio. In Europa, ad esempio, gli inventari delle emissioni di gas di scarico sono calcolati secondo la metodologia COPERT⁷⁰. Tale metodologia calcola le emissioni per chilometro dovute ai veicoli, utilizzando principalmente la velocità media. Per la stessa velocità media, si può osservare una velocità istantanea molto diversa e differenti profili di accelerazione, ognuno dei quali si traduce in profili molto diversi di consumo di carburante e di livelli di emissioni. Tale modello è utile se applicato su larga scala fornendo stime ragionevolmente buone. Per le applicazioni su piccola scala e in tempo reale, tuttavia, è necessario sviluppare modelli che tengano conto delle condizioni di funzionamento del veicolo.

Per valutare i cambiamenti nello stile di guida e il loro impatto sulle emissioni di gas di scarico, è fondamentale che i modelli incorporino pienamente le nuove tecnologie impiegate e il comportamento dei conducenti del veicolo. Infatti, i tassi di emissione aumentano non solo con l'aumento della velocità media, ma anche aumentando l'accelerazione. Le tecniche di micro-simulazione modellizzano il traffico sulle reti stradali e sono efficaci nel rappresentare il comportamento in tempo reale dei consumi e delle emissioni. I modelli di tracciamento microscopico considerano il comportamento dei singoli veicoli, che sono modellati in modo da obbedire a regole empiriche per il tracciamento delle auto, nel cambio di corsia e nel sorpasso. Essi permettono di stimare

⁶⁸ MISE. 2021. Guida sul risparmio di carburante e sulle emissioni di CO₂ delle autovetture. Edizione, 2021.

https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Guida_CO2_Anno_2021.pdf

⁶⁹ Néstor Diego Rivera, Paúl Andrés Molina, Andrea Karina Bermeo, Oscar Enmanuel Bermeo, and José Luis Figueroa.

2022. Driving Style Analysis by Studying PID's Signals for Determination of Its Influence on Pollutant Emissions. Chapter 30. In: Á. Rocha et al. (eds.), *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society*, Smart

Innovation, Systems and Technologies 252. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-16-4126-8_30

⁷⁰ <https://www.emisia.com/>

l'impatto di misure in modo dettagliato, perché si tiene conto dell'influenza della frenata e dell'accelerazione. Tuttavia, tali modelli richiedono una grande quantità di dettaglio nei loro dati di input (tracciato stradale, orari dei segnali, conteggio del traffico, ecc.) e sono quindi utili soprattutto per studiare le misure di gestione del traffico all'interno di aree di piccole e medie dimensioni, come una porzione di una città.

Dalla ricerca bibliografica effettuata, sono stati selezionati quattordici articoli in base alla lettura dei titoli e degli *abstract*. Inoltre, sono riportati studi e rapporti prodotti nello specifico dalle realtà politiche del Regno Unito, Irlanda e Germania. Tutti gli studi hanno utilizzato sistemi di simulazione del traffico, con utilizzo di modelli microscopici per analizzare i consumi di carburante e le relative emissioni, conseguenti a politiche di gestione del traffico quali l'implementazione dei limiti di velocità a 30 km/h in aree urbane.

4.2 Stato dell'arte

Una metodologia per rendere la modellizzazione delle emissioni istantanee compatibile con i modelli di micro-simulazione del traffico è stata utilizzata da Panis *et al.* (2006). Tali autori prendono in considerazione l'effetto della gestione attiva della velocità sulle emissioni indotte dal traffico. In particolare, le emissioni da traffico causate dall'accelerazione e dalla decelerazione dei veicoli sono stimate sulla base di un modello di emissione istantanea integrato con un modello microscopico di simulazione del traffico (DRACULA⁷¹). Il modello di emissione si basa su misurazioni empiriche che mettono in relazione le emissioni dei veicoli con la tipologia, la velocità istantanea e l'accelerazione del veicolo. Il modello di traffico aggiorna secondo per secondo la velocità e l'accelerazione dei singoli veicoli in base allo stile di guida individuale, alla meccanica del veicolo e alla loro interazione con il traffico nella rete stradale. Il modello integrato viene applicato per testare una nuova tecnologia dedicata a gestire attivamente la velocità di guida dei veicoli in una rete urbana. La valutazione dell'impatto conseguente sulle emissioni dei veicoli nella rete fornisce un'indicazione dell'efficacia relativa dei diversi progetti tecnologici e delle diverse tipologie di conducente. Sono state prese in considerazione le emissioni dei seguenti inquinanti: ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (COV), biossido di carbonio (CO₂) e particolato (PM), scelti per il loro potenziale impatto negativi sulla salute.

I risultati mostrano che, mentre la gestione della velocità ha effettivamente ridotto la velocità media del traffico, il loro impatto sulle emissioni dei veicoli è complesso. Nella rete stradale presa in esame nello studio, le frequenti accelerazioni e decelerazioni hanno ridotto significativamente l'effetto sulle emissioni ottenuto grazie ad una bassa velocità media. L'evidenza sperimentale indica che la gestione attiva della velocità ha un impatto

⁷¹ Nel modello di traffico DRACULA, le velocità e le posizioni dei singoli veicoli vengono aggiornate ad un livello fisso di incremento temporale di 1 secondo.

poco o affatto significativo sulle emissioni inquinanti. In definitiva, lo studio suggerisce che l'analisi degli impatti ambientali del traffico e le relative politiche di gestione e controllo costituiscono una questione complessa e richiedono un'analisi dettagliata non solo del loro impatto sulle velocità medie ma anche su altri aspetti del funzionamento del veicolo, come l'accelerazione e la decelerazione.

Panis *et al.* (2006) per fare un po' di luce sul problema hanno calcolato le emissioni per alcune tipologie di auto moderne con il *software* VeTESS (*Vehicle Transient Emissions Simulation Software*) utilizzando cicli di guida urbani reali. Gli autori hanno confrontato i risultati con cicli di guida modificati artificialmente, limitando la velocità massima a 30 km/h ove opportuno, senza modificare l'accelerazione o la decelerazione.

La modellazione delle emissioni e i risultati presentati in questo documento dimostrano che la stima delle emissioni, anche di inquinanti classici, è un'impresa complessa. I risultati per gli inquinanti CO e HC, differiscono notevolmente tra veicoli e cicli di guida. Poiché le emissioni di questi inquinanti sono molto basse nelle auto moderne, esse non sono modellizzate con sufficiente precisione e le loro stime sono poco attendibili.

Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ e quindi il consumo di carburante, gli autori hanno riscontrato che il cambiamento del ciclo di guida ha avuto un impatto limitato, sia positivo che negativo, sulle emissioni. Per le emissioni di NO_x i risultati indicano una riduzione delle emissioni da moderata a importante.

I risultati di VeTESS per il PM dai motori *diesel* mostrano una diminuzione significativa, mentre le emissioni di PM per i veicoli a benzina non possono essere modellizzati con VeTESS. Utilizzando invece le funzioni di COPERT/MEET i risultati indicano un aumento moderato di PM.

Vi sono alcuni aspetti importanti che non sono stati presi in considerazione e che potrebbero potenzialmente invalidare i risultati e le conclusioni di questo studio: in primo luogo non è stata apportata alcuna modifica all'accelerazione e alla decelerazione dei cicli di guida. Si tratta di un presupposto implicito che deve essere convalidato perché i cambiamenti nello stile di guida (ad esempio tra i singoli conducenti) hanno un impatto importante sulle emissioni. In generale, si presume che la riduzione del limite di velocità porti anche ad uno stile di guida meno dinamico e ad un flusso di traffico più fluente. D'altra parte, non è improbabile che limiti di velocità molto bassi come quelli qui discussi irritino le persone e le inducano a recuperare il tempo perso accelerando maggiormente. Purtroppo, non si è potuto tenere conto di queste problematiche in questo studio mancando tali informazioni dettagliate. Questo problema potrebbe essere aggirato utilizzando modelli microscopici di simulazione del traffico che generano stime istantanee della velocità (e quindi anche dell'accelerazione) per i singoli veicoli. Sfortunatamente tali informazioni sono in gran parte basate su stime molto approssimative delle prestazioni del veicolo e del comportamento del guidatore. Un aspetto importante di questi studi è che,

se condotti correttamente, forniscono dei risultati convalidati rispetto agli flussi di veicoli reali e alle velocità misurate. I risultati per l'accelerazione, tuttavia, non vengono mai convalidati. Sarebbe quindi discutibile utilizzarli come base per qualsiasi stima delle emissioni. Inoltre, diversi autori hanno trovato molto difficile o impossibile includere l'accelerazione (come la variabile più semplice che descrive la dinamica) come variabile di ingresso per le funzioni di emissione simili a quelle calcolabili con COPERT (*COPERT-like emission*).

Uno degli aspetti che differenzia maggiormente i comportamenti di guida, poiché non è una variabile continua, è la scelta relativa al cambio di marcia. La decisione di aumentare o diminuire la marcia dipende da una combinazione di fattori tecnici specifici del veicolo (rapporto di trasmissione, coppia, ecc.) e da preferenze personali. In questo studio sono stati utilizzati, all'interno dello strumento VeTESS, valori di *default* per ogni auto. È tuttavia possibile che l'imposizione di un limite di velocità influisca sul cambio di marcia. Purtroppo, anche in questo caso, i dati non erano disponibili.

In uno studio successivo Panis *et al.* (2007) esaminano la difficoltà di stimare accuratamente gli effetti della velocità e delle politiche per la gestione delle emissioni di PM. Con il modello microscopico VeTESS gli autori hanno calcolato le emissioni, per tipologie specifiche dei veicoli, utilizzando dei cicli di guida reali ed hanno confrontato i risultati ottenuti utilizzando la metodologia COPERT.

Gli autori hanno utilizzato un modello molto dettagliato che può tenere conto dei cambiamenti nello schema di velocità, perché modella l'intera catena cinematica, compresi gli effetti transitori nel motore. Lo svantaggio è che i dati del motore e del veicolo, necessari per il modello, sono disponibili solo per un numero limitato di veicoli e non è possibile applicare il modello per esaminare cambiamenti nelle emissioni a livello macroscopico. L'analisi dettagliata del comportamento delle emissioni di questi veicoli è rilevante per due motivi: in primo luogo, i dati disponibili utilizzati per questo studio provengono da veicoli abbastanza popolari che rappresentano modelli analoghi di altre marche, auto con motori simili; in secondo luogo, i motori e la tecnologia di queste auto moderne sono una *proxy* di quella che potrebbe essere la flotta media dei veicoli nel prossimo futuro, dato rilevante per analizzare l'efficacia delle politiche.

I risultati indicano che non ci si deve aspettare un chiaro aumento o diminuzione delle emissioni. Gli autori arrivano alla conclusione che i risultati per le emissioni di PM potrebbero essere diversi. Gli effetti di specifici schemi di riduzione della velocità sulle emissioni di PM degli autocarri sono ambigui, mentre i risultati di VeTESS indicano che i gas di scarico del PM delle autovetture diesel mostrano una significativa diminuzione nelle aree urbane convertite in zone a 30 km/h. L'esposizione dei residenti a uno dei componenti più tossici della miscela di inquinamento atmosferico urbano potrebbe quindi anche diminuire.

Purtroppo, la correlazione tra modelli di emissioni microscopiche e modelli di traffico evidenziano alcune carenze come la mancanza di convalida di parametri importanti quali l'accelerazione e la decelerazione e le modifiche allo stile di guida (i limiti di velocità potrebbero comportare modifiche dello stile di guida).

Altre conseguenze dovute all'introduzione della zona 30 sono l'allontanamento del traffico di transito dalla zona interessata dal provvedimento o la preferenza di altre modalità di spostamento da parte dei residenti locali.

In questo documento gli autori considerano solo le emissioni di gas di scarico del PM. Le emissioni di PM dovute all'usura degli pneumatici, dei freni e del manto stradale o alla risospensione della polvere stradale non sono state considerate.

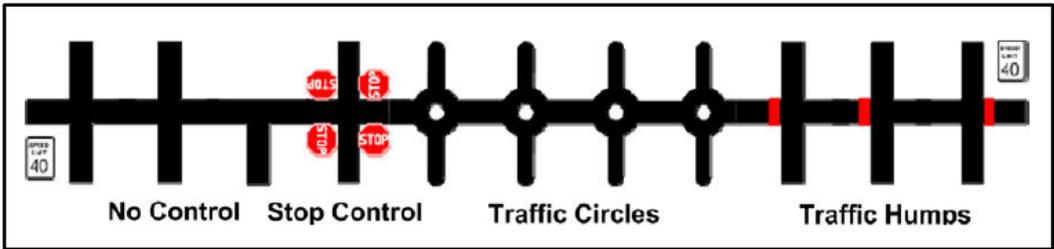
Lo studio di Ahn e Rakha (2009) quantifica l'impatto ambientale delle misure di "*traffic calming*⁷²" utilizzando una combinazione di modelli microscopici per il calcolo delle emissioni associati ad un sistema GPS che rileva secondo per secondo la posizione dei veicoli.

Molti metodi riportati in letteratura sono basati sulla velocità media dei veicoli e permettono di calcolare sia le emissioni che i consumi; tuttavia, questo tipo di approccio non considera le accelerazioni e decelerazioni istantanee tipiche dello stile di guida di un veicolo che incontra un sistema di dissuasione della velocità (dossi, rotatorie, ecc.). Un modello microscopico, associato ad un sistema GPS di localizzazione istantanea secondo per secondo, invece può essere in grado di valutare le emissioni e i consumi di carburante in queste particolari fasi del ciclo di guida urbano. Il GPS utilizzato in questo studio consente un'accuratezza di 2 m per la longitudine e latitudine, 3 m per l'altezza e 0.1 m/s per la velocità.

I dati utilizzati per lo studio sono stati campionati durante i fine settimana da maggio a settembre 2007 su tre diverse arterie stradali: Key Boulevard ad Arlington; 31st Street sempre ad Arlington e Broadview Drive ad Ashburn nella Contea della Northern Virginia, nei dintorni di Washington, DC. In particolare, Key Boulevard presenta numerose intersezioni con altri assi viari, degli incroci con obbligo di fermata, delle rotatorie e dei dossi stradali (Figura 4.1).

⁷² Il *traffic calming* prevede misure strategiche per migliorare la sicurezza e la qualità della vita riducendo la velocità dei veicoli e/o i volumi di attraversamento delle strade. Queste misure possono essere ad esempio dossi artificiali, rotonde, ecc.

Figura 4.1 – Key Boulevard. Corridoio di studio.



Fonte: Ahn e Rakha, 2009.

La scelta del campionamento durante i fine settimana è dovuta alla necessità di minimizzare le interazioni con gli altri veicoli e con i pedoni. Sono state utilizzate due macchine, una sportiva e una per il trasporto passeggeri, guidate da quattro piloti, due uomini e due donne, a cui è stato chiesto di guidare senza specifiche istruzioni cercando di mantenere piuttosto un normale ciclo di guida. In totale sono state esaminate circa 80 corse.

I risultati hanno mostrato che le misure di *traffic calming* (dossi e dissuasori in particolare) riducono la velocità dei veicoli contribuendo a migliorare le condizioni di sicurezza della strada ma, d'altra parte, portano a significativi aumenti del consumo di carburante e di emissioni in atmosfera quando si frena bruscamente oppure si accelera in modo "aggressivo". Anche le rotonde riducono le velocità, in modo meno brusco rispetto ad un dosso oppure ad uno stop, e pertanto portano ad aumenti più contenuti dei consumi e delle emissioni.

Nel *report* dell'*European Environment Agency* (2011) vengono analizzati i benefici dell'introduzione di limiti di velocità più bassi sulle autostrade sulla riduzione del consumo di carburante e sulle emissioni inquinanti. Il beneficio esatto dipende però da una serie di fattori tecnologici (il calo di energia consumata al diminuire della velocità) e non tecnologici (la composizione del parco veicoli, i modelli di guida, la frequenza di eccesso di velocità, la congestione e la deviazione del traffico dovuta al limite di velocità). Per valutare l'impatto delle misure di gestione della velocità sono generalmente utilizzati modelli di emissione.

Il COPERT IV è un modello ampiamente utilizzato in Europa per la stima delle emissioni a partire dalle velocità medie; i suoi fattori di emissione e consumo medi sono stati calcolati su test su un ampio numero di veicoli adottando diversi cicli di guida. Ai fini di questo

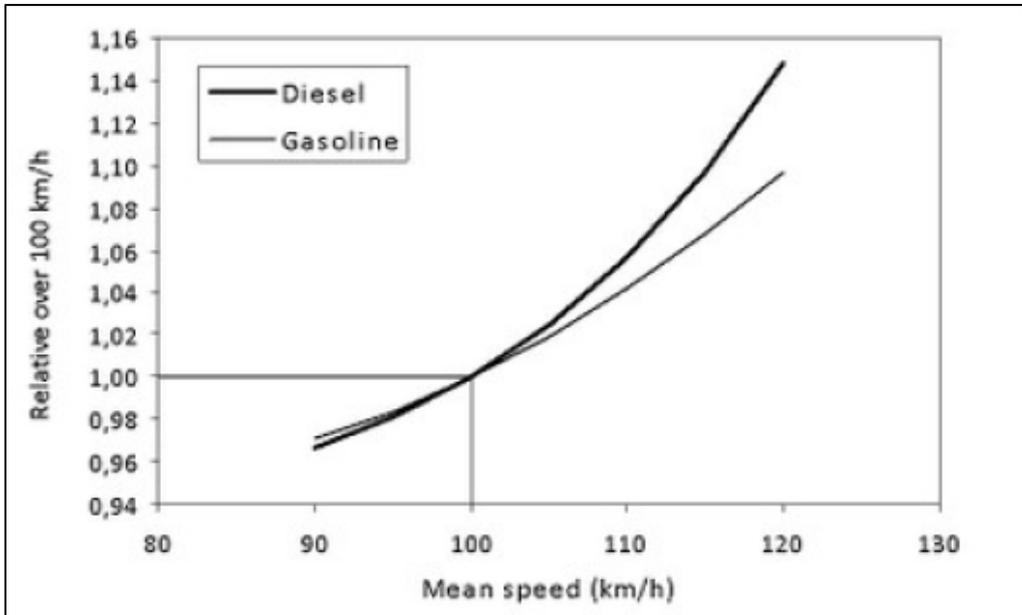
studio EMISIA⁷³ ha condotto delle simulazioni di tre diversi cicli di guida per capire l'influenza sulle emissioni ed i consumi della riduzione della velocità da 120 a 110 km/h.

- ARTEMIS 130: un tipico ciclo di guida in cui il limite consentito di velocità è di 120 km/h, che non viene completamente rispettato da tutti i veicoli (ci sono eccessi di velocità).
- Limite di velocità a 110 km/h: un ciclo di guida in cui tutte le autovetture rispettano i limiti assumendo un'andatura molto regolare. Ovviamente questa è una condizione che ha scarse possibilità di essere replicata nella realtà.
- ARTEMIS 120: valgono le stesse condizioni di ARTEMIS 130 con l'unica differenza del limite massimo di velocità che è inferiore di 10 km/h.

Le simulazioni mostrano come passando da ARTEMIS 130 al ciclo di guida con limite a 110 km/h il consumo di carburante scende del 12% per le macchine diesel e del 18% per quelle a benzina (Figura 4.2). Il confronto con ARTEMIS 120 mostra una riduzione del 23% dovuta alla minor velocità dei veicoli e quindi alla minor resistenza del vento che fa consumare meno carburante.

⁷³ Emisia è una società spin-off dell'Università Aristotele di Salonicco / Laboratorio di Termodinamica Applicata, la cui missione è: offrire servizi di ingegneria e consulenza unici, basati su solide basi scientifiche, test e simulazioni all'avanguardia per supportare l'industria e i responsabili politici nello sviluppo di tecnologie di trasporto pulite, sostenibili ed efficienti dal punto di vista dei costi.
<https://www.emisia.com/>

Figura 4.2 – Impatto della velocità di viaggio sul consumo di carburante (autovetture diesel e a benzina euro 4, capacità del motore 1,4 - 2 litri). Emissioni espresse in relazione ai loro valori a 100 km/h, per le quali è assegnato il valore "1".

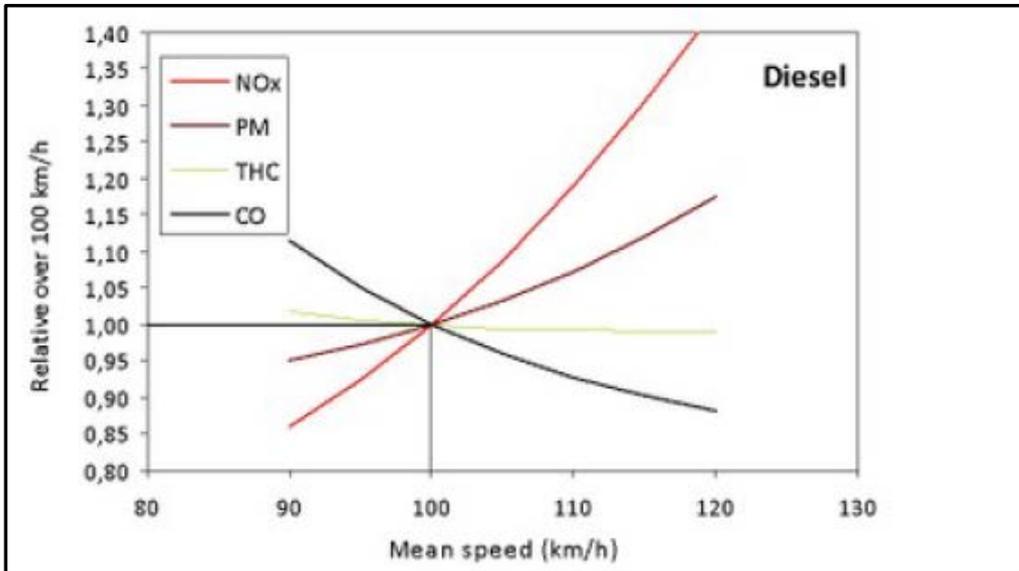


Fonte: EMISIA – ECC/ACM.

Gli effetti sulle emissioni dipendono fortemente dal tipo di alimentazione del veicolo e dal tipo di inquinante che si vuole considerare: generalmente le emissioni si riducono fatta eccezione per il CO nei veicoli diesel e per gli NO_x nei veicoli alimentati a benzina (Figure 4.3 e 4.4).

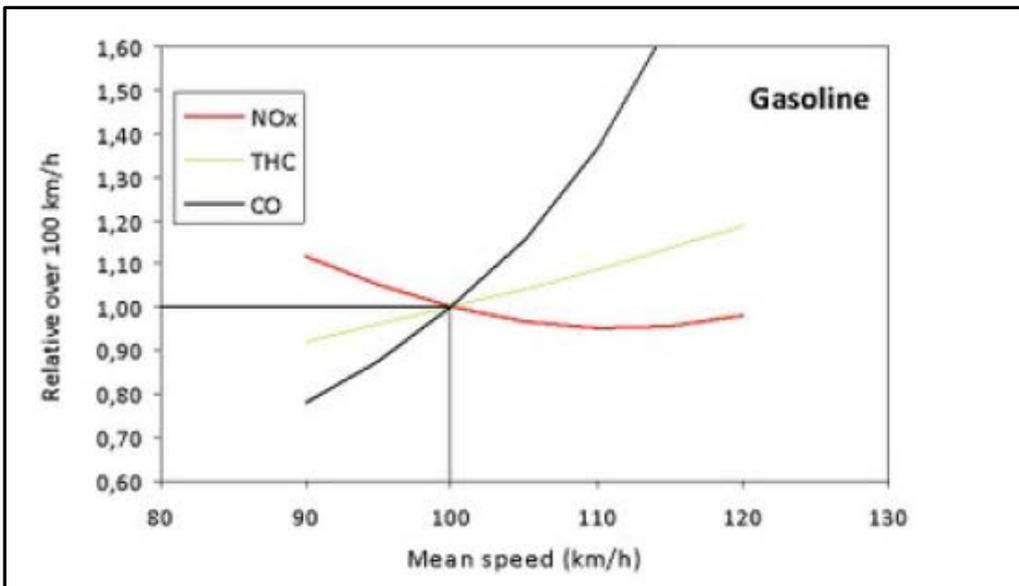
In conclusione, diminuire i limiti di velocità ha un significativo effetto benefico sia sulla riduzione dei consumi che delle emissioni di alcuni inquinanti. Tuttavia, non è ancora ben chiaro e definito il quadro emissivo che si delinea quando i limiti si fanno più stringenti all'interno delle aree urbane (per esempio da 50 a 30 km/h). In tal caso, sono certi i benefici in termini di sicurezza ma non altrettanto definiti gli eventuali benefici ambientali.

Figura 4.3 – Impatto della velocità di viaggio su vari inquinanti (autovetture diesel euro 4, capacità del motore 1,4 - 2 litri). Emissioni espresse in relazione ai loro valori a 100 km/h, per le quali è assegnato il valore "1".



Fonte: EMISIA – ECC/ACM.

Figura 4.4 – Impatto della velocità di viaggio su vari inquinanti (autovetture a benzina euro 4, capacità del motore 1,4 - 2 litri). Emissioni espresse in relazione ai loro valori a 100 km/h, per le quali è assegnato il valore "1".

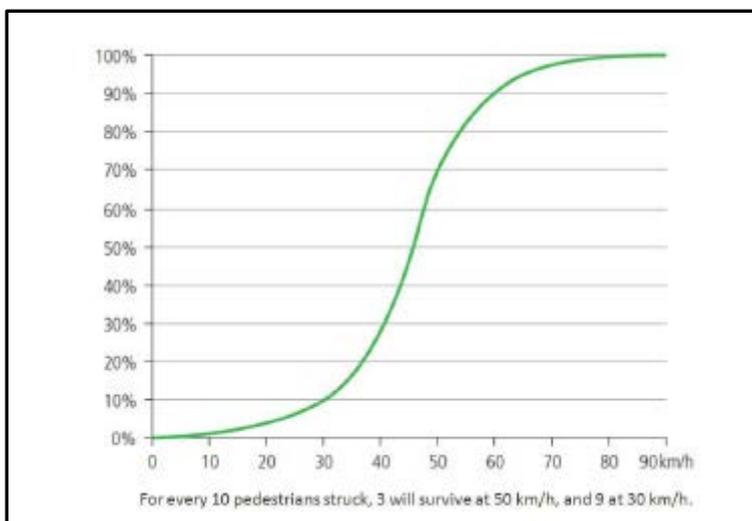


Fonte: EMISIA – ECC/ACM.

La pubblicazione di Bellefleur e Gagnon (2011) è una *review* di articoli in lingua inglese e francese sugli effetti dei sistemi di dissuasione del traffico sulla sicurezza stradale, la qualità dell'aria, l'inquinamento acustico e la mobilità dolce. Per ognuna di queste quattro categorie si riportano di seguito le conclusioni più importanti:

Per quanto riguarda gli effetti sulla sicurezza, è noto come all'aumentare della velocità dei veicoli, in caso di impatto con i pedoni, le possibilità di sopravvivenza diminuiscono notevolmente (Figura 4.5).

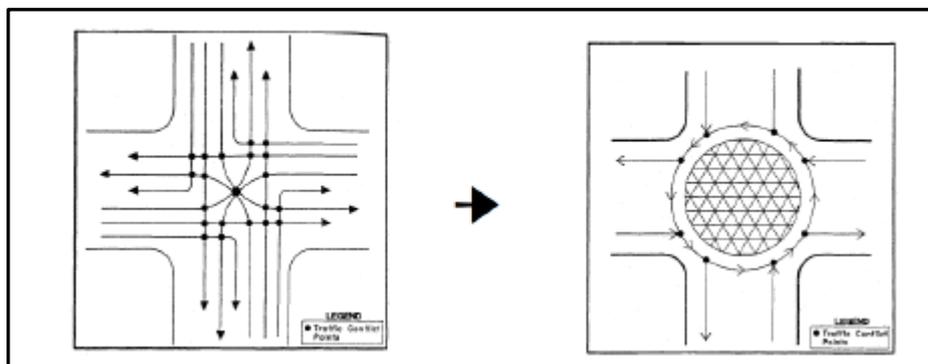
Figura 4.5 – Probabilità che un pedone muoia a causa di una collisione con un'auto in relazione alla velocità all'impatto.



Fonte: EMISIA – adattato dall'Ufficio per la prevenzione degli infortuni, 2008b.

Alcuni studi mostrano come la sostituzione di un incrocio con una rotonda riduce il numero di punti di "conflitto" fra automobile e pedone (Figura 4.6) o più in generale gli utenti deboli della strada.

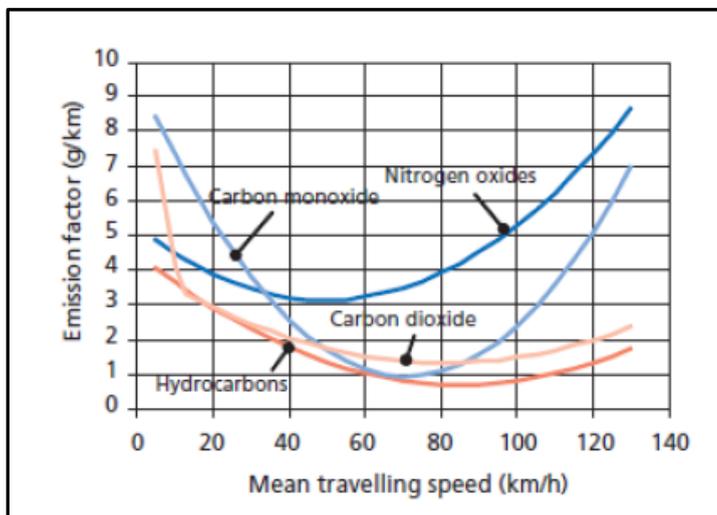
Figura 4.6 – Numero di punti di conflitto (punti neri sui diagrammi) in un'intersezione tradizionale e in una rotonda



Fonte: Stein, Kittelson, Newton, & Hottmann, 1992, p. 43 in Ewing, 1999, p. 111. © 1992 e 1999 Institute of Transportation Engineers, 1627 Eye Street, NW, Suite 600, Washington, DC 20006 USA, www.ite.org.

Il numero di articoli citati nella *review* diviene molto basso quando si cerca di correlare gli effetti dei dissuasori del traffico con le emissioni dei veicoli o con la qualità dell'aria. Anche le conclusioni sono molto discordanti. La maggior parte degli articoli citati riporta un aumento delle emissioni in corrispondenza dei sistemi normalmente adottati per la riduzione della velocità (dissuasori, rialzi della carreggiata, ecc.) fatta eccezione, secondo alcuni, per alcune mini-rotonde posizionate in contesti ben specifici. Generalmente la variazione del ciclo di guida per frenare davanti ad un ostacolo e per ripartire subito dopo causa un maggior consumo di combustibile e maggiori emissioni. Si riporta anche un grafico (Figura 4.7), tratto da una pubblicazione del 2005, in cui si evince la tipica curva ad U delle emissioni di alcuni inquinanti (NO_x , CO, CO_2 e HC) in funzione della velocità media di un veicolo.

Figura 4.7 – Effetto della velocità media di viaggio sui livelli di emissione delle autovetture con catalizzatori.



Nota: I valori per NO_x e HC sono stati moltiplicati per 10 e quelli per CO_2 sono stati divisi per 100.

Fonte: Adattato da Ntziachristos & Samaras, 2000, in WHO Regional Office for Europe, 2005, pag. 25. Copyright 2000, ristampato con il permesso di Elsevier.

Per quanto riguarda gli effetti sull'inquinamento acustico, generalmente gli interventi di dissuasione del traffico non vengono utilizzati come strumenti per ridurre questo tipo di inquinamento. Tuttavia, dai dati riportati nei vari articoli studiati nella *review* risulta una diminuzione dei livelli di inquinamento acustico dovuto alle auto ed un aumento dei livelli ai veicoli commerciali pesanti.

In merito agli effetti sulla mobilità dolce, i risultati desunti dall'analisi degli articoli consultati nella *review* non supportano la conclusione che gli interventi di "traffic calming" possano in qualche modo promuovere questa forma di mobilità.

Panis *et al.* (2011) hanno esaminato gli impatti ambientali delle politiche di gestione della velocità presentando i risultati di due diversi approcci: un approccio sofisticato di modellizzazione microscopica basato sui dettagli dei cicli di guida (modello VeTESS) e un approccio più tradizionale macroscopico basato sulla velocità media (modello COPERT).

La metodologia COPERT si basa su fattori di emissione a velocità media per stimare le emissioni su un livello macroscopico. COPERT utilizza funzioni che hanno prevalentemente una forma quadratica, per cui le stime delle emissioni tendono a essere molto più accurate a velocità molto basse e molto alte. Come già menzionato, la velocità tipica del traffico urbano è molto vicina o inferiore a quella che di solito viene considerata la velocità media minima per le quali le stime possono essere realizzate con questo modello.

I limiti del modello microscopico VeTESS sono l'evidente svantaggio che i dati necessari dei motori e dei veicoli sono disponibili solo per un numero limitato di veicoli. Per esempio, non vi sono dati sui filtri per il particolato dei diversi modelli. Va però evidenziato che i dati disponibili per i modelli sono relativi ai veicoli più popolari e possono rappresentare motorizzazioni simili dei veicoli di altre marche. Inoltre, sono rappresentativi delle future flotte di autovetture di molti Paesi europei.

Alcuni aspetti importanti non sono stati invece considerati: le partenze a freddo (importanti nel traffico urbano), le modifiche dei comportamenti dei guidatori per quanto riguarda accelerazioni e decelerazioni, le modifiche sullo stile di guida: tutti fattori che influenzano le emissioni di PM, prevalentemente in ambito urbano più che autostradale.

Tali modelli sono stati costruiti per stimare le emissioni in Europa sulle flotte di autovetture che hanno delle specifiche motorizzazioni e rispettano normative europee. Gli autori non garantiscono che i risultati possano essere gli stessi utilizzando i modelli in altre realtà (USA, Giappone) dove le motorizzazioni e le normative sono differenti.

L'impatto delle misure di velocità sulle emissioni dei veicoli viene valutato con entrambi i modelli in due diversi contesti (urbano e autostradale); entrambi i tipi di modelli hanno un certo svantaggio ma combinando i risultati di due modelli complementari è possibile ottenere una migliore comprensione del potenziale impatto delle diverse politiche di gestione della velocità sulle emissioni di gas di scarico.

I risultati per CO e HC differiscono notevolmente tra veicoli e cicli. I veicoli disponibili in VeTESS sono stati dotati di catalizzatori di ossidazione, con conseguenti emissioni di CO e HC estremamente basse (0,05 g/km). Per le emissioni di NO_x la riduzione della velocità tende a diminuire leggermente le emissioni nella maggior parte dei casi. I cambiamenti relativi variano tra il 25% e 5%. Le emissioni di PM non possono essere modellate con VeTESS per i veicoli a benzina. Entrambi i veicoli diesel hanno mostrato una diminuzione da moderata a grande delle emissioni di PM modellate in ciascuno dei cicli di guida.

Il confronto tra i risultati ottenuti con il modello VeTESS e quelli ottenuti con il modello COPERT/MEET mostra risultati simili, per la maggior parte delle combinazioni veicolo/ciclo. Non sorprende che, grazie alle sue funzioni quadratiche, la metodologia macroscopica porti a stime delle emissioni leggermente più elevate quando la velocità massima è ridotta. La piccola differenza può essere attribuita al fatto che la variazione della velocità media che ne risulta è piuttosto limitata, anche se il ciclo di guida derivato può sembrare molto diverso.

Relativamente al PM il modello VeTESS ha predetto moderate riduzioni riducendo i limiti di velocità, mentre il modello COPERT/MEET, ha predetto dei lievi incrementi. Riguardo la CO₂ i risultati dei due modelli sono comparabili. Per NO_x VeTESS mostra una riduzione per velocità inferiori a 30 km/h, rispetto ai 50 km/h, mentre COPERT ha predetto un leggero incremento.

Madireddy *et al.* (2011) nel loro studio esaminano gli effetti sulle emissioni di due misure di gestione del traffico quali: la riduzione dei limiti di velocità ed il coordinamento della segnaletica stradale, in una zona della città di Anversa in Belgio. A questo scopo, gli autori hanno costruito e convalidato un modello integrato che combina il modello di simulazione microscopica del traffico Paramics con il modello VERSIT+ per le emissioni di CO₂ e di NO_x.

L'area di studio è stata analizzata sulla base dei dati GIS (*Geographic Information System*) e delle fotografie aeree, che hanno fornito le posizioni dettagliate di tutte le strade e degli edifici nell'area di studio. Sono stati presi in considerazione due tipi di veicoli (leggeri e pesanti) e le rispettive classi di emissione. Durante la simulazione, la posizione, la velocità e l'accelerazione di ogni veicolo viene registrata ad ogni *step* temporale, per il successivo calcolo delle emissioni.

I conteggi del traffico, utilizzati per calibrare il modello, riflettevano la situazione durante l'ora di punta mattutina. Pertanto, i conteggi di traffico e le distribuzioni di velocità misurate in un singolo istante di tempo all'interno della regione considerata potrebbero discostarsi da quelli simulati. Solitamente si considerano solo le tendenze medie, ma per stimare le emissioni dei flussi di traffico vengono sempre più spesso applicati modelli di simulazione microscopica del traffico.

L'emissione istantanea di CO₂ e NO_x di ogni veicolo nella simulazione è stata calcolata in base alle velocità e alle accelerazioni ottenute utilizzando il modello di emissione dei gas di scarico VERSIT+⁷⁴. Quest'ultimo utilizza tecniche di regressione multivariata per fattori di emissione per diverse classi di veicoli. Poiché il modello richiede come input i dati effettivi del ciclo di guida, esso è in grado di contabilizzare pienamente gli effetti della congestione del traffico sulle emissioni. I parametri di emissione di differenti veicoli (età del veicolo, tipo di carburante, ecc.) sono stati aggregati in un modello prototipale atto a rappresentare le emissioni medie del parco veicolare olandese nel 2009. In questo documento sono state considerate solo le emissioni di sostanze inquinanti, mentre la loro dispersione in atmosfera non è stata modellizzata.

Il modello di emissione è stato utilizzato per stimare le emissioni di CO₂ e NO_x sulla base delle velocità e delle accelerazioni misurate. Successivamente, sono state confrontate sia le serie temporali delle emissioni misurate che quelle stimate.

Gli autori hanno studiato l'effetto di una riduzione del limite di velocità. Prendendo in considerazione le possibili misure attualmente in esame da parte dell'autorità di pianificazione del traffico della città di Anversa, i limiti di velocità sono stati ridotti da 100 a 70 km/h in autostrada, da 70 a 50 km/h su strade a scorrimento veloce (*Singel*) e da 50 a 30 km/h su strade residenziali (N184). Dai risultati si nota che, accanto ad una riduzione delle velocità medie, il *range* dei valori di distribuzione delle velocità si riduce e registra

⁷⁴ Il modello VERSIT+ si basa su oltre 12.500 misurazioni su veicoli di una vasta gamma di marche e modelli di autovetture, tipi di carburante, classe euro, tecnologia di iniezione del carburante, tipi di trasmissione ecc.

una riduzione degli eventi di massima accelerazione. Quindi, si evince che la riduzione del limite di velocità ha portato a una maggiore fluidità del traffico nell'area residenziale.

La distanza totale percorsa da tutti i veicoli all'interno dell'area residenziale si è ridotta del 14,1% a causa delle modifiche dei percorsi del traffico. È stata registrata una riduzione totale di emissioni totali di CO₂ e NO_x rispettivamente del 26,8% e del 26,7%. Per i veicoli che hanno percorso la N184, i risultati sono stati simili. Sebbene la distanza totale percorsa da tutti i veicoli lungo la N184 sia stata ridotta solo leggermente dello 0,2%, è stata comunque riscontrata una riduzione delle emissioni di CO₂ e di NO_x rispettivamente del 9,9% e del 10,4%.

La seconda misura di gestione del traffico è stata la sincronizzazione dei semafori lungo la N184, che ha determinato una riduzione delle emissioni di inquinanti atmosferici grazie ad una maggiore fluidità del traffico.

I risultati mostrano riduzioni delle emissioni di CO₂ e di NO_x, dell'ordine del 25%, per effetto della riduzione dei limiti di velocità da 50 a 30 km/h nelle aree residenziali, oltre ad una maggiore sicurezza stradale conseguente a velocità di percorrenza più basse. Il presente studio conclude, inoltre, che si potrebbe avere una riduzione dell'ordine del 10% delle emissioni di CO₂ e NO_x con l'implementazione della sincronizzazione dei semafori ("onda verde"). Tuttavia, va notato che il coordinamento dei semafori diminuisce anche i tempi di percorrenza, cosicché tale misura introdotta con l'obiettivo di fluidificare il flusso del traffico potrebbe, a lungo termine, indurre un ulteriore traffico. Questo effetto collaterale potrebbe inficiare i benefici ambientali della sincronizzazione della segnaletica dei semafori, o addirittura peggiorare la situazione.

Casanova e Fonseca (2012) hanno effettuato un *test* del traffico reale per valutare le emissioni inquinanti ed il consumo di carburante a seguito della riduzione del limite di velocità da 50 km/h a 30 km/h su strade ad una sola corsia, in aree residenziali nel centro di Madrid.

La velocità, l'accelerazione e la pendenza della strada sono fattori che influenzano in modo significativo il risparmio di carburante e le emissioni inquinanti di un veicolo durante la sua percorrenza in città. La potenza utilizzata, la condizione transitoria e la velocità di rotazione del motore ad ogni istante determinano il consumo istantaneo di carburante e le emissioni di inquinanti. La quantità totale di inquinanti emessi ed il carburante consumato non solo dipendono dalla velocità media e dall'accelerazione, ma anche dalle condizioni istantanee di funzionamento del motore, che sono correlate allo stile di guida. Riducendo la velocità massima in alcune strade urbane, si desume anche una riduzione della velocità media e delle accelerazioni. Ma quando la velocità del motore è molto bassa, il motore è meno efficiente e potrebbe causare maggiori emissioni.

Le correlazioni tra il consumo di carburante e la velocità media mostrano un aumento sia delle emissioni che dei fattori di consumo di carburante quando, in aree urbane, la velocità media si riduce al di sotto dei 40 km/h.

Sono state effettuate misure di traffico reale su strade strette di un tipico quartiere centrale di Madrid, per valutare l'influenza della riduzione del limite di velocità da 50 a 30 km/h sulle emissioni e sul consumo di carburante.

Velocità inferiori implicano tempi di percorrenza più lunghi e spostamenti con il motore acceso, con un conseguente aumento delle emissioni di inquinanti e dei consumi di carburante. D'altra parte, velocità inferiori modificano di poco la velocità media ma riducono maggiormente l'accelerazione e la decelerazione, principali responsabili di elevati consumi di carburante e di emissioni di sostanze inquinanti.

Sono stati misurati simultaneamente le emissioni ed il consumo di carburante in condizioni di traffico reali, di un veicolo *diesel* leggero, rappresentativo delle comuni autovetture di medie dimensioni in Europa, mediante un dispositivo portatile per la misurazione delle emissioni⁷⁵.

Lo stile di guida influisce molto sulle emissioni inquinanti e sul risparmio di carburante nella guida urbana. Il modo in cui viene utilizzato il cambio e il modo in cui viene premuto il pedale dell'acceleratore sono i principali parametri che il conducente può modificare nel suo stile di guida.

Nello studio sono stati presi in esame tre stili di guida riferiti ad un conducente esperto:

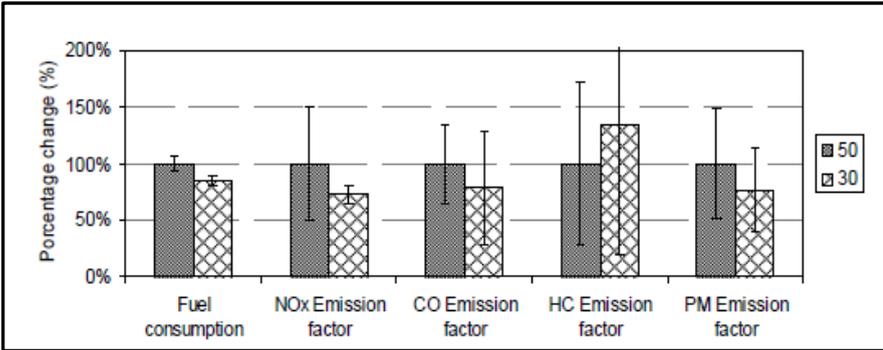
- aggressivo: con alti valori di accelerazione e decelerazione, ma senza superare la velocità massima;
- normale: il conducente segue i veicoli circostanti, mantenendo la normale fluidità accelerazioni e decelerazioni in frenata;
- *ecodriving*: stile di guida che rispetta le raccomandazioni del New Driving Style promosso dal Consorzio *EcoDriving* ed è basato sull'anticipazione, sulla velocità regolare, su accelerazioni fluide e sul cambio di marcia a bassa velocità del motore.

Le emissioni di ossidi di azoto, monossido di carbonio e particolato si riducono quando il limite di velocità è ridotto a 30 km/h, ma le emissioni di idrocarburi aumentano (Figura 4.8). L'aumento dell'HC medio non ha alcuna rilevanza statistica a causa dell'elevata variabilità osservata. Tuttavia, questa variabilità può essere spiegata dal fatto che queste emissioni si formano in funzionamento transitorio, condizioni che dipendono da diverse condizioni istantanee del motore (temperatura dei gas di scarico, ossidazione, temperatura del catalizzatore, rapporto carburante/aria, condizioni del turbocompressore, ecc.) che

⁷⁵ Sistema portatile di misura delle emissioni (PEMS): MIVECO-PEMS 2.0.

dipendono anche dal carico e dalla velocità del motore, così come dal tempo trascorso con l'auto ferma (raffreddamento del catalizzatore).

Figura 4.8 – Modifica delle emissioni e del consumo di carburante nel percorso urbano studiato quando il limite di velocità è ridotto a 30 km h⁻¹.

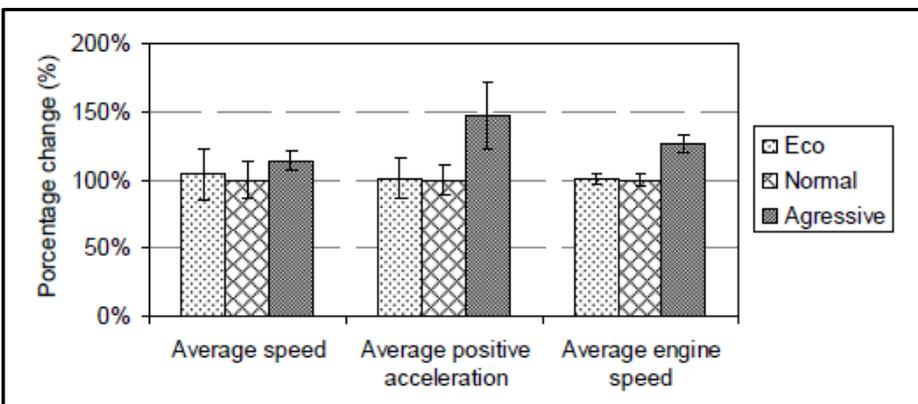


Fonte: Casanova e Fonseca, 2012.

La riduzione delle emissioni di NO_x, quando il limite di velocità viene ridotto, è legata al rapporto carburante/aria. La riduzione del fattore di emissione di CO è dovuta all'aumento della temperatura media del catalizzatore, che ne migliora le prestazioni di ossidazione.

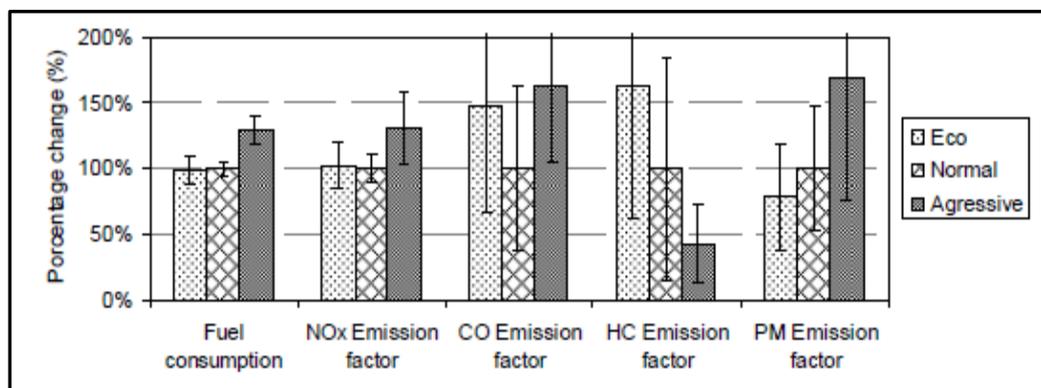
Lo stile di guida (*ecodriving*, aggressivo e normale) influenza il consumo di carburante e le emissioni inquinanti (NO_x, CO, HC e PM) come riportato in Figura 4.9 e Figura 4.10. Le emissioni di NO_x seguono le tendenze riscontrate nel comportamento dell'auto e del motore, ma altre emissioni seguono diverse tendenze: le emissioni di CO e HC sono più elevate in condizioni di *ecodriving* a causa del funzionamento del catalizzatore di ossidazioni a temperature inferiori (è stata misurata una riduzione di circa il 10% della temperatura media dei gas di scarico).

Figura 4.9. – Variazione percentuale della velocità media, dell'accelerazione positiva e del regime del motore durante i 30 km h⁻¹ del percorso con tre stili di guida.



Fonte: Casanova e Fonseca, 2012.

Figura 4.10 – Variazione percentuale del consumo di carburante e del fattore di emissione durante i tratti di 30 km h⁻¹ del percorso con tre stili di guida.



Fonte: Casanova e Fonseca, 2012.

Le maggiori emissioni di CO, rilevate con uno stile di guida aggressivo sono dovute a rapporti carburante/aria più elevati nei periodi di accelerazione transitoria, mentre le minori emissioni di HC sono conseguenti a temperature più elevate del catalizzatore di ossidazione.

Le emissioni di PM dipendono principalmente dal carico del motore e quindi dalla tendenza ad aumentare man mano che aumenta l'aggressività dello stile di guida. L'elevata deviazione standard delle emissioni di CO, HC e PM è probabilmente dovuta alle condizioni operative transitorie del turbocompressore.

In conclusione, con uno stile di guida normale del conducente, i risultati mostrano che riducendo il limite di velocità da 50 km/h a 30 km/h, il tempo impiegato per un determinato viaggio non aumenta, ma il consumo di carburante e le emissioni di NO_x, CO e PM si riducono. Lo stile di guida influisce sui risultati, che, a loro volta, influenzano i fattori di consumo di carburante così come i fattori di emissione. Pertanto, la conclusione principale di questo lavoro è che la riduzione del limite di velocità in alcuni contesti urbani residenziali e commerciali non solo aumenta la sicurezza dei pedoni, ma contribuisce anche a ridurre l'impatto ambientale dei veicoli a motore e ridurre il consumo di carburante. Inoltre, si riscontra anche una riduzione delle emissioni di gas serra derivanti dalla combustione del combustibile.

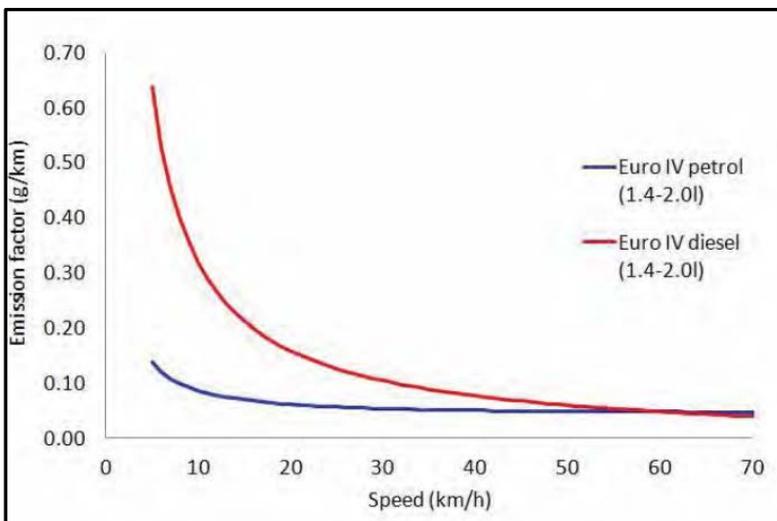
Al fine di valutare l'impatto di diversi metodi di controllo della velocità, un confronto è stato eseguito, da Williams e North (2013), fra segmenti di assi viari di Londra con particolari caratteristiche. In particolare, sono stati scelti 10 segmenti in cui sono presenti limiti alla velocità di 20 e 30 miglia orarie. Gli obiettivi dello studio sono capire:

1. le differenze fra gli stili di guida a 20 e 30 miglia orarie;
2. l'impatto dei limiti sulle emissioni di NO_x, PM10 e CO₂;

3. l'impatto sulle emissioni di diversi sistemi di *traffic calming*;
4. l'impatto sulle emissioni dall'usura dei freni e degli pneumatici.

Un metodo standard per la valutazione delle emissioni è l'utilizzo di modelli che prendono in considerazione la velocità media dei veicoli distinti per tipologia, alimentazione e velocità media. Inserendo altre informazioni sui livelli di traffico e la composizione della flotta, si ricavano dati sulle emissioni da traffico su strada. Un esempio dei risultati ottenuti è riportato nella Figura 4.11. Considerando le numerose fasi di accelerazione e decelerazione in presenza di dissuasori del traffico, gli autori concludono che tale tipo di metodologia non è adatta per lo scopo di questo studio.

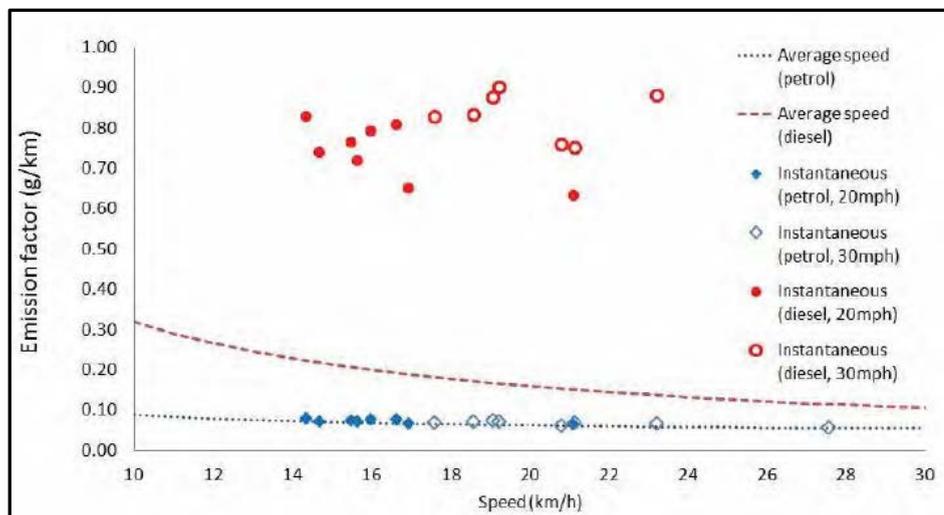
Figura 4.11 – Curva di emissione del veicolo per NO_x.



Fonte: Williams e North, 2013.

Gli autori, pertanto, si affidano a metodologie per il calcolo istantaneo della velocità che porta a scenari emissivi ben diversi da quelli ottenuti con modelli che si basano su velocità costanti come riportato in Figura 4.12.

Figura 4.12 – Confronto tra metodi di velocità istantanea e media per la stima dei tassi di emissione di NO_x.



Fonte: Williams e North, 2013.

Nella sezione 4 le conclusioni indicano che i cicli di guida a 20 e 30 miglia orarie sono diversi; tale diversità non sembra dipendere dal particolare momento della giornata o giorno della settimana in cui sono stati registrati i dati quanto piuttosto dalle caratteristiche del sito specifico in cui sono effettuate le misure. In particolare, le strade residenziali con limiti a 30 miglia orarie sono quelle in cui la velocità non supera le 20 miglia orarie così come nelle strade non residenziali ma molto trafficate.

La sezione 5 riporta gli effetti di una zona con limite a 20 miglia orarie che risultano essere positivi per le auto diesel per le emissioni di NO_x, PM10 e CO₂ mentre per le auto alimentate a benzina si hanno benefici solo per il PM10 (Figura 4.13). Gli autori specificano che l'analisi non tiene conto degli effetti dovuti alla congestione del traffico.

Figura 4.13. Tassi di emissione stimati - veicoli a benzina e diesel.

Vehicle type	Drive cycle speed limit	NO _x (g/km)	PM ₁₀ (g/km)	CO ₂ (g/km)
PETROL 1.4 – 2.0 litre, EURO IV	20	0.0726	0.00218	271.95
PETROL 1.4 – 2.0 litre, EURO IV	30	0.0673	0.00237	266.35
<i>Impact of 20mph drive cycle</i>		+7.9%	-8.3%	+2.1%
DIESEL 1.4 – 2.0 litre, EURO IV	20	0.7437	0.01758	201.58
DIESEL 1.4 – 2.0 litre, EURO IV	30	0.8104	0.01917	203.48
<i>Impact of 20mph drive cycle</i>		-8.2%	-8.3%	-0.9%

Fonte: Williams e North, 2013.

Nelle conclusioni della sezione 6 si afferma che le strade in cui il flusso di traffico viene interrotto le emissioni tendono ad aumentare. Ciò non è dovuto esclusivamente ai dissuasori della velocità, in particolar modo i rialzi del piano stradale, ma anche alla presenza di incroci e attraversamenti pedonali. Nella sezione 7, brevemente, si conclude che le velocità più ridotte riducono le emissioni che derivano dall'usura delle gomme e dei freni.

Nel lavoro di Pérez-Sansalvador *et al.* (2020) viene adottato un modello di misura istantanea del traffico al fine di stimare gli effetti dei dissuasori di velocità su una corsia stradale sulle emissioni di CO₂, NO_x, VOC e PM. In particolare, è stata adottata una versione modificata del modello "NaSch" in cui non vengono considerati alcuni fattori, come la presenza di semafori, attraversamenti pedonali e incroci. Il modello calcola la velocità istantanea di ogni veicolo considerando la distanza che lo separa dal veicolo che ha di fronte e la distanza dai dissuasori di velocità presenti sulla strada. La velocità minima si registra in corrispondenza dei dissuasori o quando il veicolo davanti è molto vicino.

Il modello già utilizzato da Panis *et al.* (2006 (a)) viene invece sfruttato per descrivere le emissioni istantanee dei vari inquinanti in funzione del tipo di veicolo, della sua velocità e dell'accelerazione. Panis ha costruito il suo modello applicando una regressione multipla non lineare ad un vasto set di misurazioni multiple generate da 25 veicoli in circolazione su strade urbane e con standard emissivi euro1, euro2 e euro3. I veicoli includevano 17 automobili (12 alimentate a benzina e 5 a gasolio), 6 autobus e due camion.

I risultati del lavoro hanno mostrato che i dissuasori di velocità favoriscono in modo significativo le emissioni di inquinanti in atmosfera quando il numero di veicoli per corsia è basso. Queste ipotesi sono in accordo con quanto più volte riportato in letteratura anche se i risultati spesso sono molto diversi da caso a caso, a seconda delle condizioni del tempo, il momento della giornata in cui sono state eseguite le misure, il numero e la tipologia di veicoli utilizzati per le misure.

In particolare, quando la probabilità di frenata (P) è pari a 0,1 e la densità (ρ) di veicoli per strada compresa nell'intervallo $0 < \rho \leq 0,48$, c'è una influenza medio forte che i dissuasori di velocità incrementano le emissioni. Il picco emissivo per CO₂, NO_x e PM viene raggiunto quando $0,12 < \rho \leq 0,48$ e la velocità media è circa di 20 km/h. In aggiunta, gli autori riportano che una strada con una bassa densità di veicoli e pochi dissuasori di velocità può produrre più inquinanti di una strada con maggior densità di veicoli. Per quanto concerne le emissioni di COV, gli esperimenti mostrano poca correlazione fra la presenza di dissuasori sia per basse che per alte densità di veicoli su strada.

Nel 2018 la ATKINS Ltd ha pubblicato una *review* commissionata dal Dipartimento dei Trasporti inglese con lo scopo di fornire una migliore comprensione delle prove disponibili sui limiti di velocità di 30 (20 mph), mirando a valutare l'efficacia dei limiti di velocità in termini di risultati e impatti, esaminare le percezioni e gli atteggiamenti dei diversi gruppi

di utenti nei confronti dei limiti di velocità e valutare i processi e i fattori che contribuiscono all'efficacia degli schemi di limiti di velocità.

La *review* ha analizzato la letteratura scientifica dal 2009 al 2014. Sono state selezionate ed esaminate 134 pubblicazioni la maggior parte delle quali relative a studi svolti nel Regno Unito e in Europa. Lo studio è suddiviso in sezioni che sintetizzano prima di tutto i risultati generali relativi all'introduzione dei limiti di velocità di 30 km/h, per poi porre attenzione sui risultati specifici, tra cui la riduzione della velocità, gli incidenti, i benefici ambientali e sanitari.

In letteratura non è chiaro l'utilizzo dei termini limiti di velocità di 30 km/h⁷⁶ e di zona 30⁷⁷, e la maggior parte delle ricerche usa "zone" e "limiti di velocità" come termine generale senza distinzione. In questo studio si differenziano quattro fondamentali schemi: le zone 30, i limiti di velocità di 30 km/h, le zone ibride (che combinano limiti di velocità di 30 km/h con zone di 30) e gli spazi condivisi (pensati come approcci di progettazione urbana che cercano di ridurre al minimo le demarcazioni tra il traffico veicolare e i pedoni, spesso rimuovendo elementi come i cordoli, la segnaletica orizzontale, i segnali stradali e i regolamenti).

In generale dagli studi esaminati sembra dimostrato che le zone 30 possono portare a riduzioni significative della velocità media e al numero delle collisioni. L'evidenza presenta riduzioni delle vittime che vanno dal 20% al 45% sulle strade con zone 30, anche se alcuni studi non sono stati in grado di dimostrare un cambiamento statisticamente significativo a causa dei piccoli numeri. Come conseguenze indesiderate invece si segnalano i ritardi nei tempi di viaggio e un aumento delle emissioni.

Per quanto concerne i benefici ambientali, i risultati per le zone a 20 miglia orarie sono diversi e contraddittori: per alcuni non hanno portato a nessun cambiamento nelle emissioni, per altri hanno registrato un aumento o una diminuzione. Lo studio giunge alle seguenti conclusioni generali: poiché esistono pochi dati e informazioni sull'effetto che i limiti e le zone 30 hanno sulle emissioni, è importante che nelle valutazioni future in cui questi dati siano disponibili, essi vengano raccolti e analizzati. L'evidenza suggerisce che i cambiamenti nelle emissioni di scarico sono difficili da misurare. Infine, si sottolinea come sia importante che i metodi di raccolta dei dati siano continuamente migliorati.

Nell'anno successivo (2019), in Irlanda, Cleland *et al.* hanno pubblicato una *review* utilizzando un approccio meta-narrativo che ha permesso di rivedere il tema delle "zone" e dei "limiti" 30 e di riassumere i risultati in modo significativo. La revisione ha implementato i sei principi guida del metodo meta-narrativo: pragmatismo (guidato dalle

⁷⁶ Per definizione, gli schemi di limitazione della velocità a 30 km/h si verificano quando il limite di velocità è stato ridotto senza l'attuazione di alcuna misura fisica per ridurre la velocità dei veicoli. Gli automobilisti sono avvisati della riduzione del limite di velocità con una serie di cartelli che riportano il limite.

⁷⁷ Le zone 30 sono zone in cui la velocità del traffico è limitata in combinazione con misure di ingegneria stradale per rallentare fisicamente il traffico.

informazioni più utili per il pubblico previsto); pluralismo (l'argomento esaminato per considerare più prospettive e punti di vista); storicità (l'argomento esaminato nel tempo); contestazione (dati contrastanti considerati); riflessività (prendere tempo per riflettere sui risultati, individualmente e come un *team* di revisione); e *peer review* (risultati mostrati a un pubblico indipendente e il *feedback* utilizzato per guidare ulteriore riflessione). La *review* prende in considerazione gli effetti delle zone e dei limiti di 30 km/h sulla salute in senso lato. Sono riportati solo i risultati relativi sulle emissioni, che come già dimostrato dallo studio inglese presentato sopra dimostra che non ci sono relazioni univoche e concordanti tra queste tipologie di interventi e le emissioni di inquinanti.

Infatti, se questa rassegna ha rilevato che le "zone 30" sembrano essere efficaci, in particolare nel ridurre il numero e la gravità delle collisioni e delle vittime, non fornisce tuttavia prove sufficienti per trarre conclusioni solide sul loro effetto su vivibilità, qualità dell'aria e disuguaglianze, né sull'effetto dei limiti di velocità su questi aspetti di salute pubblica.

In pratica, l'attuazione di zone 30 sembrerebbe essere promettente, anche se sulla base di questa recensione può essere limitato a città nei Paesi a reddito più elevato. Questa rassegna evidenzia infine la necessità di valutazioni controllate di alta qualità, per fornire risultati più solidi, e di avere dati riportati in modo trasparente, così da permetterne l'estrazione, il confronto e il raggruppamento dei risultati di studi simili. Inoltre, permetterebbe ai ricercatori di determinare le componenti specifiche efficaci e inefficaci di entrambi gli interventi "zona" e "limite" di 30 km/h.

Nel 2021 Renaud pubblica per Cerema, il Centro Studi francese su Rischi, Ambiente, Mobilità e Urbanistica, uno studio in cui si evince che con l'adozione delle zone 30 se si riscontra una riduzione di numero e gravità degli incidenti in tutte le città che le hanno introdotte, e di emissioni di rumore, non è invece evidente l'effetto positivo sulle emissioni di inquinanti atmosferici.

In questo documento è utilizzata la metodologia COPERT 5 e i relativi fattori di emissione e i dati sul parco veicoli francese, così come le proiezioni sull'evoluzione del parco veicoli entro il 2050. Cerema ha anche sviluppato un software, CopCerema, che viene utilizzato per gli studi d'impatto e che permette di calcolare le emissioni del trasporto su strada.

I principali elementi che contribuiscono ai fattori di emissione sono:

- il tipo di veicolo (privato, commerciale, pesante),
- la tipologia di motore (carburante: benzina, diesel, LNG, ibrido, ecc.) e capacità cubica: piccola, media, grande o GVW per i veicoli pesanti),
- la data di immatricolazione (che determina la sua età e quindi la sua usura),
- la velocità media del veicolo,

-
- la pendenza della strada,
 - il carico trasportato (solo per i veicoli pesanti).

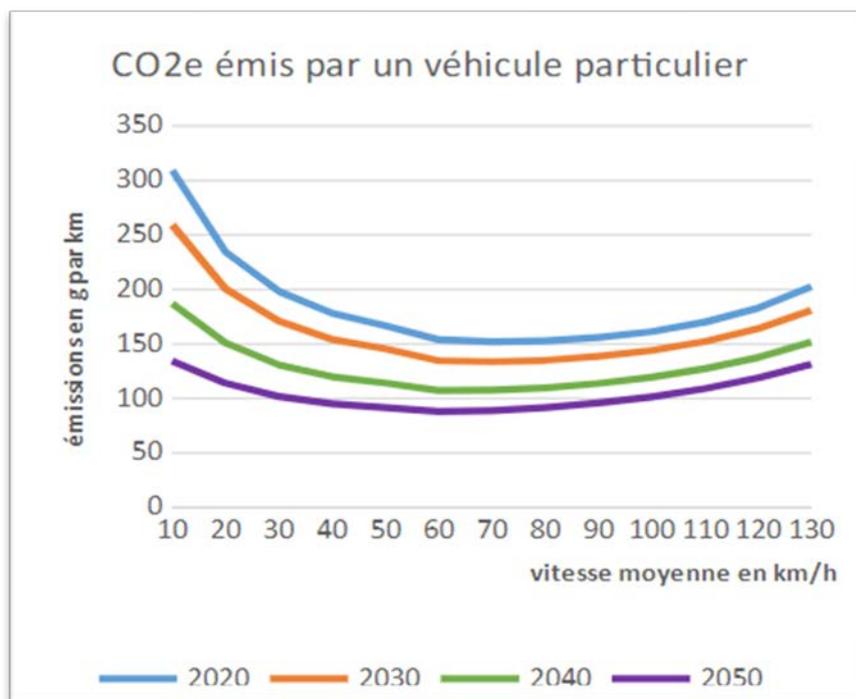
Un fattore di emissione, applicato per ogni categoria di veicolo nella flotta ed espresso in grammi di inquinante per chilometro (g/km), designa la quantità di inquinante emessa da un veicolo su una distanza di un chilometro.

Gli inquinanti considerati nel rapporto sono: gas serra (biossido di carbonio, metano e protossido di azoto), inquinanti atmosferici (biossido di azoto) e particelle fini. Questo documento fornisce nuove curve di emissioni inquinanti e di gas serra in grammi per chilometro percorso in funzione della velocità media di un veicolo.

Per un'autovettura, le emissioni di NO_x, PM10 e GHG sono minime per velocità vicine ai 70 km/h, mentre per un veicolo commerciale (<3,5 t), sono minime a circa 60 km/h. La curva caratteristica a "U" delle emissioni in funzione della velocità mostra anche che nel 2020, le emissioni massime, pari a fino a due volte il valore minimo, sono a 130 km/h, e che le emissioni a basse velocità (da 10 a 20 km/h) sono più o meno equivalenti a quelle prodotte ad alte velocità (da 100 a 110 km/h) (Figura 4.14).

Tuttavia, per NO_x e PM10, a causa di un miglioramento del parco veicoli, si osserva un progressivo appiattimento della curva a U nel corso degli anni, fino ad ottenere per la proiezione del parco veicoli nel 2050 un valore minimo per NO_x che è 4 volte inferiore al minimo del 2020.

Figura 4.14. Curva delle emissioni in funzione della velocità.



Fonte: Renaud, 2021.

I risultati del rapporto dimostrano che il legame tra emissioni e concentrazioni di inquinanti non è lineare; le curve delle emissioni sono un elemento utile ma non sufficiente per valutare gli effetti delle misure di limitazione della velocità sulla qualità dell'aria. Viene sottolineato poi l'impatto della politica di riduzione della velocità sulla salute, in quanto questi provvedimenti, limitando le fasi di accelerazione, diminuiscono le emissioni di rumore, favoriscono un trasferimento modale di viaggi a breve distanze dalle auto a modalità alternative (quali camminare, andare in bicicletta o utilizzare il trasporto pubblico), diminuiscono il tasso di incidenti (in particolare, il rischio di morte è sei volte più alto a 50 km/h che a 30 km/h in caso di collisione) e contribuiscono a migliorare la qualità della vita in città in quanto gli spazi pubblici dovrebbero essere più tranquilli, meno rumorosi e meno congestionati dalla presenza di automobili.

In controtendenza, un recente rapporto tedesco (Dipartimento del Senato per l'ambiente, i trasporti e la protezione del clima, 2021) dove si dimostra la riduzione delle emissioni di NO_x come conseguenza della limitazione della velocità a 30 km/h, riapre il dibattito sugli impatti ambientali di questo intervento, considerando anche quanto è diffusa la sua applicazione nelle città europee.

Gli autori partono dai dati già raccolti negli anni 2003-2008 a Berlino, dati che dimostrano come prendendo in considerazione sia la meteorologia sia i volumi di traffico, le

concentrazioni di inquinanti causate da 30 km/h rispetto a 50 km/h si riducono per NO₂ di 6-12 µg/m in un periodo di tre anni, di 2 microgrammi per metro cubo per PM10 e per fuliggine legata al traffico (carbonio elementare – EC) da 0,8 a 0,3 µg/m³.

La conclusione è che le zone 30 km/h sono una misura efficace per migliorare la qualità dell'aria solo a condizione che sia mantenuta costante o migliorata la qualità del flusso di traffico.

A questo però si è aggiunto il fattore positivo apportato dai processi di avviamento che abbreviandosi, emettono meno emissioni. Inoltre, a basse velocità diminuiscono sia le forze di attrito e di turbolenza legate agli pneumatici e al manto stradale.

A Berlino si sono susseguiti studi e un progetto pilota nel 2017, che ha coinvolto la mobilità cittadina, proprio per misurare gli effetti delle zone 30 sul traffico urbano. Importante ricordare gli interventi preparatori relativi ai semafori per adattare le onde verdi sui percorsi selezionati alle nuove velocità di progressione. Questo progetto ha analizzato la situazione del traffico prima e dopo l'introduzione delle zone 30 km/h e i cambiamenti nei dati del traffico, quali:

- l'intensificazione del traffico per itinerario e direzione di marcia;
- lo sviluppo delle velocità di guida;
- le variazioni delle velocità locali dei veicoli nelle sezioni trasversali di misurazione;
- i cambiamenti nelle velocità di viaggio legate al percorso per direzione di marcia;
- lo sviluppo temporale delle velocità di viaggio per direzione di marcia;
- lo spostamento del traffico per direzione di marcia;
- gli effetti di lavori stradali e altri eventi sui risultati.

La base dei dati è costituita dai dati di traffico registrati localmente (numero e velocità dei veicoli) dalle stazioni di misurazione permanenti del tipo "Traffic Eye Universal (TEU)", nonché dalle valutazioni dei *Floating Car Data* (FCD) del *Traffic Information Centre* (VIZ) di Berlino. Il miglioramento del traffico è inteso come un miglioramento delle condizioni del traffico secondo l'*Handbook for Road Traffic Emission Factors* (HBEFA). L'HBEFA, versione 3.3, distingue tra le seguenti quattro condizioni di traffico:

- fluido;
- denso;
- saturo;
- *stop and go*.

Dall'analisi dei dati raccolti si è stabilito che per quattro strade su cinque, sono risultate riduzioni di NO₂ tra 2,2 e 3,8 µg/m³, che possono essere attribuite alla riduzione della velocità; per una strada, un aumento di 2,2 µg/m³ è stato calcolato dalla metodologia di valutazione. Inoltre, le influenze dello sviluppo del traffico, come la già temuta deviazione su altri percorsi o le influenze dei lavori stradali e degli eventi, portano a effetti trascurabili sul traffico. Tuttavia, il limite di 30 km/h riduce anche la velocità di viaggio di autobus e pullman e quindi ha un impatto negativo sui tempi di viaggio. I risultati del presente studio possono essere riassunti come segue:

- il limite di velocità di 30 km/h sulle strade principali può portare a un miglioramento dell'inquinamento da NO₂ fino a 4 µg/m³;
- riducendo la velocità media di viaggio, l'NO₂ può essere ridotto grazie all'accorciamento dei tempi di accelerazione che generano emissioni;
- l'influenza della stabilizzazione del flusso di traffico è inferiore a quella ipotizzata all'inizio della prova;
- non si sono potuti osservare spostamenti significativi del traffico su nessun tratto di strada a causa del limite di velocità.

L'introduzione del limite di 30 km/h non sempre porta a una riduzione dell'inquinamento da NO₂, come il caso di Berlino ha dimostrato. Se la velocità media di viaggio era già relativamente bassa e la qualità del traffico molto scarsa prima dell'introduzione del limite di velocità di 30 km/h, nessun cambiamento significativo nella velocità media di viaggio può essere ottenuto dalla riduzione di velocità. Per ridurre l'inquinamento da NO₂ bisognerebbe prima migliorare la fluidità del traffico. Le riduzioni di velocità limitate a livello locale potrebbero portare a un aumento delle emissioni nelle sezioni adiacenti a 50 km/h, dove la velocità viene aumentata di nuovo al livello superiore. Lo studio dimostra che, tenendo conto dei risultati di questa ricerca, il limite di 30 km/h è uno strumento efficace per la progettazione del traffico sostenibile.

4.3 Conclusioni

È improbabile che l'imposizione di rigidi limiti di velocità nelle aree urbane abbia una significativa influenza sulle emissioni di NO_x o CO₂. Per quanto riguarda l'impatto sulle emissioni di PM, i risultati del modello VeTESS indicano che lo scarico dei veicoli *diesel* può mostrare una diminuzione significativa, mentre le funzioni COPERT/MEET assumono un aumento moderato. L'effetto sulle emissioni di PM dovrebbe essere confermato da ulteriori ricerche, anche concentrandosi sull'impatto dell'accelerazione o del comportamento del cambio.

Tutti i risultati ottenuti per i mezzi pesanti indicano che la riduzione della velocità massima sulle autostrade comporterebbe minori emissioni di CO₂. I risultati relativi al PM sono incoerenti e incerti, le emissioni di PM dipendono principalmente dal carico del motore, e quindi dalla tendenza ad aumentare man mano che aumenta l'aggressività dello stile di guida.

È probabile che la velocità sia un fattore che influenza le emissioni, ma oggi non esistono funzioni che siano abbastanza precise da integrare la modellazione dei gas di scarico.

Per valutare le politiche di gestione della velocità non si può utilizzare solo l'approccio macroscopico. I risultati dei modelli per la stima della riduzione delle emissioni, in seguito alla riduzione dei limiti di velocità in ambito urbano, vanno analizzati e interpretati con cautela. I limiti di velocità vanno considerati prevalentemente da una prospettiva di sicurezza, l'impatto sull'ambiente non deve essere un fattore decisivo nella scelta di implementare o meno i limiti di velocità.

4.4 Tabella riepilogativa zone 30 e *traffic calming*

Autori	Metodologia	Possibili benefici conseguiti
Panis <i>et al.</i> (2006) a	Le emissioni da traffico causate dall'accelerazione e dalla decelerazione dei veicoli sono stimate sulla base di un modello di emissione istantanea integrato con un modello microscopico di simulazione del traffico (DRACULA).	Lo studio suggerisce che l'analisi degli impatti ambientali del traffico e le relative politiche di gestione e controllo costituiscono una questione complessa e richiedono un'analisi dettagliata non solo del loro impatto sulle velocità medie ma anche su altri aspetti del funzionamento del veicolo, come l'accelerazione e la decelerazione.
Panis <i>et al.</i> (2006) b	Le emissioni per alcune tipologie di auto moderne sono state stimate con il software VeTESS (<i>Vehicle Transient Emissions Simulation Software</i>) utilizzando cicli di guida urbani reali. Gli autori hanno confrontato i risultati con cicli di guida modificati artificialmente, limitando la velocità massima a 30 km/h ove opportuno, senza modificare l'accelerazione o la decelerazione.	<p>La modellazione delle emissioni e i risultati dimostrano che la stima delle emissioni, anche di inquinanti classici, è un'impresa complessa. I risultati per CO e HC differiscono notevolmente tra veicoli e cicli di guida. Poiché le emissioni di questi inquinanti sono molto basse nelle auto moderne, esse non sono modellizzate con sufficiente precisione e le loro stime sono poco attendibili.</p> <p>Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ e quindi il consumo di carburante, il cambiamento del ciclo di guida ha avuto un impatto limitato, sia positivo che negativo, sulle emissioni.</p> <p>Per le emissioni di NO_x i risultati indicano una riduzione delle emissioni da moderata a importante.</p> <p>I risultati di VeTESS per inquinanti come il PM dai motori diesel mostrano una diminuzione significativa, mentre le emissioni di PM per i veicoli a benzina non possono essere modellizzati con VeTESS. Utilizzando invece le funzioni di COPERT/MEET i risultati indicano un aumento moderato di PM.</p>

Autori	Metodologia	Possibili benefici conseguiti
Panis <i>et al.</i> (2007)	Con il modello microscopico VeTESS gli autori hanno calcolato le emissioni, per tipologie specifiche dei veicoli, utilizzando dei cicli di guida reali ed hanno confrontato i risultati ottenuti utilizzando la metodologia COPERT. Con il modello microscopico VeTESS gli autori hanno calcolato le emissioni, per tipologie specifiche dei veicoli, utilizzando dei cicli di guida reali ed hanno confrontato i risultati ottenuti utilizzando la metodologia COPERT.	I risultati di VeTESS confermano che i gas di scarico del PM delle autovetture diesel mostrano una significativa diminuzione nelle aree urbane convertite in zone a 30 km/h.
Ahn e Rakha (2009)	Viene utilizzata una combinazione di modelli microscopici per il calcolo delle emissioni associati ad un sistema GPS che rileva secondo per secondo la posizione dei veicoli.	I risultati hanno mostrato che le misure di <i>traffic calming</i> (dossi e dissuasori in particolare) riducono la velocità dei veicoli contribuendo a migliorare le condizioni di sicurezza della strada ma portano a significativi aumenti del consumo di carburante e di emissioni in atmosfera quando si frena bruscamente oppure si accelera in modo "aggressivo". Anche le rotonde riducono le velocità, in modo meno brusco rispetto ad un dosso oppure ad uno stop, e pertanto portano ad aumenti più contenuti dei consumi e delle emissioni.
European Environment Agency (2011)	È stato adottato il modello COPERT IV per la stima delle emissioni a partire dalle velocità medie; i suoi fattori di emissione e consumo medi sono stati calcolati su test su un ampio numero di veicoli adottando diversi cicli di guida.	Gli effetti sulle emissioni dipendono fortemente dal tipo di alimentazione del veicolo e dal tipo di inquinante che si vuole considerare: generalmente le emissioni si riducono fatta eccezione per il CO nei veicoli diesel e per gli NO _x nei veicoli alimentati a benzina. Diminuire i limiti di velocità ha un effetto benefico sia sulla riduzione dei consumi che delle emissioni di alcuni inquinanti. Tuttavia, non è ancora ben chiaro il quadro emissivo che si delinea quando i limiti si fanno più stringenti all'interno delle aree urbane (per esempio da 50 a 30 km/h). In tal caso, sono certi i benefici in termini di sicurezza ma non altrettanto definiti gli eventuali benefici ambientali.

Autori	Metodologia	Possibili benefici conseguiti
Bellefleur e Gagnon (2011)	È una <i>review</i> di articoli sugli effetti dei sistemi di dissuasione del traffico sulla sicurezza stradale, la qualità dell'aria, l'inquinamento acustico e la mobilità dolce.	Il numero di articoli citati nella <i>review</i> diviene molto basso quando si cerca di correlare gli effetti dei dissuasori del traffico con le emissioni dei veicoli o con la qualità dell'aria. Anche le conclusioni sono molto discordanti. La maggior parte degli articoli citati riporta un aumento delle emissioni in corrispondenza dei sistemi normalmente adottati per la riduzione della velocità (dissuasori, rialzi della carreggiata, ecc.) fatta eccezione, secondo alcuni, per alcune mini-rotatorie posizionate in contesti ben specifici. Generalmente la variazione del ciclo di guida per frenare davanti ad un ostacolo e per ripartire subito dopo causa un maggior consumo di combustibile e maggiori emissioni.
Panis <i>et al.</i> (2011)	Sono stati adottati due diversi approcci: un di modello microscopico basato sui dettagli dei cicli di guida (modello VeTESS) e un approccio tradizionale macroscopico basato sulla velocità media (modello COPERT).	Relativamente al PM il modello VeTESS ha predetto moderate riduzioni riducendo i limiti di velocità, mentre il modello COPERT/MEET, ha predetto dei lievi incrementi. Riguardo la CO ₂ i risultati dei due modelli sono comparabili. Per NO _x VeTESS mostra una riduzione per velocità inferiori a 30 km/h, rispetto ai 50 km/h, mentre COPERT ha predetto un leggero incremento.
Madireddy <i>et al.</i> (2011)	Gli autori hanno costruito e convalidato un modello integrato che combina il modello di simulazione microscopica del traffico Paramics con il modello VERSIT+ per le emissioni di CO ₂ e di NO _x .	I risultati mostrano riduzioni delle emissioni di CO ₂ e di NO _x , dell'ordine del 25%, per effetto della riduzione dei limiti di velocità da 50 a 30 km/h nelle aree residenziali, oltre ad una maggiore sicurezza stradale conseguente a velocità di percorrenza più basse.
Casanova e Fonseca (2012)	Sono stati misurati simultaneamente le emissioni ed il consumo di carburante in condizioni di traffico reali, di un veicolo diesel leggero, rappresentativo delle comuni autovetture di medie dimensioni in Europa, mediante un dispositivo portatile per la misurazione delle emissioni.	Con uno stile di guida normale del conducente, i risultati mostrano che riducendo il limite di velocità da 50 km/h a 30 km/h, il tempo impiegato per un determinato viaggio non aumenta, ma il consumo di carburante e le emissioni di NO _x , CO e PM si riducono. Lo stile di guida influisce sui risultati, che, a loro volta, influenzano i fattori di consumo di carburante così come i fattori di emissione.
Williams e North (2013)	Sono state utilizzate metodologie per il calcolo istantaneo della velocità.	Gli effetti di una zona con limite a 20 miglia orarie risultano essere positivi per le auto diesel per le emissioni di NO _x , PM10 e CO ₂ mentre per le auto alimentate a benzina si hanno benefici solo per il PM10. Gli autori specificano che l'analisi non tiene conto degli effetti dovuti alla congestione del traffico.

Autori	Metodologia	Possibili benefici conseguiti
Pérez-Sansalvador et al. (2020)	Viene adottato un modello di misura istantanea del traffico al fine di stimare gli effetti dei dissuasori di velocità su una corsia stradale sulle emissioni di CO ₂ , NO _x , VOC e PM. In particolare, è stata adottata una versione modificata del modello "NaSch" in cui non vengono considerati alcuni fattori, come la presenza di semafori, attraversamenti pedonali e incroci. Il modello calcola la velocità istantanea di ogni veicolo considerando la distanza che lo separa dal veicolo che ha di fronte e la distanza dai dissuasori di velocità presenti sulla strada.	I risultati hanno mostrato che i dissuasori di velocità favoriscono in modo significativo le emissioni di inquinanti in atmosfera quando il numero di veicoli per corsia è basso. Queste ipotesi sono in accordo con quanto spesso riportato in letteratura anche se i risultati spesso sono molto diversi da caso a caso, a seconda delle condizioni del tempo, il momento della giornata in cui sono state eseguite le misure, il numero e la tipologia di veicoli utilizzati per le misure. In particolare, quando la probabilità di frenata P è pari a 0,1 e la densità (ρ) di veicoli per strada compresa nell'intervallo $0 < \rho \leq 0,48$ c'è una influenza medio forte che i dissuasori di velocità incrementino le emissioni. Il picco emissivo per CO ₂ , NO _x e PM è raggiunto quando $0,12 < \rho \leq 0,48$ e la velocità media è circa di 20 km/h.
ATKINS Ltd (2018)	È una <i>review</i> che ha analizzato la letteratura scientifica dal 2009 al 2014 esaminando 134 pubblicazioni. Lo studio è suddiviso in sezioni che sintetizzano prima di tutto i risultati generali relativi all'introduzione dei limiti di velocità di 30 km/h, per poi porre attenzione sui risultati specifici, tra cui la riduzione della velocità, gli incidenti, i benefici ambientali e sanitari.	I risultati dell'adozione di zone a 20 miglia orarie sulle emissioni sono diversi e contraddittori: per alcuni non hanno portato a nessun cambiamento nelle emissioni, per altri hanno registrato un aumento o una diminuzione.
Cleland <i>et al.</i> (2019)	È una <i>review</i> che prende in considerazione gli effetti delle zone e dei limiti di 30 km/h sulla salute in senso lato.	La rassegna ha rilevato che le zone 30 sembrano essere efficaci nel ridurre il numero e la gravità delle collisioni e delle vittime, non fornisce tuttavia prove sufficienti per trarre conclusioni solide sul loro effetto su vivibilità, emissioni e qualità dell'aria.
Cerema (2021)	Viene utilizzata la metodologia COPERT 5 e i relativi fattori di emissione e i dati sul parco veicoli francese, così come le proiezioni sull'evoluzione del parco veicoli entro il 2050. Cerema ha anche sviluppato un software, CopCerema, che viene utilizzato per gli studi d'impatto e che permette di calcolare le emissioni del trasporto su strada.	Dallo studio si evince che, con l'adozione delle zone 30, se si riscontra una riduzione di numero e gravità degli incidenti in tutte le città che le hanno introdotte, e di emissioni di rumore, non è invece evidente l'effetto positivo sulle emissioni di inquinanti atmosferici. I risultati del rapporto dimostrano anche che il legame tra emissioni e concentrazioni di inquinanti non è lineare; le curve delle emissioni sono un elemento utile ma non sufficiente per valutare gli effetti delle misure di limitazione della velocità sulla qualità dell'aria.

Autori	Metodologia	Possibili benefici conseguiti
Dipartimento per l'ambiente, i trasporti e la protezione del clima, del Senato tedesco (2021)	Lo studio ha analizzato la situazione del traffico prima e dopo l'introduzione delle zone 30 km/h e i cambiamenti nei dati del traffico. La base dei dati è costituita dai dati di traffico registrati localmente (numero e velocità dei veicoli) dalle stazioni di misurazione permanenti.	Dall'analisi dei dati raccolti si è stabilito che per quattro strade su cinque, sono risultate riduzioni di NO ₂ tra 2,2 e 3,8 µg/m ³ , che possono essere attribuite alla riduzione della velocità; per una strada, un aumento di 2,2 µg/m ³ è stato calcolato dalla metodologia di valutazione.

5 Mobilità dolce

5.1 Introduzione

Il settore dei trasporti è uno dei principali responsabili delle emissioni di CO₂ e la tendenza è in crescita, soprattutto in considerazione del crescente possesso di veicoli e del loro utilizzo nelle economie emergenti e in via di sviluppo. Tra le strategie adottate per ridurre le emissioni di gas a effetto serra (GHG) vi è quella tecnologica (motori *green* e combustibili meno inquinanti). Nel 2009 la Conferenza delle Parti (COP) 15, tenutasi a Copenaghen, ha indicato la completa ristrutturazione del mondo della mobilità urbana come unica possibile strategia di mitigazione del clima. Lo sviluppo del Trasporto Non Motorizzato (NMT) è una strategia fondamentale per ridurre le emissioni di CO₂. Il NMT offre ulteriori benefici per la società: promozione della salute, opportunità di sviluppo economico e inclusione sociale. I progetti di trasporto sostenibile potrebbero contribuire alla riduzione delle emissioni di CO₂ del settore dei trasporti.

Studi recenti indicano che la maggior parte degli attuali sforzi della politica dei trasporti si concentra su strategie di “miglioramento” come l’aumento dell’efficienza dei veicoli e del risparmio di carburante, o su strategie per evitare/ridurre gli spostamenti, in cui i chilometri percorsi dai veicoli vengano ridotti o spostati su modalità di trasporto sostenibili (che non emettono CO₂ o a basse emissioni di CO₂).

Il NMT, in particolare la bicicletta, ha un grande potenziale perché: (a) è un modo di trasporto economico e può essere un’opzione possibile anche per i meno abbienti; (b) i costi di investimento per le infrastrutture sono bassi; (c) nelle aree urbane congestionate, la bicicletta potrebbe far risparmiare tempo; (d) è una modalità di trasporto a emissioni zero; (e) è un’attività aerobica che apporta benefici fisici, come perdita di peso e miglioramento della forma cardiovascolare⁷⁸, e benefici psicologici, contribuendo al benessere e alla salute degli esseri umani⁷⁹.

I progetti e i programmi ciclistici sono tipicamente sviluppati per mantenere e/o per incrementare gli attuali livelli di mobilità ciclabile, fornendo servizi di buona qualità e sicurezza (ad esempio: piste ciclabili e attraversamenti protetti, sistemi per la riduzione del traffico per consentire l’uso condiviso della strada, parcheggi per biciclette e strutture per il noleggio). La crescita della mobilità motorizzata è considerata oggi un serio problema, in particolare per le sue conseguenze sul cambiamento climatico, comportando maggiori emissioni di CO₂. In termini di emissioni di CO₂ evitate, quindi, l’utilizzo della bicicletta fornisce significativi benefici.

⁷⁸ Pucher, J., Buehler, R., Bassett, D. R., & Dannenberg, A. L. (2010). Walking and cycling to health: a comparative analysis of city, state, and international data. *American journal of public health*, 100(10), 1986-1992.

⁷⁹ Barton, H. (2009). Land use planning and health and well-being. *Land Use Policy*, 26, S115-S123. Pretty, J., Peacock, J., Hine, R., Sellens, M., South, N., & Griffin, M. (2007). Green exercise in the UK countryside: Effects on health and psychological well-being, and implications for policy and planning. *Journal of environmental planning and management*, 50(2), 211-231.

Sono stati condotti pochi studi per valutare il potenziale di riduzione delle emissioni di CO₂ mediante l'uso della bicicletta. Dalla ricerca bibliografica, eseguita sui *database* elencati nell'introduzione, sono stati selezionati 18 articoli che descrivono l'impatto sulla riduzione delle emissioni di CO₂ e gli interventi che favoriscono la mobilità ciclo-pedonale.

5.2 Stato dell'arte

Massink R. *et al.* (2011) hanno valutato i benefici della bicicletta, attraverso lo sviluppo di una metodologia per attribuire un "valore climatico" alla bicicletta. Gli autori hanno simulato una sostituzione degli spostamenti in bicicletta con modalità di trasporto tradizionali (autovetture private, autobus, ecc.) calcolando le conseguenti emissioni aggiuntive di CO₂ che ne derivano.

Per stimare le emissioni di CO₂ evitate grazie agli spostamenti in bicicletta, gli autori si sono serviti di una metodologia che utilizza i dati sulle attuali quote modali della mobilità ciclistica. Confrontando la bicicletta con le altre modalità di trasporto ed utilizzando i relativi fattori di emissione di CO₂ è stato calcolato il valore climatico della bicicletta, definito come il totale delle emissioni di CO₂ evitate da tutti i viaggi in bicicletta. Tale valore corrisponde alla somma dei costi di opportunità di ogni viaggio in bicicletta nell'area di studio.

L'obiettivo principale della metodologia di modellizzazione è stato di stimare la modalità alternativa più probabile per ogni viaggio in bicicletta e di calcolare le emissioni aggiuntive di CO₂ causate dal traffico indotto. Il modello ha richiesto la conoscenza di un *set* di informazioni sulle caratteristiche del traffico: le distanze percorse, il *background* socioeconomico degli utenti e lo scopo del viaggio. Tutti i viaggi sono stati raggruppati in classi omogenee rispetto ai valori osservati delle suddette variabili. I viaggi in bicicletta sono stati redistribuiti tra le classi tenendo conto delle modalità di spostamento alternativo più verosimili, sulla base dei rapporti di probabilità tra le diverse alternative modali osservati in quella classe.

Il modello è stato testato per calcolare il valore climatico della mobilità ciclabile nella città di Bogotá (Colombia), una città con una quota modale attuale di biciclette del 3,3% su un totale di 10 milioni di viaggi giornalieri. La procedura di modellizzazione si articola in tre fasi: (1) raggruppamento dei viaggi in classi in base alla scelta della modalità, (2) calcolo del traffico indotto e scoraggiato e (3) calcolo dei costi di opportunità.

Le informazioni contenute nell'*Observatorio de Movilidad* (Indagine sulla mobilità⁸⁰) sono state utilizzate come dati di *input* per il modello. A 20.686 intervistati è stato chiesto di compilare un diario di viaggio che fornisse informazioni sul modo di trasporto, sulla fascia

⁸⁰ L'indagine sui viaggi delle famiglie è stata effettuata dal Segretariato distrettuale per la mobilità (SDM) e dal Dipartimento nazionale di statistica (DANE) nel 2005 a Bogotá.

socioeconomica dell'intervistato, sullo scopo del viaggio⁸¹ e sull'origine/destinazione degli spostamenti.

Per i fattori di emissione sono stati utilizzati valori desunti da studi di letteratura relativi a Bogotá. In questi studi si utilizzano fattori di emissione che tengono conto del parco veicolare e dei tassi di occupazione e si forniscono delle stime delle emissioni di CO₂ per Passeggero Chilometro Percorso (PKT) valevoli per la città di Bogotá.

In totale, ogni giorno vengono effettuati 337.105 viaggi in bicicletta corrispondenti a 2.613.247 PKT. Circa 310.314 viaggi e 2.490.825 PKT hanno una possibile modalità alternativa. La principale alternativa è l'autobus (61,9% dei viaggi e il 70,2% della PKT), mentre la scelta dell'automobile, del BRT (*Trans Milenio Bus Rapid Transit*) e degli spostamenti a piedi ha quote significativamente più piccole, rispettivamente il 10,2%, il 5,3% ed il 12,6% dei viaggi e il 9,8%, il 6,2% e il 5% di PKT.

Il traffico totale indotto dalle modalità alternative equivale a un costo opportunità di 151 tonnellate di CO₂ al giorno o di 55.115 tonnellate di CO₂ all'anno, che può essere visto come un "beneficio di opportunità" perché rappresenta le emissioni di CO₂ evitate. Rispetto alle prestazioni totali del traffico di Bogotá, tale valore corrisponde alla possibilità di evitare il 2,4% delle emissioni complessive di CO₂. Per quanto riguarda la rilevanza del valore climatico della mobilità ciclabile per le politiche di mitigazione del cambiamento climatico, la quota evitata di 55.115 tonnellate di CO₂ all'anno è comunque limitata. Tuttavia, tale valore, pur se modesto, potrebbe diventare significativo con lo sviluppo di progetti di trasporto sostenibile, qualora le emissioni di CO₂ evitate venissero scambiate sul mercato dei crediti di carbonio. In questo caso, si stima che il valore climatico della mobilità ciclabile corrisponderebbe ad un valore monetario compreso tra 1 e 7 milioni di dollari.

Il progetto "*Support to Sustainable Transport in the city of Belgrade*" finanziato dal GEF (il Fondo per l'Ambiente Globale) e dall'UNDP (il Programma delle Nazioni Unite per lo Sviluppo) è stato condotto nella città di Belgrado, con l'obiettivo di quantificare l'impatto sui gas a effetto serra degli interventi di trasporto sostenibile. Nella relazione finale del progetto (Gavrilova, 2014), vengono riportati i risultati di uno scenario dinamico di base per le emissioni riferito al periodo 2013-2024 con il quale si è stimato l'impatto diretto e indiretto delle componenti del progetto.

Il progetto si compone di diverse parti:

- il Piano di trasporto urbano sostenibile della città di Belgrado;
- la promozione degli spostamenti attivi con la bicicletta o a piedi, accompagnati da interventi infrastrutturali quali l'estensione delle piste ciclabili;
- un progetto pilota di Pedibus.

In particolare, nella relazione si approfondiscono i possibili risparmi di gas a effetto serra che si potrebbero ottenere implementando forme di mobilità sostenibile.

⁸¹ Affari, educazione, motivi personale, ritorno a casa, *shopping*, lavoro e altro.

Per promuovere la mobilità attiva sono state organizzate campagne d'informazione, eventi, concorsi, conferenze, ecc., aumentando la consapevolezza di autorità pubbliche e cittadini, ed inserendo le modalità di trasporto attivo come obiettivo prioritario nei documenti strategici di pianificazione urbana. Le campagne di sensibilizzazione pubblica hanno messo in evidenza gli aspetti positivi dell'uso della bicicletta, non solo come attività ricreativa, ma anche come possibile modalità di trasporto nella città di Belgrado. Le campagne pubbliche hanno puntato sugli aspetti ambientali, economici e sanitari del ciclismo, mostrando in particolare il miglioramento in termini di sicurezza stradale legato a questo mezzo di trasporto. Il risultato complessivo dell'attuazione di questa attività promozionale è stato un aumento significativo del numero di viaggi in bicicletta, contribuendo così sia a una riduzione delle emissioni di gas a effetto serra dei trasporti urbani sia alla promozione di cambiamenti comportamentali a lungo termine.

Le valutazioni e le indagini condotte nell'ambito del progetto hanno mostrato che solo l'1% della popolazione della città di Belgrado utilizzava la bicicletta come mezzo di trasporto per le attività quotidiane di pendolarismo, 175 giorni all'anno, percorrendo una distanza media di 2 km. L'implementazione dell'infrastruttura ciclabile (ristrutturazione di 37 km di piste ciclabili e costruzione di 4 km di nuove piste ciclabili) consentiranno un incremento degli spostamenti in bicicletta di circa il 5-10%. Facendo una previsione dell'incremento dell'utilizzo della bicicletta, in base agli interventi e alle attività del progetto, è stata stimato un aumento del 10% di tale modalità di spostamento tra i pendolari entro il 2014 (obiettivi molto realistici) e un successivo aumento dell'1% per il periodo 2015-2024.

La stima della possibile riduzione delle emissioni di gas a effetto serra è stata effettuata sulla base dei dati derivanti dall'indagine sull'utilizzo della bicicletta. Le emissioni di gas a effetto serra dovute all'uso di veicoli personali sono state stimate utilizzando il modello COPERT IV, il parco auto della città di Belgrado ed una stima del consumo di carburante. I risultati delle stime indicano un potenziale di mitigazione cumulativo di questo intervento, per il periodo 2013-2024, di 10,132 kt di CO_{2eq}.

Brand *et al.* (2014) hanno effettuato una ricerca il cui obiettivo era valutare gli effetti dell'implementazione nel Regno Unito di nuove infrastrutture per gli spostamenti a piedi e in bicicletta, sulle emissioni di CO₂ dovute agli spostamenti motorizzati.

Nel Regno Unito, circa un quinto delle emissioni di CO₂ e dei consumi energetici per i trasporti è conseguenza di spostamenti in auto, inferiori a 8 chilometri, che potrebbero essere fatti a piedi o in bicicletta. Camminare e andare in bicicletta ("*active travel*") potrebbe sostituire almeno in parte gli spostamenti motorizzati e ridurre le emissioni di CO₂. Tale ipotesi è supportata dalle evidenze che l'utilizzo della bicicletta sia correlata negativamente alle emissioni di CO₂. Inoltre, la spesa energetica per gli spostamenti a piedi è correlata negativamente con l'uso di combustibili fossili. Infine, chi risiede in quartieri in aree con maggiore presenza di aree "pedonali" effettua più frequentemente spostamenti a piedi e percorre meno chilometri in auto. La presenza di infrastrutture ciclabili e pedonali potrebbe, dunque, promuovere e favorire l'aumento dell'attività fisica della popolazione.

Gli autori hanno selezionato un campione di 1.849 adulti a cui è stato somministrato un questionario una prima volta nel 2010 (anno di riferimento *baseline*) ed una seconda volta a distanza di un anno nel 2011, dopo la costruzione di nuovi percorsi ciclopedonali nell'ambito del programma *Sustrans Connect*^{82,83}, che ha coinvolto il territorio di tre comuni del Regno Unito. Un secondo campione di 1.510 adulti è stato selezionato per completare il questionario nell'anno di riferimento (2010) e dopo un *follow-up* di due anni (2012). Tutti i partecipanti hanno risposto a domande relative al modo in cui effettuano gli spostamenti e alle caratteristiche della propria automobile, da cui sono stati derivati i dati necessari a stimare le emissioni di CO₂ per modalità e scopo degli spostamenti. Dai questionari, infatti, sono state ricavate le velocità medie e le distanze medie percorse per ogni scopo di viaggio. Grazie alle informazioni sulla distanza percorsa, sulla velocità media, sul tipo di carburante, sulle dimensioni e sull'età veicoli, gli autori hanno stimato le emissioni di CO₂ "a caldo" e "a freddo" (emissioni in eccesso durante la fase di riscaldamento). Per i viaggi in autobus, in treno e in "altre" modalità, le distanze percorse in base allo scopo del viaggio sono state moltiplicate per i fattori di emissione della CO₂ medi specifici per la modalità di trasporto, ottenuti dal Ministero dell'Ambiente, dell'Alimentazione e degli Affari Rurali del Regno Unito.

I risultati mostrano che le emissioni medie di CO₂ di tutti i viaggi motorizzati sono leggermente diminuite nell'arco del periodo di studio considerato. Al *follow-up* di un anno, le emissioni medie di CO₂ sono state di 31 kg per persona a settimana, con una riduzione stimata di 1,7 kg di CO₂ rispetto allo scenario di base (95% CI 0,4-2,9). A due anni di *follow-up*, le emissioni medie sono state inferiori di 3 kg di CO₂ rispetto al valore di riferimento (1,6-4,3). Questi livelli medi corrispondono a circa 1,5-1,6 tonnellate di CO₂ per persona all'anno, cifre comparabili alle stime del governo sulle emissioni pro-capite del trasporto su strada in Gran Bretagna. La percentuale delle emissioni dei trasporti attribuibili ai viaggi in auto è diminuita dall'89% (*baseline*) all'88% (*follow-up* a un anno) e all'86% (*follow-up* a due anni).

Dai risultati sembra che la distanza dalle nuove infrastrutture pedonali e ciclabili non abbia influito sulle emissioni di CO₂, anche se le stime sono caratterizzate da ampi intervalli di confidenza determinati dall'elevata variabilità delle emissioni di CO₂, e da una bassa potenza statistica dei risultati.

In seguito, sono state effettuate delle elaborazioni *post hoc*, con l'obiettivo di valutare l'effettiva potenza statistica della procedura proposta nell'individuare i cambiamenti delle emissioni di CO₂ rispetto a diverse categorie, utilizzando il numero di individui osservati nelle diverse categorie di esposizione e le deviazioni standard. I risultati ottenuti hanno indicato che, confrontando i partecipanti che vivevano ad una distanza dalle infrastrutture inferiore a 2 km rispetto a quelli che vivevano ad una distanza superiore, sono state rilevate

⁸² Ogilvie D, Bull F, Cooper A, Rutter H, Adams E, Brand C, et al. *Evaluating the travel, physical activity and carbon impacts of a 'natural experiment' in the provision of new walking and cycling infrastructure: methods for the core module of the iConnect study*. *BMJ Open*. 2012; 2:e.

⁸³ Ogilvie D, Bull F, Powell J, Cooper AR, Brand C, Mutrie N, et al. *An applied ecological framework for evaluating infrastructure to promote walking and cycling: the iConnect study*. *Am J Public Health*. 2011; 101:473-81.

variazioni nette tra i gruppi di 6-7 kg di CO₂/settimana nelle emissioni totali di CO₂ dovute al trasporto. Soglie molto simili sono state rilevate confrontando gli utenti delle infrastrutture *Connect2* con i non utenti.

Le emissioni complessive di CO₂ dei trasporti sono leggermente diminuite nel corso del periodo di studio. Dai risultati si evince un buon utilizzo della nuova infrastruttura sia a uno che a due anni di *follow-up*, con incremento del numero dei pedoni, dei ciclisti e di pratica di attività fisica. Tuttavia, questi effetti non si sono tradotti con significative riduzioni di CO₂, perché l'utilizzo delle infrastrutture ciclabili e pedonali è avvenuto soprattutto per scopi ricreativi, e non per sostituire gli spostamenti motorizzati per viaggi più lunghi (> 8 km), responsabili di circa l'80% delle emissioni di CO₂. Inoltre, le infrastrutture sono state utilizzate prevalentemente da chi non possedeva un'autovettura.

In definitiva, vivere più vicino all'infrastruttura secondo i risultati potrebbe cambiare lo spazio in cui si cammina o si va in bicicletta, solo pochi partecipanti all'indagine hanno risposto di avere percorso maggiori distanze a piedi o in bicicletta e nessuno di essi ha invece sostituito le modalità di spostamento motorizzato con spostamenti attivi dopo la realizzazione degli interventi.

I principali punti di forza di questo studio sono il disegno campionario basato sulla popolazione e l'uso di una misura di esposizione graduata per consentire confronti controllati tra gruppi di rispondenti. Tra i limiti, invece, si segnala la ridotta potenza statistica, che ha permesso di rilevare cambiamenti relativamente moderati nelle emissioni di CO₂, ma non cambiamenti più piccoli. Sarebbe stato necessario un campione di popolazione più ampio, data l'elevata variabilità osservata delle emissioni di CO₂ dovute al trasporto personale. Un secondo limite fondamentale è il potenziale effetto di distorsione derivante dalla selezione del campione. Infatti, dato il tasso di risposta relativamente basso, la popolazione dello studio non poteva essere considerata rappresentativa della popolazione generale.

I risultati ottenuti non possono escludere la possibilità di piccoli effetti dei nuovi percorsi pedonali e ciclabili sulle emissioni di CO₂. Nel contesto della politica energetica e climatica, una strategia più organica che preveda l'implementazione di un maggior numero di infrastrutture dedicate alla mobilità attiva assieme ad iniziative dedicate alla promozione della pedonalità e all'uso della bicicletta come alternativa alle autovetture private (ad esempio, misure di contenimento delle auto in città, tariffazione dei parcheggi, promozione del *car sharing* e del *bike sharing*), potrebbe essere un elemento chiave per raggiungere i propri obiettivi in termini di riduzione delle emissioni di carbonio.

Rudolph (2014) nel suo studio esamina le politiche e le misure che promuovono l'uso del *pedelec* (bicicletta a pedalata assistita). Questo tipo di bicicletta permette al ciclista di pedalare con uno sforzo minore e contribuisce all'incremento della quota modale degli spostamenti in bicicletta nelle aree metropolitane collinari e degli spostamenti per distanze maggiori. Le vendite di *pedelec* sono in continuo aumento in Germania dal 2005, attestandosi nel 2012 a circa 400.000 unità, il che corrisponde a circa il 10% del numero totale di biciclette vendute.

Il documento ha come scopo quello di comprendere il contributo, in termini di riduzione delle emissioni di CO₂, che può essere realizzato per ottenere una mobilità rispettosa del clima attraverso utilizzo del *pedelec*. Nello studio vengono esaminate le politiche e le misure che favoriscono l'acquisto e l'uso di *pedelec* e vengono analizzati i fattori che influenzano il comportamento modale dei potenziali gruppi *target*. È stato condotto un sondaggio, tra aprile 2011 e febbraio 2012, su 231 residenti tedeschi che utilizzavano un *pedelec* privato per i propri spostamenti. L'indagine aveva lo scopo di identificare le motivazioni che portavano all'acquisto e all'utilizzo del *pedelec* e i modelli comportamentali dell'utente, come ad esempio gli scopi degli spostamenti e le distanze percorse.

Per quantificare l'efficacia di queste politiche sulla riduzione delle emissioni, vengono creati due scenari per la città tedesca di Wuppertal, nota per i suoi ripidi pendii. Il primo scenario ipotizza il *business as usual*, con un miglioramento tutt'al più frammentario delle infrastrutture ciclistiche, che consiste nel tracciare piste ciclabili su strade e nel rendere gradualmente a senso unico le strade a doppio senso per le biciclette. Il secondo scenario, invece, si basa sull'introduzione di politiche e misure per incoraggiare l'acquisto e l'utilizzo di *pedelec* (creazione di una rete di piste ciclabili principali, introduzione di una velocità limite di 30 km/h in tutta la città, incentivi fiscali per l'acquisto di *pedelec*, parcheggi sicuri, campagne di promozione, ecc.). Il modello utilizzato per calcolare i risultati degli scenari si basa sulla procedura tradizionale del modello sequenziale in quattro fasi per la pianificazione degli spostamenti urbani, che calcola la generazione del viaggio, la distribuzione del viaggio, la scelta modale e l'assegnazione del percorso. Il modello utilizza i risultati di un sondaggio su un campione rappresentativo delle famiglie della città di Wuppertal, che ha permesso di stimare la distribuzione dei tipi di mobilità.

La procedura seguita è stata la seguente:

- sulla base dei risultati del sondaggio viene definita una quota modale che può essere raggiunta in condizioni locali ideali per l'utilizzo del *pedelec* e che si differenzia in base al tipo di mobilità, agli scopi del viaggio e alle distanze;
- sono indicati dei valori per il tempo di viaggio, il prezzo del viaggio, il comfort e la sicurezza di ciascuna scelta modale. I valori del *pedelec* vengono confrontati con i corrispondenti valori dell'auto privata, del trasporto pubblico e della bicicletta tradizionale.
- Ad ogni scelta modale sono assegnati dei fattori di ponderazione per il tempo di viaggio, il prezzo del viaggio, il comfort e la sicurezza.

Seguendo un approccio "misto", le ipotesi qualitative degli scenari sono calcolate da un modello quantitativo, che incorpora le analisi sui tipi di mobilità basati sull'atteggiamento e le rispettive scelte del *pedelec*.

Nello scenario BAU, il potenziale della mobilità ciclabile, con o senza pedalata assistita elettrica, entra in gioco su percorsi di due chilometri. Le biciclette e i *pedelec* raddoppierebbero quindi la loro quota modale dall'1,6% nel 2012 (anno base) al 3,2% nel

2050. Lo scenario del BAU ha un effetto limitato di mitigazione del cambiamento climatico. La quota dei chilometri percorsi su due ruote sul totale dei chilometri percorsi passerebbe dallo 0,9% nel 2012 al 2,2% nel 2050 e tale quota per i *pedelec* passerebbe dallo 0% allo 0,9%.

Nello scenario più ambizioso che prevede la promozione dei *pedelec*, il numero combinato di viaggi in bicicletta e *pedelec* rappresenterebbe una quota del 3,2% della ripartizione modale già nel 2020, superiore al totale combinato per le biciclette e *pedelec* nello scenario del BAU nel 2050. Entro il 2050 la quota degli spostamenti con biciclette e *pedelec* aumenterebbe al 17,4% di tutti i viaggi con partenza da e/o che terminano a Wuppertal. All'interno di questa cifra combinata, le biciclette conterebbero per lo 10,1 %, superando i *pedelec* il cui peso percentuale sarebbe del 7,3%.

Nello scenario di promozione dei *pedelec*, le emissioni annue pro capite derivanti dal trasporto personale in città, passerebbero da 1,5 t di CO₂ nel 2012 a 0,46 t di CO₂ nel 2050, con una diminuzione di 1,04 t di CO₂ (-69%). Tale scenario vedrebbe una riduzione maggiore delle emissioni di CO₂, che nel 2050 sarebbero in calo di circa il 75% rispetto al dato del 2012 di 523.000 t.

Rispetto al *business as usual*, le politiche e le misure per l'acquisto e l'utilizzo del *pedelec* consentirebbero di ridurre dell'11% le emissioni di CO₂ del trasporto passeggeri a Wuppertal nel 2050. Un limite di velocità di 30 km/h si dimostra particolarmente efficace. Nello scenario di promozione del *pedelec*, gli interventi che promuovono esclusivamente l'acquisto di *pedelec* ne aumentano significativamente la quota modale, mentre nello scenario *business as usual* tali sforzi rimangono inefficaci. La bicicletta tradizionale trae profitto dalla promozione del *pedelec*, ma il suo aumento di utilizzo non sembra avere effetti simili sulla protezione del clima.

Mrkajic *et al.* (2015) nel loro lavoro hanno analizzato i benefici locali e generali di un progetto che prevede l'implementazione di parcheggi per biciclette. Gli autori hanno analizzato il caso della città serba di Novi Sad e tra i benefici analizzati hanno valutato la riduzione delle emissioni di CO₂ conseguenti all'incremento dell'utilizzo della bicicletta per gli spostamenti.

La percentuale di spostamenti in bicicletta nella città in studio era del 2,5% nel 2009. Il basso utilizzo delle biciclette era presente anche tra gli studenti universitari (circa 10.000): solo lo 0,6% di essi utilizzava la bici e di questi il 50% possedeva una bicicletta. Gli studenti intervistati hanno riferito che il problema principale nell'utilizzare le biciclette era la carenza di parcheggi.

È stato quindi pianificato un intervento di adeguamento dei due parcheggi (A1 e A2) presenti all'università, migliorandone anche la sicurezza. Tale intervento ha previsto un aumento delle rastrelliere, un adeguamento dell'illuminazione e sistemi di sorveglianza. L'impatto dell'intervento è stato misurato osservando il numero di rastrelliere occupate, prima e dopo l'intervento. L'osservazione è stata effettuata per 5 giorni lavorativi per 4 mesi. Dopo l'intervento il parcheggio A2 ha raddoppiato le rastrelliere (da 17 a 34) facendo

salire il numero complessivo di parcheggi disponibili nei due parcheggi da 45 a 62. L'occupazione media delle rastrelliere nei due parcheggi è stata del 63% (39 biciclette parcheggiate e 62 fuori posto), mentre prima dell'intervento era del 36% (16 parcheggiate e 45 fuori posto). Dopo l'intervento, il parcheggio A1 ha contribuito con il 40,54% (16 biciclette parcheggiate e 28 fuori posto), prima dell'intervento era del 36% (11 parcheggiate e 28 fuori posto); mentre il parcheggio A2 con 59,46% (con 23 biciclette parcheggiate e 34 fuori posto), prima dell'intervento era del 29% (5 biciclette parcheggiate e 17 fuori posto). I risultati hanno mostrato un incremento medio del numero di biciclette parcheggiate e una maggiore occupazione del parcheggio A2.

Per stimare la CO₂ sono stati comparati i due scenari emissivi pre e post-intervento, ipotizzando un utilizzo di 16 biciclette ogni giorno prima dell'intervento e 39 dopo l'intervento. Si è stimata una distanza media casa-università di 3,8 km (7,6 km per il viaggio di andata e ritorno) per 251 giorni lavorativi (escludendo fine settimana e festivi).

Utilizzando i dati dell'*Europe Cycling Federation study*⁸⁴ per quantificare le emissioni di CO₂, in bicicletta vi è un'emissione di 21 g CO₂ per km, mentre con autovettura e con autobus le emissioni sono di 271 g e 101 g per km, ed è stata stimata una riduzione di 1.845,9 kg di CO₂ rispetto allo scenario di base.

Agli studenti sono stati anche somministrati dei questionari per stimare le modifiche comportamentali relative alle modalità di spostamento. Sono stati intervistati 44 studenti ciclisti e 49 che non si spostano in bicicletta. I questionari avevano una prima parte di domande in comune (informazioni sociodemografiche), mentre la seconda parte differiva tra i due gruppi. Ai ciclisti veniva chiesto di quantificare l'utilizzo della bicicletta prima e dopo l'intervento e l'efficacia dei nuovi parcheggi nella scelta di utilizzare di più la bicicletta. Ai non ciclisti veniva chiesta la modalità scelta per andare all'università, l'attitudine ad andare in bicicletta, l'influenza dei nuovi parcheggi sulla considerazione di utilizzare la bicicletta. Una terza parte del questionario era la stessa per i due gruppi ed era relativa a una valutazione personale sul progetto.

Dal questionario si è desunto che gli studenti che hanno cominciato ad utilizzare la bicicletta a seguito dell'intervento (21) sono stati i maggiori utilizzatori dei parcheggi, mentre chi utilizzava la bicicletta precedentemente ha utilizzato i parcheggi con una frequenza minore. Le infrastrutture per le biciclette, quindi, sembrano avere un'importanza significativa soprattutto per i nuovi ciclisti, ma sono comunque di supporto anche per coloro che andavano in bici in precedenza. Incrementare le infrastrutture per i parcheggi fa parte delle azioni da mettere in atto per promuovere la mobilità ciclistica. Per incrementare il ciclismo urbano risulta utile sia implementare tali infrastrutture, sia promuovere la ciclabilità.

Sono pochi gli studi che hanno esaminato come la demografia e le caratteristiche del quartiere possano avere un ruolo nella riduzione dei gas serra derivante dai progetti che

⁸⁴ Cycle more often 2 cool down the planet - Quantifying CO₂ savings of cycling.
<https://ecf.com/groups/cycle-more-often-2-cool-down-planet-quantifying-co2-savings-cycling>

implementano le infrastrutture per i trasporti. Lo spostamento dei viaggi dai veicoli privati alla bicicletta comporta una maggiore riduzione delle emissioni di gas serra. Le piste ciclabili a basso volume di traffico che richiedono infrastrutture sostanziali potrebbero non recuperare le emissioni di gas serra investite nella loro costruzione, mentre le piste ciclabili che si collegano a vie principali di transito potrebbero portare un maggiore *shift* modale dai veicoli privati alla bicicletta.

Tiwari *et al.* (2015) hanno condotto uno studio sul comportamento di viaggio dei cittadini di due città indiane: Rajkot e Vishakhapatnam. L'obiettivo era di stimare gli impatti dell'ambiente edificato e delle infrastrutture di NMT e del trasporto pubblico sul consumo di energia e sulle emissioni equivalenti di CO₂ in città indiane di medie dimensioni. È stato quindi analizzato l'impatto del miglioramento dell'ambiente costruito e delle infrastrutture sulle scelte delle modalità di viaggio, sul consumo di carburante, sulle emissioni e sulla sicurezza stradale.

All'inizio degli anni '80, in India, il NMT, ovvero la bicicletta e gli spostamenti pedonali, rappresentava circa il 40-60% del totale degli spostamenti. L'utilizzo della bicicletta si è ridotto dagli anni '90 al 10-30%, mentre i viaggi a piedi rappresentano ancora circa 30-40% del totale degli spostamenti. Il trasporto pubblico varia molto da città a città, ma presenta ampi margini di miglioramento in termini di affidabilità, velocità, disponibilità e convenienza. A tale scopo potrebbe essere necessario migliorare la programmazione, i sistemi di alimentazione, le infrastrutture stradali (creando corsie preferenziali), la posizione delle fermate degli autobus e dei sistemi di segnalazione.

Sono stati sviluppati tre scenari: 1) miglioramento solo dell'infrastruttura per il NMT, 2) miglioramento solo del trasporto pubblico (TP) e 3) miglioramento sia dell'infrastruttura del NMT che del TP.

Nelle città indiane la proprietà di veicoli a motore si riscontra nel 58% dei casi e tale percentuale probabilmente aumenterà con l'aumento del reddito e delle entrate. Quindi il trasferimento modale netto dalle auto alle modalità ecologiche si presume sia trascurabile in tutti gli scenari. In ogni scenario sono stati ipotizzati spostamenti da diverse modalità di viaggio in base alla distribuzione della lunghezza del viaggio in città. In una città dove il 70% dei viaggi è inferiore a 5 km, il miglioramento delle infrastrutture degli autobus avrà un impatto solo sul 30% dei viaggi. Questo comporta una diversa proporzione di viaggi che si spostano su NMT o TP.

La variazione percentuale del consumo di energia e delle emissioni potrebbe aumentare nelle città di Rajkot e Vizag nel secondo scenario (incremento del TP) a causa dell'aumento dei viaggi in autobus, e tale incremento dipende dal tipo di carburante utilizzato.

Le emissioni di CO₂ equivalenti mostrano la maggiore riduzione nello scenario 3 (NMT e TP combinati) in entrambe le città; tuttavia, la riduzione percentuale è maggiore in Rajkot rispetto a Vizag. L'analisi sottolinea l'importanza delle infrastrutture per il NMT per la sicurezza. I maggiori benefici per la sicurezza sono stimati nello scenario di miglioramento del NMT.

Lo studio mostra il forte ruolo delle infrastrutture per il traffico lento (ciclistico e pedonale) in entrambe le città, nonostante le differenze geografiche. L'analisi degli scenari evidenzia che la massima riduzione delle emissioni di CO₂ si ottiene quando sia il trasporto pubblico che l'infrastruttura di NMT vengono migliorati. In questo caso si ottiene anche un significativo miglioramento dell'indicatore di sicurezza stradale. Migliorare solo l'infrastruttura del TP può avere un effetto marginale sulla riduzione complessiva delle emissioni di CO₂ ed effetti negativi sulla sicurezza. L'infrastruttura NMT è fondamentale per mantenere le quote modali a favore del TP e NMT in futuro.

Matute *et al.* (2016) nel loro studio hanno cercato di comprendere la propensione a cambiare modalità di spostamento a favore della bicicletta e in quali condizioni tale spostamento può portare ad una maggiore riduzione dei gas serra e di inquinanti atmosferici, valutando il parco auto veicolare per conoscere i consumi. Gli autori hanno selezionato dei progetti di piste ciclabili, analizzando anche i dati sociodemografici, la tipologia di pista ciclabile, la connettività alle reti ciclabili e la topografia. Nella ricerca vengono sviluppati e validati modelli che incorporano dati demografici e cambiamenti nel comportamento di viaggio per stimare le riduzioni dei gas serra.

È stato utilizzato un approccio che valuta il ciclo di vita (LCA) ovvero la costruzione, il funzionamento e l'uso delle strutture per le piste ciclabili rispetto ad altre modalità di trasporto che sarebbero state utilizzate al posto della pista ciclabile.

Nello studio non sono stati considerati gli effetti derivanti dall'ampliamento delle piste ciclabili oppure dall'introduzione di sistemi di *bike sharing*. Sono stati raccolti: dati di pianificazione urbana, dati di richiesta di finanziamenti, dati dell'Ufficio Censimento degli Stati Uniti, dati sul numero di ciclisti nelle località in cui sono stati apportati miglioramenti alle piste ciclabili. I dati sono stati raccolti in varie città degli Stati Uniti: Austin, Chicago, Denver, Honolulu, Los Angeles, Portland, San Francisco e Washington DC. È stata effettuata un'indagine *ad hoc* per i ciclisti solo nella contea di Los Angeles. La trasferibilità di tali risultati è pertanto limitata alle aree urbane degli Stati Uniti.

Per determinare le potenziali riduzioni di gas serra derivanti dall'implementazione delle infrastrutture per le biciclette, è necessario stimare le distanze evitate con veicoli motorizzati. In letteratura vengono identificati due gruppi di variabili che hanno un impatto sull'utilizzo della bicicletta: variabili demografiche e variabili relative alle infrastrutture ciclistiche. Tali predittori del comportamento ciclistico sono stati utilizzati come variabili nel modello. I miglioramenti delle infrastrutture ciclabili sono gli interventi ciclistici più comuni. I fattori demografici altamente correlati con ciclismo sono il reddito, l'età, il sesso, la razza o l'etnia.

Al fine di stimare i cambiamenti nelle emissioni di gas serra dovuti alle infrastrutture per le biciclette, sono stati considerati tre aspetti distinti:

- valutazione del ciclo di vita del progetto di infrastruttura e del suo utilizzo;
- previsione dell'utilizzo della nuova infrastruttura per le biciclette (conteggio delle biciclette, prima/dopo l'intervento);

-
- stima della quota di utilizzo della bicicletta in un impianto che corrisponda ad una certa riduzione di spostamenti in auto e in transito (a tale scopo è stato condotto un sondaggio sull'utilizzo delle nuove infrastrutture e quale modalità di spostamento veniva seguita prima degli interventi).

La letteratura suggerisce che un aumento del 10% nell'offerta di corsie ciclabili è associato a un incremento di spostamenti in bicicletta del 3,1% per 10.000 abitanti, associato ad un incremento del livello di spostamenti in bicicletta pari al 2,5%.

Le attività associate all'uso della pista ciclabile e agli spostamenti che generano emissioni di gas serra, sono suddivise in quattro fasi: produzione di energia, funzionamento del veicolo, non funzionamento del veicolo e infrastrutture.

Un rapporto della Federazione Europea dei Ciclisti⁸⁵ ha stimato in 21 g di CO_{2eq}/km le emissioni del ciclo di vita delle biciclette imputabili all'apporto calorico richiesto per reintegrare la spesa energetica supplementare del ciclista rispetto ad uno spostamento motorizzato. Gli autori dello studio in oggetto utilizzano un approccio diverso facendo l'ipotesi che viaggiando in bicicletta ad una velocità di 10-12 miglia oraria si crei un dispendio energetico aggiuntivo rispetto ad una condizione di sedentarietà di 342 kcal/ora. Inoltre, tenendo conto di un peso medio della popolazione americana (78,7 kg) maggiore di quella europea (70 kg) e del maggior impatto sulle emissioni di CO₂ del sistema alimentare statunitense rispetto a quello europeo (2,21 g contro 1,44 g di CO_{2eq}/kcal), gli autori arrivano a calcolare 42,6 g di CO_{2eq}/km di emissioni del ciclo di vita delle biciclette.

Le biciclette convenzionali sono veicoli a zero emissioni in fase operativa. Le biciclette a pedalata assistita e le biciclette elettriche invece sono responsabili di emissioni dirette o indirette associate alla fase operativa che non sono state considerate in questo studio. Le attività non operative delle biciclette comprendono la produzione, il trasporto e le attività a fine vita associate alle forniture e alla manutenzione delle biciclette, come le parti sacrificabili (ad esempio pneumatici, tubi, pastiglie dei freni). Una LCA relativa alla produzione ed alla manutenzione della bicicletta effettuata con il *software* SimaPro 8.0.3 ha permesso di stimare l'emissione di 22,4 kg di CO_{2eq} per le attività di manutenzione e per un ciclo di vita della bicicletta di 5.000 km (3.107 miglia).

Per il progetto sono state esaminate tre tipi di infrastrutture per le piste ciclabili: una pista ciclabile dedicata (classe 1)⁸⁶, una corsia ciclabile delineata da strisce orizzontali (classe 2)⁸⁷ ed un sentiero ciclabile protetto (classe 3)⁸⁸. Effettuando una LCA per la produzione e la

⁸⁵ Blondel, Benoît, Chloé Mispelon, Julian Ferguson. *Cycle more Often 2 cool down the planet*. European Cyclists' Federation. (2011). Retrieved at https://ecf.com/system/files/Cycle_More_Often_2_Cool_Down_the_Planet.pdf

⁸⁶ Classe 1: *bike path* (si tratta di percorsi paralleli a strade aperte al traffico veicolare, ma separati da cordoli, marciapiedi o transenne, ringhiere, piolini, in modo da rendere impossibile la commistione con il traffico veicolare).

⁸⁷ Classe 2: *bike lane* (si tratta di porzioni di carreggiata riservate al transito delle biciclette, indicate solo da segnaletica verticale e orizzontale).

⁸⁸ Classe 3 *bike route* (uso promiscuo ciclopedonale).

manutenzione delle biciclette, utilizzando SimaPro 8.0.3 sono state stimate le emissioni di 110 kg di CO_{2eq} associate alla produzione.

Relativamente alle autovetture, le emissioni del ciclo di vita derivanti dall'estrazione, dal trasporto e dalle attività di raffinazione dei carburanti sono significative. La California ha adottato il modello di LCA GREET dell'Argonne National Library – uno dei più grandi laboratori di ricerca statunitensi – per stimare il totale emissivo derivante dall'uso dei diversi combustibili regolamentati dal "*Low Carbon Fuel Standard Program*". In questo studio sono stati utilizzati due valori relativi ai consumi energetici delle auto: un primo valore di 35 miglia per gallone (MPG) per i veicoli che operano in condizioni di traffico di Los Angeles, ed un secondo valore di 21,6 MPG per un veicolo di medie dimensioni della contea di Los Angeles che tiene conto dell'immatricolazione dei veicoli e dei livelli medi di congestione nella contea. Come tasso di occupazione media dei veicoli si è utilizzato il valore di 1,7 in entrambi i casi.

È stato anche stimato l'impatto delle infrastrutture stradali (sia relative alla costruzione che alla manutenzione delle corsie e dei parcheggi) pari a 9,4 g di CO_{2eq} per chilometro di strada e dei veicoli a motore (produzione e la manutenzione) pari a 28,6 g di CO_{2eq} per chilometro.

Infine, è stato stimato l'impatto dell'utilizzo del trasporto pubblico (autobus e metropolitana) e sono stati calcolati due valori basati su un'occupazione media di un veicolo di una linea ad alta produttività. In particolare, si è calcolato l'emissione di 66,7 g di CO_{2eq}/passeggeri-km, sulla base di 37 passeggeri di un veicolo della Orange Line, e l'emissione di 121,4 g di CO_{2eq}/passeggeri-km sulla base di un'occupazione media di 16,6 passeggeri di un veicolo della Los Angeles Metro.

È stata quindi stimata la riduzione delle percorrenze delle autovetture espresse in VMT sia prima che dopo gli interventi sulle infrastrutture per effetto dell'utilizzo delle biciclette. A questo scopo, si è proceduto a conteggiare il numero di biciclette in transito e si sono raccolti altri dati grazie ad un'indagine condotta a Los Angeles, tra gennaio e febbraio 2016 (si è utilizzato un questionario cartaceo con cui si sono ottenute 463 risposte e un certo numero di interviste orali, della durata di cinque minuti, con cui si sono ottenute 155 risposte).

L'approccio utilizzato è quello di prendere i dati raccolti prima e dopo la realizzazione delle corsie e piste ciclabili nelle città di Los Angeles, San Francisco, Honolulu, Portland, Chicago, Denver, Austin e il Distretto di Columbia. Il set di dati è composto da 46 conteggi di biciclette prima e dopo la realizzazione di infrastrutture ciclabili in 44 località. È stato riscontrato che il volume prima dell'installazione dell'impianto, insieme all'età della pista ciclabile, sono i parametri maggiormente correlati al volume dell'utilizzo della bicicletta. Non è stata trovata una chiara relazione tra tipo di impianto (pista ciclabile di classe 1, 2 o 3) e il volume di biciclette.

Dall'analisi è stato rilevato un significativo incremento dell'utilizzo della bicicletta dal 4% al 254%.

In relazione allo *shift* modale, la maggior parte degli intervistati (72%) ha dichiarato che avrebbe continuato a guidare la bicicletta seguendo lo stesso percorso, anche se la pista ciclabile non fosse esistita. Il 13% avrebbe cambiato percorso se la pista ciclabile non fosse esistita. Solo il 3,5% ha dichiarato che avrebbe preso l'autobus e l'1,9% ha dichiarato che avrebbe usato un'auto. Riguardo lo scopo del viaggio, il 63% degli intervistati ha dichiarato che lo scopo del viaggio era ricreativo. Il 29% degli intervistati ha dichiarato di andare in bicicletta per scopi utilitaristici, di cui il 14% che si recava al lavoro, l'8% che viaggiava per motivi familiari o personali e il 7% che faceva acquisti. Gli altri intervistati viaggiavano per altri scopi o per una combinazione di tali scopi. Le informazioni sull'origine e la destinazione degli spostamenti hanno permesso di calcolare la distanza media percorsa pari a 7 miglia, un valore abbastanza elevato, e la lunghezza mediana di 5,3 miglia.

Uno dei grossi limiti di questa indagine è stato che le domande poste con i questionari e le interviste erano in inglese e Los Angeles ha una popolazione significativa di persone che non parlano inglese.

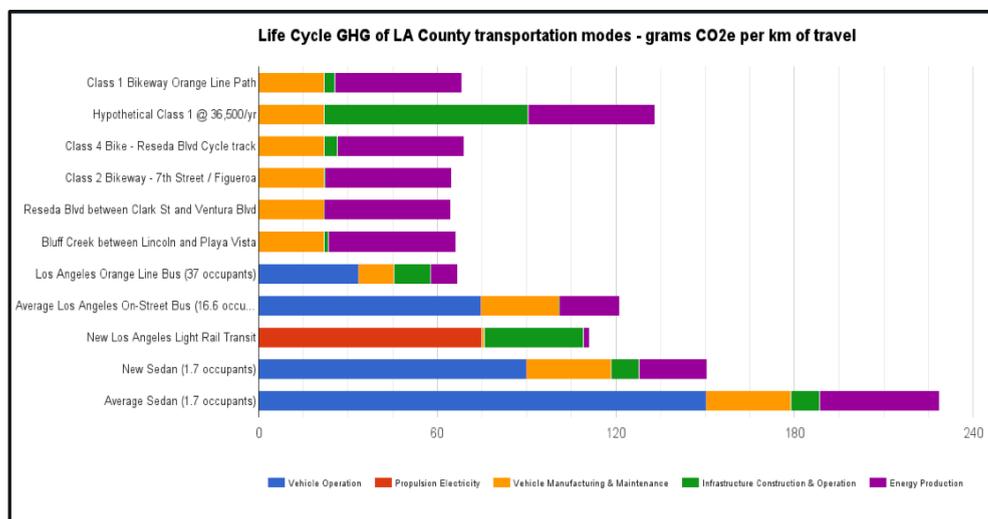
Sulla base di quanto riportato in letteratura, è noto come alcune variabili demografiche abbiano un impatto significativo sull'uso della bicicletta: l'età, il sesso, la razza, il reddito, il livello di istruzione, l'iscrizione al *college*, lo stato occupazionale, il tipo di famiglia, la densità di popolazione e la densità di occupazione. Inoltre, la scelta della bicicletta è determinata da molte variabili interdipendenti che includono il grado di accessibilità ai luoghi, la struttura della rete di trasporto e la relativa attrattiva di alcuni fattori (accesso al trasporto pubblico, servizi di *bike sharing*, costi del parcheggio e del carburante, ecc.).

Quasi tutte le piste ciclabili hanno mostrato un aumento del numero di ciclisti. Cinque piste su 44 hanno mostrato una diminuzione del numero di ciclisti⁸⁹. La variazione percentuale media è del 110%, il che significa che, in media, il numero di ciclisti è più che raddoppiato. Alcune piste hanno registrato un aumento di utenti di oltre il 200% e l'aumento massimo osservato è stato di oltre il 500%. L'aumento dell'utilizzo della bicicletta non sembra essere correlato con la tipologia di infrastruttura (corsie, piste ciclabili, sentieri ciclabili).

I risultati mostrano che cinque delle sei piste ciclabili campione rilevano piccole variazioni di emissioni, inferiori a 70 g di CO_{2eq}/passeggeri-km, ben al di sotto di autobus, metropolitana leggera ed automobili (Figura 5.1). Un'ipotetica pista ciclabile di classe 1 a basso utilizzo mostra emissioni di CO_{2eq}/passeggeri-km alla pari con quelle di una autovettura nuova.

⁸⁹ La variazione percentuale di ciclisti è stata stimata calcolando la variazione percentuale di volume (volume dopo – volume prima / volume prima) per ogni sito esaminato. (e (come è scritto nell'articolo: Recall that percent change in ridership = (after volume - before volume) / before volume).

Figura 5.1. – Confronto tra le strutture della pista ciclabile e le altre modalità di trasporto, CO_{2eq} per km di viaggio per passeggero



Fonte: Matute et al. 2016.

Sulla base della valutazione del ciclo di vita non tutti i progetti di piste ciclabili producono riduzioni nette nelle emissioni di gas a effetto serra. I progetti che richiedono per la costruzione di infrastrutture minori investimenti di emissioni di gas serra e quelli che attirano un maggior numero di nuovi ciclisti, distogliendoli dall'utilizzo del veicolo motorizzato, porteranno a una riduzione significativa delle emissioni di gas serra durante il ciclo di vita.

Mentre i nuovi ciclisti, che non avrebbero effettuato spostamenti né in bicicletta né con altre modalità, prima degli interventi progettuali, produrrebbero invece un aumento netto delle emissioni di gas serra.

Sebbene il ciclismo non produca emissioni di gas di scarico nella fase operativa, richiede energia umana, che richiede calorie alimentari. È stato stimato che un chilometro percorso in bicicletta da un utente che segue una dieta media americana richiede una produzione di alimenti che contribuisce all'emissione di 42 g di CO_{2eq} circa. Al contrario, un chilometro di viaggio in un veicolo a motore produce circa 153 g di CO_{2eq} dai gas di scarico e 59 g di CO_{2eq} per la produzione di energia. Le emissioni legate al cibo rappresentano una quota variabile intorno al 29% delle emissioni totali del ciclo di vita delle biciclette, ipotizzando uno scenario in cui la quota maggiore delle emissioni è determinata da tutte le altre componenti del ciclo di vita (produzione, manutenzione, ecc.), e circa il 66% delle emissioni del ciclo di vita, nello scenario in cui le altre componenti del ciclo di vita hanno un impatto emissivo ridotto.

Spesso le metodologie utilizzate per valutare gli impatti emissivi delle varie forme di mobilità hanno considerato il ciclismo una modalità di trasporto a emissioni zero, in particolare supponendo che non ci siano nuove emissioni da un progetto per la

costruzione di una pista ciclabile. Tuttavia, il ciclismo è una modalità a zero emissioni ma solo in fase operativa. Infatti, come mostrato in questo lavoro, la produzione, distribuzione e preparazione degli alimenti richiedono energia che determina emissioni significative, che, insieme alle emissioni legate al LCA della costruzione e della manutenzione delle piste ciclabile, vanno considerate nel calcolo dei benefici ambientali di questa modalità di trasporto.

Tarulescu *et al.* (2017) hanno analizzato il sistema di trasporto stradale dell'area metropolitana di Brasov in Romania. Nello studio sono state analizzate le vie di comunicazione che collegano la città di Ghimbav alle principali aree di interesse circostanti. È stato realizzato un modello di previsione per stimare la diminuzione del consumo energetico e della quantità di CO₂ derivante dal trasporto su strada per la città di Ghimbav. Sono state prese in considerazione diverse misure di ottimizzazione: il rinnovo del parco veicoli, la costruzione di un raccordo anulare per deviare il traffico urbano, strade a scorrimento veloce, la realizzazione di piste ciclabili, l'implementazione di un sistema di trasporto pubblico urbano. Per ogni misura è stato utilizzato un modello matematico per calcolare il consumo di energia e le emissioni di CO₂ dovute al settore dei trasporti su strada. Per le finalità di questa revisione viene descritto solo l'intervento relativo alla realizzazione di piste ciclabili.

Lo studio si basa sulla diminuzione approssimativa dei volumi di traffico che si può ottenere creando piste ciclabili nella città di Ghimbav e sulle strade principali che la collegano a quelle limitrofe. Secondo i dati analizzati in questo studio per le piste ciclabili, il volume del traffico stradale diminuirebbe dell'8% dopo la costruzione di una pista ciclabile a Ghimbav. Dopo aver applicato questa riduzione percentuale, per il totale dei veicoli totale è stata stimata una possibile riduzione nei consumi energetici di 1.015,28 MWh e nelle emissioni di 260,82 tonnellate di CO₂.

Dopo aver analizzato tutte le misure si è calcolato quali sarebbero i consumi energetici totali e la riduzione delle emissioni complessive di CO₂ qualora le misure in questione venissero applicate dal 2017 al 2020.

La misura più efficace tra quelle descritte è stata l'implementazione di un sistema di trasporto pubblico "verde" per la città Ghimbav, che determinerebbe una riduzione del 19,7% dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂. La realizzazione di piste ciclabili porterebbe una riduzione del consumo energetico e delle emissioni di CO₂ dell'11,2%, la strategia di rinnovamento del parco veicoli a una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO₂ del 5%.

In definitiva, gli autori sottolineano che si potrebbe ottenere una sostanziale riduzione delle emissioni di CO₂, CO e PM se le misure prese in considerazione venissero implementate nell'area urbana di Ghimbav, accompagnata da una riduzione dei livelli di inquinamento atmosferico.

Nel loro studio Giannakos *et al.* (2017) presentano le misure di gestione del traffico progettate per l'area centrale della città di Salonicco, in Grecia e stimano gli effetti

ambientali generati dalle misure proposte, dimostrando come la mobilità nel centro città possa essere migliorata, in termini qualitativi, se viene dato più spazio pubblico al trasporto di massa e ad altre modalità di mobilità come la bicicletta e gli spostamenti a piedi. La ricerca fornisce una breve sintesi dei tipi di modelli che possono essere utilizzati per descrivere i flussi di traffico. Una prima classificazione si riferisce alla scala su cui operano tali modelli, distinguendo tra modelli microscopici, mesoscopici o macroscopici. Inoltre, a seconda del tipo di dati sulla domanda di traffico di cui si dispone, è possibile simulare i flussi di traffico in modo statico oppure dinamico. La simulazione dinamica si basa sul primo principio di Waldrop (1952) in base al quale "il tempo di viaggio, su tutte le strade utilizzate, è uguale e minore del tempo di viaggio che potrebbe essere sperimentato da un singolo utente aggiuntivo su di una qualsiasi strada non utilizzata". L'idea è che ogni utente non cooperativo cerca di minimizzare il proprio costo di trasporto. I flussi di traffico che soddisfano questo principio sono definiti flussi di equilibrio del tipo "*user equilibrium*" dal momento che ogni utente sceglie la strada che è migliore per sé. I modelli di questo tipo si dicono "modelli di equilibrio" al contrario dei cosiddetti "modelli statici" che hanno l'obiettivo di ottimizzare i tempi di viaggio dell'intero sistema, indipendentemente dalle preferenze individuali. La simulazione statica si basa su dati in *input* che non cambiano con il tempo o con le condizioni della rete di trasporto. Ciò significa che i veicoli simulati con questo tipo di modelli si spostano effettuando delle svolte nelle intersezioni stradali in conformità ad una prefissata distribuzione di probabilità. Al contrario, la simulazione dinamica si evolve nel tempo in funzione di vari fattori ed è basata su una matrice origine-destinazione dipendente dal tempo. Questo tipo di modelli consente di rappresentare l'intera dinamica delle condizioni di traffico grazie ad una simulazione dei percorsi su base microscopica.

I modelli microscopici distinguono e tracciano il comportamento di ogni singolo veicolo e sono stati i primi ad incorporare la simulazione dinamica. Nella maggior parte dei modelli esistenti i conducenti aggiustano il proprio comportamento prendendo in considerazione le interazioni con gli altri veicoli, la geometria stradale ed i sistemi di controllo del traffico. Tali modelli sono in grado di simulare le decisioni individuali dei conducenti in merito all'accelerazione, la decelerazione, i sorpassi e le fermate. Ad ogni passo temporale della simulazione, i modelli aggiornano le posizioni dei veicoli sulla rete stradale.

Sono stati proposti modelli per il calcolo istantaneo delle emissioni integrati a modelli microscopici di simulazione del traffico. Mentre i modelli di traffico permettono di simulare la velocità e l'accelerazione istantanea dei singoli veicoli, i modelli per le emissioni sono basati su misure empiriche ottenute rilevatori montati su veicoli che si spostano nella rete stradale reale e forniscono dati emissivi specifici alla tipologia, alla velocità e all'accelerazione delle autovetture.

Gli autori di questo articolo si propongono di esaminare gli impatti sul traffico e sull'ambiente derivanti dall'implementazione di tre scenari, che includono misure di gestione e di controllo del traffico ed un programma di pedonalizzazione nella città di Salonicco in Grecia. È opinione diffusa che i cambiamenti che intervengono nel sistema dei trasporti possano condurre ad un miglioramento delle condizioni di vita e di sicurezza

degli utenti deboli della strada, tuttavia è stato osservato che, in determinate circostanze, un aumento della capacità di trasporto di una rete stradale può determinare un peggioramento della congestione stradale, quando gli utenti stabiliscono autonomamente ed egoisticamente il proprio percorso, riducendo quindi la velocità media complessiva (paradosso di Braess).

L'analisi è stata condotta per mezzo del modello microscopico di simulazione del traffico con il *software* Aimsun. Sono state condotte simulazioni sia statiche che dinamiche e sono stati confrontati i risultati ottenuti con i due approcci. Nel modello di traffico utilizzato è stata incorporata una funzione di calcolo delle emissioni inquinanti dovute al trasporto stradale.

La rete stradale considerata per la simulazione statica è composta da 401 tratti stradali e da 210 incroci, per una lunghezza totale di 42 km. La rete stradale considerata per la simulazione dinamica è composta da 452 tratti stradali e 290 incroci di cui 62 con un dispositivo di controllo del traffico. Per la simulazione dinamica è stato considerato un certo numero di tratti stradali "fittizi" in più rispetto al caso statico e connessi a 48 centroidi incorporati nella matrice origine-destinazione al fine di rendere la simulazione più attendibile.

La domanda di traffico è stata ottenuta con il modello macroscopico VISUM di simulazione statica. I dati di flusso di traffico nell'area di studio sono stati raccolti mediante dei sensori disposti sulla rete stradale dalle 9 alle 10 di mattina, ora in cui si registra il picco di traffico, in un giorno infrasettimanale (mercoledì 24 ottobre 2014). La domanda di traffico ottenuta è stata quindi utilizzata come dato utile per l'applicazione del modello microscopico. L'informazione sulla composizione percentuale del traffico è stata desunta da uno studio precedente del 2013 che aveva stimato un 90% di veicoli privati, un 5% di taxi, un 4% di mezzi pesanti ed un 1% di autobus.

La simulazione dinamica del traffico è stata realizzata facendo uso di una matrice origine-destinazione che definisce il numero di spostamenti da ogni centroide di origine ad ogni centroide di destinazione nell'arco di tempo di un'ora, dalle 10 alle 11 di mattina, di un giorno infrasettimanale. Tale matrice definisce un numero totale di spostamenti pari a 14.533 che sono stati allocati in modo empirico a tre tipi di veicoli: autovetture (89%), mezzi pesanti (8%) e taxi (3%). Per quanto riguarda gli autobus si è usato il numero di corse previsto dal servizio. I veicoli sono stati assegnati ai percorsi mediante il modello C-logit, una variante del modello di regressione logistica, che è stato scelto per tenere conto in modo opportuno delle dimensioni notevoli della rete stradale e di un certo livello di sovrapposizione di itinerari alternativi.

Ogni volta che il modello stima un percorso di un veicolo più breve di quello inizialmente calcolato, il veicolo viene assegnato al percorso migliore. Al fine di ottenere un risultato della simulazione il più possibile attendibile, si è preso in considerazione la media di cinque *output* successivi derivanti dall'applicazione del modello. Il modello è stato validato per mezzo di 26 sensori di traffico collocati sulla rete stradale, grazie ai quali è stato possibile

ottenere dati di traffico in tempo reale in quattro diversi giorni infrasettimanali nella fascia oraria tra le 10 e le 11 di mattina.

Le simulazioni sono state effettuate prendendo in considerazione quattro scenari, tre scenari relativi ad una diversa implementazione di aree pedonali ed uno scenario di base senza schemi di pedonalizzazione. È stata condotta un'analisi di sensibilità della domanda di trasporto per i tre scenari che prevedono le aree pedonali, riducendola rispettivamente del 10 e del 20%.

Sono state calcolate delle statistiche sia a livello disaggregato (per singoli tratti stradali) per descrivere i risultati ottenuti con la simulazione statica e quella dinamica, sia a livello aggregato (per l'intera rete stradale) per descrivere i risultati ottenuti con la sola simulazione dinamica. A livello disaggregato si è stimato la media dei tempi medi di percorrenza, di ritardo e di incolonnamento; a livello aggregato si è stimato la media della velocità di percorrenza, dei tempi di percorrenza e di ritardo. Come indicatori significativi dal punto di vista ambientale sono stati scelti i consumi di carburante e le emissioni di CO₂.

A livello disaggregato, sono stati valutati gli impatti di due schemi di pedonalizzazione su cinque tratti stradali collocati in prossimità delle aree pedonali. L'implementazione degli schemi di pedonalizzazione sembra far aumentare i tempi di percorrenza, ritardo e incolonnamento rispetto allo scenario di base, sia con la simulazione statica che con quella dinamica. Inoltre, si è osservato che tali tempi si riducono ulteriormente in modo significativo a fronte di una riduzione della domanda di trasporto del 20%. Confrontando i risultati ottenuti con la simulazione statica e dinamica, si registrano dei tempi maggiori in quella statica come era lecito attendersi.

A livello aggregato, si è osservato che la simulazione dinamica conduce ad una stima della velocità media di percorrenza per gli scenari con gli schemi di pedonalizzazione inferiore a quelle ottenute con lo scenario di base. Conseguentemente, la stima dei tempi di percorrenza e di ritardo risultano superiori. Nello specifico, la velocità media di percorrenza si riduce del 6, 17 ed 11% implementando rispettivamente i tre scenari che prevedono schemi di pedonalizzazione. Tali riduzioni comportano nei tre scenari un aumento corrispondente del tempo di ritardo pari rispettivamente al 5, 31 e 18%, comportando un aumento del tempo medio di percorrenza di circa 76 secondi, assumendo delle condizioni ideali di traffico.

Per quanto riguarda il consumo di carburante, nella modellizzazione aggregata si registra un aumento del 3 e del 2% con i primi due scenari di pedonalizzazione ed una riduzione del 4% con il terzo scenario. Tale scenario è anche quello che ha un impatto maggiore in termini di emissioni di CO₂, con un aumento pari al 6%, mentre i primi due scenari sono responsabili di un aumento dell'1 e del 4%, rispettivamente. La riduzione della domanda del traffico del 10 e del 20% comporta una riduzione significativa dei consumi di carburante e delle emissioni di CO₂ in tutti gli scenari.

Concludendo, i risultati indicano che i tempi di percorrenza, i ritardi e le code sono aumentati in tutte le sezioni stradali sia nella simulazione statica che in quella dinamica, e

i risultati della simulazione dinamica sono più elevati rispetto a quella statica. I risultati aggregati riportano una diminuzione della velocità e l'aumento significativo del consumo di carburante e delle emissioni di CO₂. Per gli scenari considerati, l'analisi di sensibilità sulla domanda di traffico ha dimostrato il miglioramento delle condizioni del traffico e della qualità dell'ambiente derivante dalla riduzione della domanda di traffico. Infine, gli autori prevedono che con le nuove linee della metropolitana gli schemi di mobilità sostenibile nel centro di Salonicco potrebbero essere introdotti con successo.

L'obiettivo dello studio di Guariso e Malvestiti (2017) è quello di valutare il livello di sostenibilità della mobilità ciclabile nell'area urbana di Milano. L'attenzione dei ricercatori è focalizzata sulla salute umana, cosicché i benefici della ciclabilità derivanti dall'attività fisica e gli effetti negativi dovuti all'inquinamento atmosferico vengono valutati e confrontati nel contesto urbano di una città di medie dimensioni e con un elevato livello di inquinamento.

Gli impatti della ciclabilità vengono valutati mediante la combinazione di due modelli, uno che ne stima i benefici sulla salute e un altro che ne stima gli effetti negativi sanitari ed economici derivanti da un'aumentata esposizione all'inquinamento atmosferico.

Gli effetti positivi della mobilità ciclabile derivanti all'attività fisica possono essere valutati utilizzando lo *Health Economic Assessment Tool* (HEAT), sviluppato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) nel 2014. Questo modello calcola la riduzione del rischio di mortalità e il relativo valore economico in termini di costi evitati, derivante da un determinato livello di utilizzo delle biciclette in un campione di popolazione. Il modello HEAT studia gli effetti della ciclabilità sulla mortalità, ma non sulla morbilità, perché sulla base delle conoscenze attuali tali effetti sono ancora limitati. Inoltre, il modello considera la mortalità per tutte le cause e non la mortalità per cause specifiche, sia perché i primi sono più facilmente reperibili, sia perché si riduce la complessità del modello. L'uso sistematico della bicicletta durante l'anno per gli spostamenti casa-scuola e casa-lavoro, produce effetti positivi sulla salute soltanto dopo un certo tempo: il modello HEAT assume che tali effetti saranno pienamente concretizzati dopo cinque anni. Tale modello può essere implementato per pianificare una nuova infrastruttura legata alla mobilità ciclabile, per valutare la riduzione di mortalità e i relativi benefici economici attribuibili ai livelli attuali di ciclabilità, per produrre dati di input a valutazioni economiche di tipo più ampio.

Il modello HEAT, affinché possa produrre risultati attendibili, deve essere utilizzato su un campione di popolazione sufficientemente ampio, i cui componenti abbiano un'età compresa nella fascia di 20-64 anni e che non siano già abituati a praticare attività sportive ad alto o medio livello (ad esempio, sportivi professionisti). I dati necessari all'applicazione del modello sono i seguenti:

- il numero di persone che si spostano in bicicletta oppure il numero di spostamenti in bicicletta per persona al giorno oppure il numero totale di spostamenti in bicicletta osservati ogni giorno nell'area oggetto di studio; in quest'ultimo caso è necessario conoscere anche la percentuale di spostamenti che corrispondono a viaggi di ritorno dalla destinazione verso l'origine;

-
- il tempo medio o la distanza media percorsi in bicicletta per persona al giorno; un fattore può essere ottenuto dall'altro assumendo una velocità di spostamento costante. Il modello HEAT per la velocità degli spostamenti in bicicletta assume un valore di default di 14 km/h;
 - il numero di giorni all'anno in cui vengono usate le biciclette dal campione;
 - il tasso di mortalità attuale espresso come numero di morti ogni 100.000 abitanti;
 - il "valore della vita statistica" o "*standard value of statistical life*" (VSL), un indicatore che misura il valore economico della vita umana.
 - il periodo di tempo sul quale vengono calcolati i benefici economici (per *default* si assume un periodo di 10 anni).
 - un tasso di attualizzazione per tener conto del ritardo tra il momento in cui si comincia a praticare l'attività fisica e quello in cui si gode dei corrispondenti benefici (per *default* si assume un tasso del 5%).
 - i costi legati alle attività promozionali della mobilità ciclabile, se disponibili.

Il modello restituisce in *output*:

- la riduzione del rischio di mortalità;
- la riduzione dei livelli di mortalità all'interno del campione considerato;
- il beneficio massimo e medio ottenuto in un anno ed i valori attuali di tali benefici;
- il beneficio cumulato ottenuto in 10 anni e il suo valore attuale.

Per valutare gli effetti negativi della ciclabilità, gli autori hanno implementato il modello "R-R" che valuta l'aumento nel livello di mortalità derivante dall'esposizione alle polveri sottili. Tale modello prende in considerazione soltanto gli effetti di lungo periodo, ovvero gli effetti derivanti da un'esposizione prolungata ad elevate concentrazioni di PM10. Per poter applicare il modello R-R è necessario uno scenario "di riposo" di riferimento nel quale si ipotizza un'esposizione di base all'inquinamento atmosferico.

I dati di *input* necessari del modello R-R sono:

- la concentrazione media annuale di PM10 nell'area di interesse;
- la durata media in minuti oppure la distanza media in km degli spostamenti in bicicletta;
- il tasso di mortalità attuale;
- il numero di ciclisti esposti all'inquinamento atmosferico;
- il rischio relativo che stima il numero di morti attribuibili ad aumenti di 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nella concentrazione di PM10;

-
- il tasso di ventilazione che assume valori più elevati per attività, come l'uso della bicicletta, caratterizzate da un elevato dispendio energetico.

Il modello restituisce in *output* l'aumento del livello di mortalità causato da una maggior esposizione all'inquinamento atmosferico ed il corrispondente aumento nei costi economici associati alla mortalità valutato grazie al VSL.

Nell'applicazione al caso di studio di Milano, gli autori hanno assunto che la bicicletta sia usata come un mezzo alternativo all'automobile, cosicché il modello è stato usato per studiare separatamente gli effetti dell'uso della bicicletta e delle autovetture private considerate come attività distinte rispetto allo scenario di riferimento "di riposo". Al fine di valutare l'impatto della ciclabilità sulla mortalità, il numero di morti attribuibili all'uso dell'automobile è stato sottratto da quello attribuibile all'uso della bicicletta. Sono stati presi in considerazione quattro scenari differenti per la città di Milano.

- "Scenario attuale". L'uso della bicicletta è riferito a dati del 2013, in cui si sono registrati circa 3 milioni di spostamenti al giorno dei quali il 5,7% (170.000 spostamenti) in bicicletta. Si assume che ogni ciclista effettui due spostamenti in bicicletta ogni giorno (per raggiungere il posto di lavoro e per ritornare a casa), cosicché il numero risultante di ciclisti è di 85.000 unità. Si è ipotizzato una concentrazione media annua di PM10 di 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sulla base dei dati di monitoraggio aggiornati al 2015.
- "Scenario al 2024". Viene simulata una situazione futura in cui si ipotizza un maggior numero di ciclisti coerentemente allo *shift* modale stimato per il 2024 dal PUMS. Gli spostamenti giornalieri dovrebbero aumentare attestandosi a 3.176.000 dei quali 225.000 (7,1%) effettuati in bicicletta, il che corrisponde a circa 113.000 ciclisti. Si ipotizza la stessa concentrazione media annua di PM10 assunta per lo Scenario attuale.
- "Scenario con miglioramento della qualità dell'aria". Viene descritto uno scenario futuro che differisce dallo Scenario al 2024 per la concentrazione media annua di PM10 che si ipotizza di 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tale diminuzione è coerente con la *trend* del PM10 osservato a Milano negli ultimi 15 anni.
- "Scenario Amsterdam". Viene applicata la percentuale degli spostamenti in bicicletta tipica della città di Amsterdam (32%) al numero giornaliero di spostamenti registrato a Milano nel 2013 (2.978.000) e, come negli altri scenari, si ipotizzano due spostamenti giornalieri per ogni ciclista. La concentrazione media annua di PM10 si assume pari 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ come nello Scenario attuale.

Analizzando e confrontando gli *output* del modello HEAT e del modello R-R, si evince che i benefici derivanti dall'uso delle biciclette sono maggiori degli effetti negativi in tutti gli scenari considerati. In particolare, il rapporto benefici/effetti negativi varia tra 19 e 22 e rimane stabile in tutti gli scenari considerati, a conferma della robustezza dei risultati ottenuti. Il valore massimo del rapporto benefici/effetti negativi viene raggiunto nello Scenario con miglioramento della qualità dell'aria. In definitiva a Milano, nonostante

l'elevata esposizione all'inquinamento atmosferico, gli effetti positivi dell'attività fisica, di chi va in bicicletta, superano ampiamente gli effetti negativi, e la mobilità ciclabile può essere considerata una modalità di spostamento vantaggiosa.

Gli autori hanno anche stimato la possibile riduzione delle emissioni di CO₂ e di PM10 rispetto alla situazione attuale se il numero di ciclisti fosse quello previsto nello Scenario al 2024 e nello Scenario Amsterdam. Tale stima viene ottenuta a partire dai fattori di emissione per la CO₂ ed il PM10, distinti per tipo di alimentazione e classe euro dei veicoli. Per ciascun inquinante vengono calcolati due fattori di emissione, uno per i veicoli a benzina ed uno per i veicoli diesel, come media pesata dei fattori di emissione delle classi euro, con pesi dati dal numero di veicoli appartenente a ciascuna classe.

Un altro elemento necessario per la stima delle emissioni è il numero di autovetture alimentate a benzina e a diesel che vengono sostituite dalle biciclette. Tale dato viene ottenuto applicando le percentuali dei veicoli a benzina e dei veicoli diesel al numero di ciclisti previsti nello Scenario al 2024 e nello Scenario Amsterdam e, pertanto, il numero di autovetture sostituito dalle biciclette nello Scenario al 2024 è diverso nei due scenari.

Infine, la riduzione delle emissioni di CO₂ e di PM10 viene calcolata come il prodotto tra il numero di autovetture sostituite, il relativo fattore di emissione e la distanza media coperta in ogni viaggio in automobile (assunta pari a 7 km).

Nello Scenario al 2024 le riduzioni delle emissioni di CO₂ e di PM10 sono rispettivamente di circa 7.600 e 2 tonnellate, mentre con lo Scenario Amsterdam si stima una riduzione maggiore pari a circa 100.000 e 28 tonnellate delle emissioni di CO₂ e di PM10 rispettivamente.

Tali riduzioni rappresentano solo una piccola percentuale del totale annuale delle emissioni di CO₂ e PM10 dovute al traffico nella città di Milano: lo 0,6% per lo Scenario al 2024 e l'8% per lo Scenario Amsterdam. Il traffico veicolare è responsabile di circa il 44% delle emissioni totali di PM10 e del 30% delle emissioni di GHG della città. Inoltre, si deve sottolineare che le emissioni di PM10 sono solo uno dei fattori che contribuiscono a formare le concentrazioni in atmosfera di materiale particolato che per almeno il 50% hanno un'origine secondaria e sono determinate da altri precursori come gli NO_x ed i composti organici volatili. Per tali ragioni, le riduzioni stimate delle emissioni di CO₂ e PM10 potrebbe determinare soltanto impatto molto contenuto sulla qualità dell'aria complessiva della città di Milano.

Bahmankhah e Coelho (2017) nel loro studio partono dalla considerazione di quanto il traffico stradale, le emissioni di inquinanti e la sicurezza stradale siano sfide fondamentali per la viabilità urbana. In questo contesto il ruolo svolto dalla ciclabilità può essere importante, poiché un aumento della ripartizione modale degli spostamenti effettuati in bicicletta può ridurre in modo significativo le emissioni dovute al trasporto stradale e la congestione del traffico.

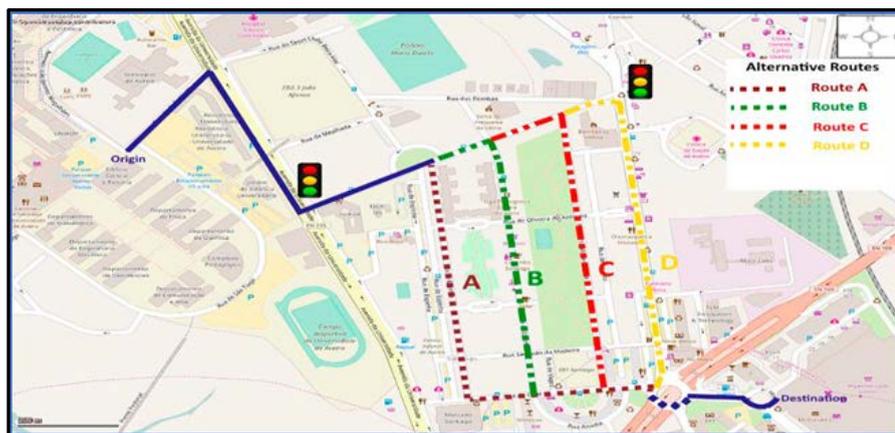
Sono numerose le ricerche che hanno trattato i temi della sicurezza stradale, delle emissioni inquinanti e della congestione stradale, analizzandoli come un problema di

ottimizzazione multi-obiettivo. Tuttavia, si riscontra una carenza di studi che fanno uso di analisi multi-obiettivo che siano “bilanciate”, ovvero che tengano conto in modo simultaneo sia delle esigenze degli utenti della bicicletta, che delle esigenze di chi si sposta in automobile. Pertanto, l’obiettivo di questo studio è quello di ottimizzare la scelta degli spostamenti individuali effettuati in automobile oppure in bicicletta tenendo conto della necessità di ridurre la congestione stradale e degli aspetti legati alla tutela dell’ambiente e della salute. Il risultato finale di questo lavoro vuole essere quello di aumentare l’uso di una modalità di spostamento più sostenibile, come la bicicletta, creando una metodologia che possa assistere nelle proprie scelte sia gli utenti che i decisori politici. Gli autori hanno scelto di impostare il loro studio prendendo in considerazione un sistema stradale urbano il più possibile caratterizzato dalle difficili condizioni riscontrabili nella vita reale, pertanto senza includere nell’analisi piste e percorsi ciclabili.

La metodologia sviluppata è stata applicata ad un caso di studio relativo al sistema urbano della città di Aveiro in Portogallo. Gli autori utilizzano una piattaforma di simulazione su piccola scala (VISSIM) del traffico stradale e delle emissioni derivate a partire dalla potenza specifica dei veicoli (VSP). Grazie all’uso di tale piattaforma viene condotta un’analisi del traffico veicolare, che consente di stimare le emissioni di CO₂ e di NO_x dovute alla circolazione degli autoveicoli nel sistema stradale considerato. Inoltre, gli autori hanno applicato la metodologia SSAM (*Surrogate Safety Assessment Methodology*) per valutare la sicurezza stradale.

Sono stati analizzati quattro itinerari alternativi (A, B, C e D) tra l’area del campus universitario di Aveiro ed un’area commerciale (Figura 5.2).

Figura 5.2. Area oggetto di studio.



Fonte: Bahmankhah e Coelho, 2017.

I movimenti del traffico lungo le strade prese in considerazione (che comprendono due incroci a T, una rotonda ed i quattro itinerari alternativi) sono stati videoregistrati con quattro videocamere e monitorati con due spire conta-traffico. Le videocamere sono state collocate in prossimità degli incroci a T e della rotonda. I dati sono stati raccolti in due giorni distinti, nelle ore di punta del traffico mattutino e pomeridiano, rispettivamente

nelle fasce orarie 9:30 - 11:30 e 17:00 -19:00. Inoltre, mediante l'uso di un dispositivo GPS montato su un autoveicolo e una bicicletta di prova, sono stati raccolti dati relativi alla velocità istantanea di percorrenza e ai tassi di accelerazione e decelerazione.

Grazie ad un codice MATLAB è stato possibile estrarre gli spostamenti di interesse, aventi come origine l'università e come destinazione l'area commerciale e realizzati percorrendo uno dei possibili itinerari, da tutti i movimenti di traffico registrati. Con il modello VISSIM è stato possibile simulare su piccola scala ed in modo accurato i movimenti di traffico sia degli autoveicoli che delle biciclette. Tutte le simulazioni sono state riferite alle due fasce orarie prese in considerazione nello studio.

La valutazione delle condizioni di sicurezza stradale tradizionalmente si basa su un'analisi degli incidenti stradali. Come conseguenza di ciò, il numero di incidenti stradali è stato usato come una misura dell'efficacia che le infrastrutture preposte alla regolazione del traffico hanno nel garantire la sicurezza stradale. La metodologia SSAM consente di analizzare in modo automatizzato i "conflitti stradali", ovvero gli eventi che potenzialmente possono causare incidenti, prendendo in considerazione le traiettorie di automobili e biciclette ottenute come *output* del modello di simulazione del traffico VISSIM. La metodologia SSAM è in grado di valutare, sotto determinate condizioni, quali sono le situazioni potenzialmente pericolose prendendo in considerazione la variabile TTC (*Time To Collision*) che definisce il tempo minimo di collisione osservato durante un conflitto stradale, scegliendo come valore di soglia critica un TTC inferiore ad 1,5 secondi.

La metodologia seguita per la stima delle emissioni di CO₂ e NO_x è basata sulla valutazione della VSP associata alla velocità di percorrenza. Le emissioni dovute al traffico veicolare sono state stimate a partire dai dati di velocità istantanea, utilizzando fattori di emissione specifici che tengono conto della composizione del parco veicolare portoghese composto per il 44,7% di autovetture private alimentate a benzina, per il 34,4% da autovetture private diesel e per il 21% da veicoli commerciali leggeri (sono stati esclusi i bus del trasporto pubblico e i veicoli commerciali pesanti). Poiché l'area di studio si trova su una superficie stradale pianeggiante, la pendenza stradale è stata considerata un fattore trascurabile per la stima delle emissioni.

Al fine di definire uno scenario alternativo in cui gli automobilisti ed i ciclisti scelgono l'itinerario "migliore" nelle fasce orarie considerate in cui si verifica il picco di traffico, si è proceduto ad un'analisi simultanea delle emissioni inquinanti e dei livelli di sicurezza. A tale scopo è stato applicato l'algoritmo NSGA-II (*Fast Non Dominated Genetic Algorithm*), utilizzato spesso nei problemi di ottimizzazione multi-obiettivo. L'algoritmo NSGA-II è stato applicato con l'obiettivo di definire una funzione obiettivo a tre dimensioni per minimizzare simultaneamente i tempi di percorrenza, le emissioni inquinanti ed il numero di conflitti stradali (oppure massimizzando il reciproco del TTC). Sono state prese in considerazione le seguenti funzioni multi-obiettivo: 1) tempo di percorrenza – CO₂ – 1/TTC; 2) tempo di percorrenza – NO_x – 1/TTC; 3) tempo di percorrenza – CO₂ – numero di conflitti stradali; 4) tempo di percorrenza – NO_x – numero di conflitti stradali.

I risultati ottenuti indicano che il percorso A è caratterizzato dal tempo medio di percorrenza minore tra l'origine e la destinazione sia per gli spostamenti in bicicletta (461 secondi), che per quelli in automobili (404 secondi). Per quanto riguarda il tema della sicurezza stradale, poiché il TTC non varia significativamente tra i diversi percorsi (tranne che nel caso del percorso D che rappresenta l'opzione peggiore fra tutte), si è deciso di utilizzare il numero di conflitti per rappresentare il livello di sicurezza stradale. Si è rilevato che il percorso C è quello caratterizzato dalle maggiori condizioni di sicurezza rispetto ai percorsi A, B e D, rispetto ai quali presenta una riduzione del numero di conflitti rispettivamente del 18,7, 22,7 e 92%. Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ e NO_x, il percorso C è caratterizzato dal miglior profilo emissivo, ma anche da un tempo medio di percorrenza di biciclette e autovetture superiore a quello dei percorsi A e B.

Questo studio si è limitato alla scelta degli itinerari ottimali per chi deve spostarsi in bicicletta o in automobile, ulteriori approfondimenti potrebbero includere altre tipologie di mobilità, come gli spostamenti pedonali, ed altri fattori come i costi e le condizioni meteorologiche.

Keall *et al.* (2018) presentano un caso di studio condotto in Nuova Zelanda dove è stato effettuato un intervento per incoraggiare gli spostamenti attivi grazie alla costruzione di infrastrutture ciclabili pedonali. Gli autori hanno calcolato il risparmio di emissioni di CO₂ con uno studio semi-sperimentale, utilizzando i dati sulle distanze percorse registrate dai contachilometri dei veicoli collegati alle patenti di guida registrate sul sistema che amministra le patenti della Nuova Zelanda.

La riduzione delle emissioni di CO₂ conseguente all'incremento della mobilità attiva può essere stimata utilizzando due diversi approcci: attraverso scenari o attraverso una valutazione reale. L'approccio modellistico ha due limiti fondamentali. Lo scenario per modellare le emissioni ha una dubbia validità e mancano metodi per trattare l'incertezza stocastica e parametrica del modello. In secondo luogo, gli studi di modellizzazione non sono in grado di confrontarsi con la realtà della politica. Pochi studi in letteratura hanno analizzato gli impatti degli interventi di promozione della mobilità attiva sulle emissioni di CO₂ nel mondo reale.

I principali dati utilizzati nello studio sono i chilometri percorsi, informazioni derivate dalle patenti di guida. La distanza media giornaliera percorsa dai veicoli può essere derivata dai dati amministrativi raccolti dalla *New Zealand Transport Agency* (NZTA), che registra le letture dei contachilometri delle autovetture, durante le ispezioni periodiche dei veicoli (revisioni); i dati raccolti includono anche i codici postali dei proprietari dei veicoli.

È stato possibile confrontare le distanze percorse dalle autovetture prima e dopo gli interventi di implementazione delle infrastrutture ciclabili e pedonali e in una città in cui non erano stati effettuati interventi utilizzata come controllo. Alcuni dati erano anonimi e non è stato possibile rilevare l'indirizzo; per sopperire tale problematica sono stati utilizzati i dati di un'indagine (*National Zeland Travel Survey*) condotta per verificare i cambiamenti del numero dei veicoli di proprietà. Nell'indagine vi sono anche riportati i dati relativi ai dettagli degli spostamenti.

Il numero dei veicoli analizzati variava da 88.139 nel 2010 a 60.252 nel 2014, e la riduzione è conseguente a modifiche di codificazione dei codici postali. Il numero dei VKT (*vehicle kilometer travelled*) per ogni patente cambiava per due ragioni: diverso livello di utilizzo del veicolo (ad esempio, per effetto della sostituzione della modalità di spostamento) e cambiamenti nella struttura della popolazione (che possono far variare il numero di persone che devono spostarsi). Lo studio ACTIVE⁹⁰ misura le modifiche delle percorrenze che avvengono per la prima delle due ragioni elencate, ovvero quando vi è un incremento di spostamenti in bicicletta o a piedi, in sostituzione degli spostamenti con veicoli a motore. In questo studio gli autori si sono focalizzati sulla misura della media dei VKT annuali per veicolo, che riflette al meglio la sostituzione di modalità di trasporto. A causa delle modifiche dei codici postali, non è stato possibile realizzare, in altro modo, una misura dei VKT totali in modo coerente con l'area in studio.

Le emissioni di CO₂ sono state stimate sulla base di pubblicazioni governative derivate dai consumi di carburante annuali per passeggero e per veicolo. Il livello medio di emissioni per VKT per passeggero è stato stimato dividendo le emissioni totali del settore per il totale dei VKT. Sono stati analizzati anche i dati sul numero e sulla tipologia dei veicoli di proprietà prima e due anni dopo gli interventi infrastrutturali.

I risultati mostrano una riduzione dei VKT del 1,6% dal 2010 al 2014, mentre dal 2011 al 2013 la riduzione è stata dell'1%. Il maggior decremento è stato subito dopo gli interventi effettuati nel 2011.

La riduzione di CO₂ è in media di 0,2359 kg per VKT per la flotta passeggeri della Nuova Zelanda ed è stata calcolata dividendo l'emissione totale stimata di questo settore per il totale dei VKT. Associata alla riduzione totale di VKT all'interno dell'area d'intervento, è stata stimata una riduzione di 3.514 tonnellate di CO₂ in seguito alla realizzazione del progetto, corrispondente ad una riduzione dell'1% espressa come media dei tre anni successivi.

La riduzione dei VKT è coerente con l'incremento osservato della frequenza di trasporto attivo come osservato negli studi precedenti (Keall *et al.*, 2015), che ipotizzava che il trasporto attivo avrebbe sostituito prevalentemente gli spostamenti brevi fatti con l'automobile, con un incremento di circa il 30% del trasporto nelle città dove era stato effettuato un intervento. Tale valore sembra piuttosto grande rispetto al modesto cambiamento dei VKT rilevato in questo studio. Se si considerano gli spostamenti effettuati con veicoli privati inferiori ai 5 km, essi rappresentano il 57% di tutti gli spostamenti effettuati con veicoli privati, ma solo il 13% delle distanze percorse; l'87% è relativo a distanze maggiori. I dati dell'indagine mostrano che l'85% di tutti gli spostamenti nell'area oggetto dello studio erano fatti con veicoli a motore prima degli interventi e che l'aumento

⁹⁰ *Activating Communities to Improve Vitality and Equality*: l'obiettivo dello studio era di comprendere se un'iniziativa combinata del governo centrale e locale per la costruzione di infrastrutture per la mobilità ciclabile e per gli spostamenti a piedi spostasse gli spostamenti da modalità motorizzate (principalmente guida o passeggero di un veicolo a motore) a modalità attive (camminare e andare in bicicletta) e, più in generale, favorisse l'aumento dei livelli di attività fisica.

<http://sustainablecities.org.nz/resilient-urban-futures/active-study-cycling-and-walking/>

del 30% degli spostamenti attivi, che hanno sostituito quelli con mezzo a motore, implica una riduzione del 5,3% del numero di spostamenti motorizzati. Se tutti gli spostamenti motorizzati brevi (inferiori ai 5 km) fossero sostituiti con modalità di trasporto attivo, si avrebbe una riduzione di 1,2% dei VKT, coerente con quanto stimato nello studio più recente di Keall (2018).

La forza dello studio è l'ampiezza del campione (71.000 passeggeri), una città di controllo e un periodo di *follow-up* abbastanza lungo.

La misura media dei VKT potrebbe essere stata influenzata dalle modifiche apportate ai codici di avviamento postale, che potrebbero aver ridotto la media annuale dei VKT misurati. Nell'analisi, il numero dei veicoli di proprietà mostrava una riduzione, anche se non significativa dal punto di vista statistico ($p=0,08$), nell'area di intervento rispetto a quella di controllo. Questo potrebbe aver determinato una sottostima della riduzione delle emissioni di CO₂. Riguardo le implicazioni politiche si rileva che secondo i dati le distanze percorse dai veicoli leggeri nel 2011 erano di 11.780 km. Il risparmio di emissioni associato all'intervento equivale alle emissioni di 1.300 veicoli. Se la stessa riduzione percentuale fosse raggiunta in tutto il Paese, si potrebbero evitare 0,23 milioni di tonnellate di CO₂ nei primi tre anni dopo gli interventi, sostituendo gli spostamenti motorizzati con forme di mobilità attiva.

Lo scopo della ricerca di Astegiano *et al.* (2019) è quello di studiare l'impatto delle forme di mobilità attiva (pedonale e ciclabile, compreso l'uso delle biciclette elettriche), sulle quote di ripartizione modale e sull'emissione di gas serra in un contesto urbano. Lo studio è stato sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca REFLEX (2016-2019) che si prefigge lo scopo di analizzare i modi con cui realizzare, a livello europeo, un sistema energetico a basse emissioni di carbonio con un'attenzione particolare alle opzioni di flessibilità da implementare e l'uso di fonti energetiche rinnovabili. Tale progetto di ricerca si avvale del modello di dinamica dei sistemi denominato ASTRA (*ASsessment of TRAnsport Strategies*) in combinazione con svariati altri modelli relativi alla produzione e al consumo di energia. Tale modello fornisce un approccio generale per simulare gli impatti di diverse strategie sui consumi energetici dovuti ai trasporti e sulle emissioni di carbonio. Sono ancora pochi gli studi nei quali sia stato effettivamente utilizzato un modello di dinamica dei sistemi per studiare il ruolo che la mobilità attiva può avere per ridurre le percorrenze con mezzi motorizzati e le conseguenti emissioni di gas serra, cosicché tale ricerca si ripropone di colmare tale lacuna. In particolare, gli autori si ripropongono di:

- migliorare la rappresentazione delle modalità attive di spostamento nell'ambito delle modalità di trasporto già utilizzate dal modello ASTRA;
- studiare l'impatto della mobilità attiva sulle percorrenze chilometriche effettuate con i mezzi di trasporto motorizzati più tradizionali (autovetture private, mezzi del trasporto pubblico, ecc.);
- calcolare l'impatto conseguente in termini di riduzione di emissioni di gas serra.

Il modello ASTRA, la cui copertura geografica è a scala europea (i Paesi dell'Unione Europa, la Svizzera e la Norvegia), è composto da una serie di moduli o "sotto-modelli": (i) il sotto-modello dei trasporti che simula la distribuzione e lo *split* modale della mobilità delle persone e delle merci; (ii) il sotto-modello della flotta dei veicoli che simula l'evoluzione negli anni delle caratteristiche tecnologiche dei veicoli; (iii) il sotto-modello demografico che simula l'evoluzione socio-economica della popolazione; (iv) il sotto-modello economico che è basato sulla matrice *input-output* dei vari Paesi e simula il rapporto che lega il settore dei trasporti all'intero sistema economico; (v) il sotto-modello ambientale che, oltre alle emissioni inquinanti, calcola tutti i costi esterni attribuibili ai trasporti (emissioni di gas serra, incidenti, qualità dell'aria, ecc.). Tutti questi moduli sono connessi l'uno all'altro cosicché un cambiamento in un sotto-modello può essere trasmesso anche agli altri e creare effetti di *feedback* positivi o negativi. Grazie alla sua multidimensionalità, il modello ASTRA è in grado di simulare un ampio *range* di impatti derivanti dall'applicazione delle misure di politica dei trasporti, essendo in grado di descrivere sia gli impatti direttamente associati alle misure che quelli che ne possono discendere in modo indiretto. La domanda di trasporto passeggeri è generata a livello di unità territoriale statistica NUTS-II ed è suddivisa ulteriormente per fasce chilometriche al fine di descrivere la mobilità interna. La mobilità urbana viene modellizzata suddividendo gli spostamenti per tipologia di zona (basandosi sulla classificazione EUROSTAT denominata "*urban-rural typology*") per fasce chilometriche (ad esempio, inferiore a 3 km, tra 3 e 50 km, ecc.). In questo modo è possibile modellizzare la disponibilità delle diverse modalità di trasporto in modo diverso a seconda del tipo di zona (ad esempio, la metropolitana sarà disponibile soltanto nelle aree urbane) e della fascia chilometrica (ad esempio, le forme di mobilità attiva saranno disponibili soltanto fino ad una certa distanza ma non oltre).

Con questo studio, l'uso della bicicletta elettrica è stato aggiunto alle modalità di trasporto utilizzabili per rappresentare la mobilità urbana e suburbana con il modello ASTRA. In particolare, l'uso delle biciclette elettriche è stato incorporato nel modello con riferimento ai seguenti spostamenti distanze:

- spostamenti locali (relativi a distanze inferiori a 3 km): in questo caso le biciclette elettriche sono in competizione con autovetture private, bus, tram/metro, *car sharing*, biciclette tradizionali, pedonalità;
- spostamenti di piccolo raggio (relativi a distanze tra 3 e 50 km): in questo caso le biciclette elettriche sono in competizione con autovetture private, bus, tram/metro, treno, *car sharing*, biciclette tradizionali.

La versione aggiornata del modello ASTRA considera le biciclette elettriche, le biciclette tradizionali e la pedonalità come tre modalità attive di spostamento distinte, mentre la versione precedente considerava soltanto la pedonalità e le biciclette tradizionali come un'unica modalità.

L'uso delle biciclette elettriche è stato simulato considerando gli aspetti chiave di tale servizio (costi, caratteristiche tecniche, ecc.) e i fattori che ne possono agevolare la diffusione (ad esempio, i profili di utilizzo, i *pattern* di mobilità, ecc.).

Il modello ASTRA calcola lo spostamento modale in modo separato per ciascun dominio spaziale, ad esempio, per la mobilità urbana prende in considerazione una suddivisione per fasce chilometriche interne al livello di classificazione NUTS-II ulteriormente suddivise tra distanze relative a spostamenti locali o di piccolo raggio.

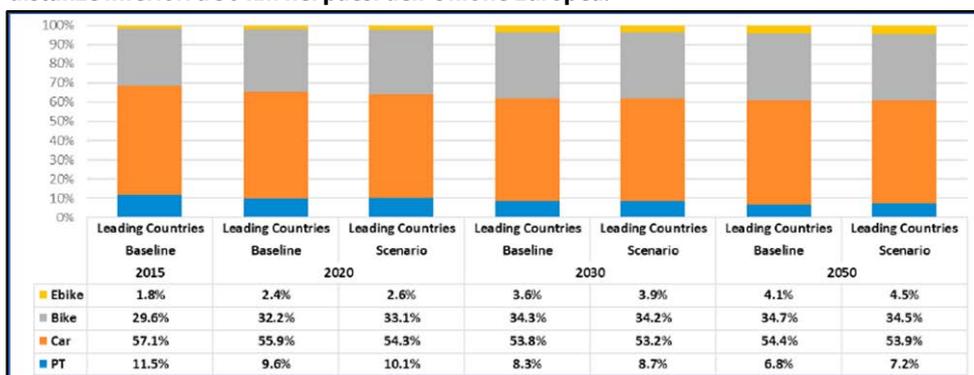
La raccolta dei dati si è focalizzata su due set diversi di informazioni: l'attuale ripartizione modale delle forme di mobilità attiva – comprese le biciclette elettriche – nei diversi Paesi europei e le emissioni di gas serra attribuibili alle biciclette elettriche.

Conclusa la fase di acquisizione dei dati, il modello ASTRA è stato utilizzato per (i) definire uno scenario *baseline* fino al 2050 e (ii) studiare l'effetto di una politica di tariffazione stradale.

Il primo obiettivo è stato quello di creare uno scenario *baseline* che includesse anche l'uso delle biciclette elettriche dal 2015 sino al 2050. Poiché i dati statistici ufficiali più recenti relativi alla ripartizione modale delle biciclette elettriche si riferiscono al 2015, si è adottato tale anno come anno base di riferimento nello studio. Il passo successivo è stato quello di definire uno scenario di *policy*, in cui l'uso delle autovetture private fosse penalizzato dall'adozione di un sistema di pedaggi per i veicoli che volessero accedere ad una vasta area urbana a partire dal 2020. Più precisamente, si è ipotizzato un pedaggio forfettario di 4,5 €/viaggio per le autovetture private (escludendo bus e veicoli commerciali preposti alla movimentazione delle merci), con un orario di funzionamento giornaliero (ad esempio, dalle otto di mattina alle otto di sera) e valevole soltanto per la zona più centrale di una città, analogamente a quanto accade, ad esempio, nel centro di Milano.

I risultati dei due scenari (quello *baseline* e quello con l'introduzione della politica di pedaggi) sono stati aggregati a livello europeo, suddivisi su base annuale e riferiti a spostamenti che coprano distanze inferiori ai 50 km. Le modalità di spostamento prese in considerazione sono: automobile; bicicletta tradizionale; trasporto pubblico (bus locali, tram, metro, treno); bicicletta elettrica (con velocità massima di 25 km/h). La Figura 5.3 riporta la ripartizione modale aggregata a livello europeo sia per lo scenario *baseline* che per quello con i pedaggi.

Figura 5.3 – Scenari *baseline* e con pedaggi: ripartizione modale degli spostamenti relativi a distanze inferiori a 50 km nei paesi dell'Unione Europea.



Fonte: Astegiano et al., 2019.

I risultati del modello mostrano la stima del probabile impatto generato dalla diffusione dell'uso delle biciclette elettriche: da un lato si riduce la quota modale delle autovetture e del trasporto pubblico e dall'altro si riscontrano effetti positivi per altre modalità di trasporto attivo (ad esempio, le biciclette). Nello scenario, che prevede l'introduzione dei pedaggi, l'uso delle autovetture diminuisce a favore delle forme di mobilità attiva e del trasporto pubblico, mentre nello scenario *baseline* le biciclette elettriche assorbono una quota modale dal trasporto pubblico maggiore rispetto a quella assorbita dalle autovetture. Nello scenario che prevede i pedaggi l'impatto sul trasporto pubblico e le autovetture è più bilanciato. Analoghe elaborazioni sono state effettuate riportando i risultati dei due scenari per gruppi di diversi Paesi.

Oltre ai benefici associati alla riduzione dei consumi energetici e della congestione del traffico, un aumento delle modalità attive di trasporto, nelle aree urbane, può contribuire a ridurre le emissioni di gas serra e delle altre sostanze inquinanti (CO, NO_x, PM, VOC). Gli impatti ambientali delle biciclette elettriche dipendono in grande misura dalla forma di mobilità cui vanno a sostituirsi e nei casi in cui sostituiscano modalità di spostamento completamente non motorizzate (ad esempio, gli spostamenti pedonali o in bicicletta), il risultato netto è un impatto negativo sull'ambiente. In ogni caso, le biciclette elettriche generalmente sono caratterizzate da un'efficienza energetica molto elevata grazie al loro peso contenuto ed alla tecnologia di azionamento elettrico. Infatti, la maggior parte delle biciclette elettriche consuma meno di 2 kWh/100 km, circa un decimo del consumo energetico di una piccola autovettura ad alimentazione elettrica, ed è responsabile di un quantitativo di emissioni di anidride carbonica (emesse dalle centrali di produzione dell'energia elettrica) che è circa 40 volte inferiore a quello emesso da un'autovettura privata a parità di percorrenza.

I consumi di carburante, le emissioni di gas serra, le emissioni di inquinanti atmosferici, gli incidenti, le esternalità ad essi connesse vengono calcolate dal modulo atmosferico del modello ASTRA che a sua volta utilizza come dati di *input* gli autoveicoli/km percorsi per tipologia e contesto geografico restituiti dal modulo dei trasporti e la composizione tecnica della flotta di veicoli restituita dal modulo della flotta veicolare. Nello studio vengono calcolate soltanto le emissioni a caldo emesse durante il ciclo di guida che, per le biciclette elettriche, vengono considerate nulle. In termini generali, per ciascuna modalità di trasporto la stima delle emissioni a caldo è ottenuta moltiplicando il fattore di emissione relativo ad una certa tecnologia/standard emissivo e ad una determinata fascia di percorrenza per la relativa composizione della flotta veicolare in una data area geografica ed i corrispondenti autoveicoli-km percorsi.

Mediante l'applicazione del modello è stata stimata la riduzione, rispetto allo scenario *baseline*, delle emissioni di gas serra e degli altri inquinanti atmosferici per effetto dell'introduzione del sistema di pedaggi applicata a spostamenti urbani di distanza inferiore a 50 km a partire dal 2020. La riduzione maggiore delle emissioni viene ottenuta nel 2020 (-0,7% per la CO₂; -0,4% per il CO; -0,8% per gli NO_x; -0,4% per i VOC; -0,7% per il PM), il che è coerente con la maggiore riduzione di quota modale delle autovetture riscontrata proprio nel 2020.

In definitiva, i risultati del modello indicano un possibile impatto positivo dell'uso delle biciclette elettriche nella riduzione della ripartizione modale delle modalità di trasporto motorizzato e tale riduzione risulta maggiore ipotizzando uno scenario che prevede l'introduzione di un sistema di pedaggi.

Lo studio di Neves e Brand (2019) è motivato dalla crescente attenzione nei confronti del ruolo che la mobilità dolce può avere per ridurre le emissioni di gas serra (GHG), in modo particolare per quanto riguarda gli spostamenti su brevi distanze. Dall'analisi degli studi di letteratura dedicati all'argomento, emerge come ancora non sia stato investigato in modo sufficiente il potenziale che la mobilità pedonale e ciclabile possono avere nel sostituire l'uso dei mezzi di trasporto più convenzionali, soprattutto su scala locale, e quindi la loro capacità di contribuire a ridurre le emissioni di gas serra. Lo scopo di questo articolo è di analizzare nel dettaglio la capacità potenziale di riduzione delle emissioni di GHG espresse sotto forma di CO_{2eq} attribuibile alla mobilità pedonale e ciclabile per spostamenti di breve distanza. L'indagine utilizza i dati raccolti con uno studio osservazionale su 50 partecipanti nella città gallese di Cardiff ed i risultati forniscono elementi utili a comprendere le abitudini di viaggio dei partecipanti e i possibili guadagni in termini di riduzioni delle emissioni di CO_{2eq} dovute al trasporto stradale.

Sono stati selezionati 50 abitanti della città gallese di Cardiff. Per ciascun partecipante sono state raccolte informazioni quantitative relative ai comportamenti di viaggio dei partecipanti per mezzo di dispositivi GPS e di diari di viaggio compilati settimanalmente. In aggiunta, sono stati raccolti dati di tipo qualitativo attraverso delle interviste dei partecipanti. Le osservazioni sono state ripetute per una settimana, una prima volta nel 2011 ed una seconda volta nel 2012 nella stessa stagione dell'anno precedente (aprile-luglio).

Durante due periodi di osservazione sono stati raccolti i dati relativi a 2.664 spostamenti dei 50 partecipanti all'indagine. In media, il numero di spostamenti effettuati in un giorno è stato di 3,8 (IC al 95% di $\pm 0,4$) corrispondenti ad una percorrenza media giornaliera di 37,8 km (IC al 95% di $\pm 11,1$). La maggior parte degli spostamenti è avvenuta nell'area della città di Cardiff ed hanno coperto una distanza inferiore agli 8 km (77%). Gli spostamenti sono stati classificati in funzione dello scopo del viaggio ed in sette categorie corrispondenti ai km percorsi (<1,6; 1,6-4,8; 4,8-8; 8-16; 16-40; 40-80; >80). Gli spostamenti effettuati in automobile sono stati i più frequenti (circa il 60%), seguiti dagli spostamenti pedonali (29%), da quelli effettuati in bicicletta (6%) e da quelli effettuati con il trasporto pubblico (5%). Il 59% degli spostamenti è stato relativo ad una distanza inferiore a 4,8 km. La percentuale degli spostamenti in bicicletta è stata pressoché costante per tutte gli spostamenti di breve o media durata (sino a 16 km) mantenendosi tra lo 0,6% e l'1,4%. Gli spostamenti in automobile sono stati i più frequenti tra quelli relativi a distanze superiori ad 1,6 km con un 30% di essi relativi a distanze inferiori ai 4,8 km.

I dati hanno mostrato che la distanza media coperta dagli spostamenti pedonali e ciclabili è stata rispettivamente di 1,6 km (n = 770) e 6,6 km (n = 103). Avendo scelto come ipotesi operativa quella di definire come "spostamenti brevi" quelli corrispondenti a distanze non

superiori a 4,8 km, i risultati confermano la capacità potenziale della mobilità dolce nel sostituire la mobilità su quattro ruote, soprattutto per quanto riguarda la mobilità ciclabile. Il numero totale di spostamenti brevi registrati nello studio è stato di 1.566 (58,8%).

Circa la metà (47,7%; n = 798) degli spostamenti in automobile è stata di breve durata coprendo una distanza inferiore a 4,8 km. Di questi spostamenti brevi, la maggior parte di essi (46,6%) è stata originata da esigenze legate allo shopping e da altre motivazioni personali (visite mediche, uffici postali, ecc.). Ulteriori motivazioni hanno riguardato attività di tipo sociale (17,4%) ed attività ricreative (13,9%). Gli spostamenti casa-scuola e casa-lavoro sono stati il 19% degli spostamenti.

La comprensione delle caratteristiche degli spostamenti è un elemento importante nel valutare i possibili trasferimenti modali, dato che gli spostamenti sono spesso connessi ad altri spostamenti e le scelte di mobilità solitamente vengono fatte tenendo conto di tutta la sequenza di viaggi. Gli autori definiscono come "catena di viaggio" una serie di spostamenti che cominciano ed hanno termine nella propria abitazione. Analizzando i dati raccolti, sono state identificate 1.010 catene di viaggio che hanno coinvolto tutte le modalità di spostamento. Di queste, 612 sono state effettuate mediante l'uso dell'automobile ed il 68,9% era di lunghezza inferiore a 12,8 km. Le catene di viaggio hanno coperto una distanza media di 37,5 km. Ogni spostamento che non fosse parte di una catena di viaggio di almeno 12,8 km e che fosse di lunghezza inferiore 4,8 km è stato escluso dall'analisi perché si è pensato che non fosse possibile realizzare uno *shift* modale per spostamenti di breve durata che non fossero parte di spostamenti più ampi. Pertanto, sono stati presi in considerazione 550 spostamenti in automobile potenzialmente sostituibili con forme di mobilità attiva.

Anche le motivazioni degli spostamenti possono avere un ruolo importante nelle scelte di viaggio su brevi distanze. Gli autori hanno eliminato dall'analisi tutti gli spostamenti brevi in automobile nei quali il partecipante non fosse anche il guidatore (n = 83), quelli effettuati per accompagnare ed andare a riprendere qualcuno (n = 87) e quelli fatti per andare a fare shopping all'interno di grandi aree commerciali (n = 54). Gli spostamenti brevi in automobile verso esercizi commerciali locali o per motivi personali sono stati mantenuti nell'analisi avendo ipotizzato che quando ci si sposta per fare acquisti vicino casa lo si fa più frequentemente e trasportando pochi beni ad ogni viaggio, cosicché dovendo trasportare un carico poco pesante le persone potrebbero fare quello spostamento presumibilmente anche a piedi o in bicicletta. Applicando anche questi criteri, gli autori ottengono che il 41% di tutti gli spostamenti brevi in automobile poteva essere considerato potenzialmente sostituibile da uno spostamento a piedi o in bicicletta. Si noti che circa il 25% di tutti gli spostamenti brevi in automobile osservati era relativo ad una distanza inferiore di 1,6 km (n = 198) e pertanto percorribile a piedi.

In definitiva, il 59% degli spostamenti registrati nelle due campagne di osservazione è stato relativo a distanze inferiore a 4,8 km ed il 49% di tutti gli spostamenti in automobile hanno coperto meno di 4,8 km. Le ragioni principali che hanno indotto i partecipanti ad utilizzare l'automobile per spostarsi su brevi distanze comprendono la necessità di rispettare vincoli

temporali, la convenienza, la necessità di trasportare carichi pesanti, necessità di accompagnare altri passeggeri o i bambini a scuola, la carenza altre di modalità di trasporto accettabili ed una maggiore sicurezza percepita. Prendendo in considerazione i vincoli derivanti dall'appartenenza degli spostamenti ad una catena di viaggio e quelli derivanti dagli obiettivi degli spostamenti, gli autori concludono che circa il 41% dei viaggi brevi in automobile (che corrisponde al 4,5% di tutti i viaggi in automobile) potrebbe essere sostituito da spostamenti effettuati con forme di mobilità attiva.

Le emissioni di CO_{2eq} dovute agli spostamenti in automobile sono state calcolate prendendo in considerazione percorrenze registrate e moltiplicandole per i fattori di emissioni specifici per anidride carbonica, metano ed ossidi di azoto differenziati per tipologia di motorizzazione e velocità. Più nel dettaglio, le emissioni di CO_{2eq} dovute alle autovetture private sono state calcolate sulla base delle distanze percorse (ottenute dai dispositivi GPS e dai diari di viaggio) che sono state poi convertite in emissioni utilizzando dei fattori di emissione che tengono conto della potenza del motore, del tipo di alimentazione (benzina, diesel, ibrido elettrica, ecc.), della velocità media (ottenuta grazie ai dati GPS), l'età dei veicoli ed il numero di partenza "a freddo" (che causano maggiori emissioni dovute ad un consumo di carburante non ottimale).

La capacità potenziale, della mobilità pedonale e ciclabile, di mitigare le emissioni di CO_{2eq}, è stata stimata simulando dei viaggi in automobile analoghi con stessa origine e destinazione. Le emissioni evitate sono state calcolate sulla base delle caratteristiche delle automobili dei rispondenti (potenza del motore, tipo di alimentazione, età del veicolo), ipotizzando un ciclo di guida urbano con una velocità media di 40 km/h ed aggiungendo un fattore correttivo dovuto alle possibili partenze "a freddo" calcolato sulla base del numero di viaggi in automobile, sulla temperatura ambientale (si è tenuto conto di una temperatura media annuale di 11°C) e della distanza media percorsa in automobile. Per ottenere un totale emissivo annuale, la CO_{2eq} emessa, stimata su base settimanale, è stata moltiplicata per 47 anziché 52. Infatti, poiché la raccolta dei dati è avvenuta tra aprile e luglio nel 2011 e nel 2012, si è fatta l'ipotesi di non considerare 5 settimane nel conteggio annuale per tener conto di eventuali ferie, vacanze scolastiche, ecc.

I risultati indicano che gli spostamenti effettuati dai 50 partecipanti sono stati responsabili complessivamente dell'emissione di 2,86 tonnellate di CO_{2eq} prendendo in considerazione entrambi i periodi di studio del 2011 e del 2012. Questo dato corrisponde ad un'emissione settimanale media di 28,6 kg di CO_{2eq} (IC 95% di 21,1-37,1) per partecipante e, corrispondentemente, ad un'emissione annuale media di 1,35 tonnellate di CO_{2eq} per partecipante. Come era ragionevole attendersi, gli spostamenti in automobile sono stati all'origine della maggior parte delle emissioni di CO_{2eq} essendo responsabili di una percentuale di circa il 90% di tutte le emissioni causate dagli spostamenti di superficie (con un'emissione settimanale media di 25,8 kg di CO_{2eq} per persona).

Prendendo in considerazione le motivazioni degli spostamenti, i risultati mostrano che i viaggi per shopping e motivi personali (effettuati con maggior frequenza ma per coprire distanze inferiori) emettono meno CO_{2eq} di quelli effettuati per andare al posto di lavoro o

per scopi sociali o ricreativi. Inoltre, si è riscontrato che una piccola parte di partecipanti (20%) è stata responsabile di una gran parte delle emissioni di CO_{2eq} (55%).

Gli spostamenti brevi in automobile hanno contribuito ad emettere settimanalmente 2,8 kg di CO_{2eq} per persona, corrispondenti al 10,9% di tutte le emissioni dovute agli spostamenti in automobile. Ovviamente gli spostamenti più lunghi (su una distanza maggiore di 80 km) sono stati quelli responsabili della quota percentuale maggiore di emissioni di CO_{2eq} (44%).

Gli autori hanno stimato che se la quota (41%) di spostamenti brevi effettuata in automobile considerata potenzialmente sostituibile con spostamenti effettuati con bicicletta o a piedi fosse effettivamente realizzata con forme di mobilità attiva si otterrebbe una riduzione delle emissioni di CO_{2eq} dovute al trasporto autostradale del 4,5% corrispondente a 1,15 kg di CO_{2eq} emesse in meno da una persona in una settimana. Tale riduzione equivale al 4% delle emissioni di CO_{2eq} dovute a tutti i trasporti di superficie.

Sulla base delle osservazioni dei *pattern* di spostamento è stato possibile valutare il quantitativo di emissioni di CO_{2eq} evitate grazie agli spostamenti effettuati con forme di mobilità attiva dai partecipanti: le emissioni dovute al trasporto stradale sarebbero aumentate del 4,9% se tali spostamenti fossero stati fatti in automobile anziché a piedi o in bicicletta.

I risultati ottenuti hanno indicato che le forme di mobilità attiva costituiscono un'alternativa potenzialmente significativa alla mobilità motorizzata per realizzare percorsi di breve durata, con un impatto considerevole sulle emissioni di anidride carbonica dovute agli spostamenti personali.

Smargiassi *et al.* (2020) hanno confrontato il numero di viaggi e le distanze per diverse modalità di trasporto, stimando l'impatto sui livelli di inquinamento atmosferico e sulla salute, mettendo a confronto uno scenario *Business As Usual* e uno scenario ideale con elevata densità urbana e ridotta quota di auto private (76%-62% nei sobborghi; 55%-34% nelle aree urbane) nella regione di Montreal (GMR – *Great Montreal Region*) nel 2061.

In particolare, sono stati considerati gli impatti negativi relativi a incidenti stradali dei pedoni/ciclisti e agli infortuni degli occupanti dei veicoli, gli impatti sulla morbilità e mortalità conseguente all'esposizione all'inquinamento atmosferico, e i benefici per la salute legati al trasporto attivo. Sono state anche stimate le modifiche di tali impatti dall'anno 2031 all'anno 2061.

Sono stati confrontati, per un giorno della settimana, il numero di viaggi e le distanze percorse con le diverse modalità, e gli impatti sull'ambiente e sulla salute in due regioni della GMR (centro e periferia), per tre scenari per l'anno 2061: un Y2061 *business as usual*, e scenari ottimali con, e senza telelavoro. Nello scenario ottimale viene stimata una crescita dal 27 al 45% di telelavoro.

È stata esaminata la popolazione di 87 comuni usando un modello demografico e proiezioni di crescita della popolazione per i due scenari Y2061 e Y2031. Gli spostamenti sono stati poi distribuiti per modalità secondo la quota modale degli scenari Y2061, e le

distanze percorse sono state stimate, sommando le distanze percorse nei vari comuni. Sono stati stimati il numero degli spostamenti nel 2061 in base al fattore di crescita della popolazione e alla stima di incremento di telelavoro/*smart working*.

Per la stima delle distanze (chilometri percorsi in auto - *vehicle km travelled*) all'interno dei comuni nell'anno Y2061, secondo l'aumento della popolazione per comune di residenza in Y2061 vs Y2031, sono stati utilizzati i km per ogni viaggio in auto sulla rete stradale percorsa da ogni individuo (ponderato con i pesi individuali Y2031 per rappresentare la popolazione).

Gli spostamenti dell'anno 2031 secondo la scelta modale e le distanze sono stati utilizzati per stimare quelli dell'Y2061. Sono quindi stati stimati i km effettuati in macchina e in autobus. Le distanze percorse in autobus non sono state utilizzate per modellare i livelli di NO₂ presupponendo che tutti i nuovi autobus saranno elettrici dopo il 2025.

Le distanze percorse a piedi e in bicicletta sono state calcolate per comune di residenza in modo simile a quelle percorse in autobus. Le distanze percorse (Y2061/Y2031) sono state utilizzate per stimare rischi di incidenti. Inoltre, per valutare i benefici per la salute dell'attività fisica, i chilometri percorsi sono stati calcolati non solo per le tre regioni, ma per gruppi di età e sesso.

Sono state stimate le emissioni di biossido di azoto (NO₂) e di anidride carbonica (CO₂), la modellazione della dispersione di NO₂ è stata utilizzata per stimare le concentrazioni.

Per la stima delle emissioni in atmosfera sono stati utilizzati i dati delle immatricolazioni dei veicoli della *Société de l'Assurance Automobile du Québec* (SAAQ) per stimare la distribuzione nel 2061 per gli scenari BAU e Ottimale.

Per la stima delle emissioni è stato usato il modello EPA MOVES (*MOTOR Vehicle Emission Simulator*) al fine di generare fattori di emissione per Y2031 per gli ossidi di azoto (NO_x) e gas a effetto serra, biossido di carbonio equivalente (CO_{2eq}) in g/km/veh, riflettendo la distribuzione dei veicoli di proprietà.

Moltiplicando i fattori di emissione con i VKT percorsi per comune, sono state stimate le emissioni in g/km di strada per comune per gli scenari Y2061 BAU e *Optimal*. In entrambi gli scenari, è stato assunto che tutti i veicoli fossero convenzionali, vale a dire con motori a combustione interna, inoltre, è stata effettuata un'analisi di sensibilità in cui è stato ipotizzato un 50% di veicoli elettrici.

Tutte le emissioni di NO_x sono state ridotte della metà. Per stimare le emissioni di gas serra associate ai veicoli elettrici, è stato calcolato un tasso medio di consumo energetico, che è stato moltiplicato per l'intensità media di gas serra della produzione di elettricità in Quebec (Hydro-Québec, 2017).

Mentre le emissioni totali di CO_{2eq} degli scenari erano sufficienti per analizzare l'effetto di ogni scenario sulle future emissioni regionali di gas serra, le emissioni di NO_x sono utili solo per stimare gli effetti sulla qualità dell'aria. Poiché in Y2061, le emissioni correlate ai VKT e quindi di NO_x sono state stimate a livello di ogni comune, era importante distribuirle sulla

rete stradale al fine di stimare le concentrazioni di NO₂ utilizzando un modello di dispersione, con un livello fine di risoluzione. Il modello di dispersione CALPUFF è stato utilizzato per stimare le concentrazioni di NO₂ in tutto il dominio di studio. La concentrazione media di NO₂ per zona di analisi del traffico (TAZ) è stata utilizzata per rappresentare l'esposizione della popolazione nella TAZ.

Sono quindi stati stimati gli impatti negativi sulla salute dell'esposizione all'inquinamento atmosferico e degli incidenti stradali e gli impatti positivi della mobilità attiva. Per stimare l'impatto negativo dell'esposizione a NO₂ è stata utilizzata una funzione di rischio per la mortalità cardiovascolare e di attacchi di asma. Per la stima dei benefici della mobilità attiva sono state utilizzate funzioni che correlano gli equivalenti metabolici al rischio cardiovascolare, di diabete di tipo II, di cancro del polmone e del colon.

L'uso degli spostamenti a piedi e del trasporto pubblico e le corrispondenti distanze percorse a piedi nell'anno 2061 sono superiori del 70% per lo scenario ideale rispetto al BAU, mentre la quota di spostamenti in auto e le distanze sono inferiori del 40%. I livelli di NO₂ sono leggermente inferiori nello scenario ideale rispetto al BAU, ma sempre più elevati nel centro urbano.

Le emissioni di gas serra di Y2061 risultano più basse per il BAU con alta penetrazione dei veicoli elettrici (circa il 50%) e per lo scenario ottimale (con elevata densità urbana e minore utilizzo modale dell'auto) che ha considerato solo l'efficienza del carburante e le tecnologie di controllo delle emissioni fino all'anno 2031.

Gli impatti sulla salute, riassunti con la disabilità (anni di vita aggiustati per disabilità - DALY), differiscono tra le aree urbane e suburbane, ma globalmente, lo scenario ideale riduceva gli impatti del BAU Y2061 del 33% DALY. Le percentuali di viaggi in auto e in treno sono simili per lo scenario Y2031 e Y2061 BAU ma i chilometri percorsi in auto, e le emissioni di CO₂ e NO₂ sono aumentate, a causa dell'aumento della popolazione.

Rispetto al BAU, il numero di auto e l'utilizzo del trasporto pubblico del BAU Y2061 erano abbastanza simili, ma i chilometri percorsi in auto e con il trasporto pubblico erano aumentati. Per quanto riguarda il confronto tra lo scenario Y2031 Central e lo scenario Y2061 *Optimal* (con elevata densità del centro urbano e cambiamenti nelle quote modali), i chilometri percorsi in auto sono diminuiti (soprattutto nei sobborghi) e i chilometri percorsi con il trasporto pubblico sono aumentati (soprattutto nel centro urbano). Anche la spesa sanitaria totale è aumentata di circa l'11% dal BAU Y2031 rispetto al BAU Y2061.

Misure drastiche per diminuire la quota di auto sembrano necessarie per ridurre la quota di auto e la densificazione nelle aree urbane e ridurre in modo rilevante gli impatti del trasporto.

Lo studio di Pérez-Neira *et al.* (2020) analizza i principali driver e gli aspetti critici della mobilità presso l'Università di León (ULE) in Spagna e il suo potenziale di mitigazione dei gas serra. Attraverso l'implementazione di un'analisi del ciclo di vita (approccio *door-to-door well-to-wheel*), sono state esaminate le relazioni esistenti tra distribuzione modale,

distanze, tempi di viaggio, struttura urbana, impronta di carbonio diretta e indiretta e costi monetari di pendolarismo degli utenti ULE.

Il lavoro aveva un duplice obiettivo:

1. analizzare i modelli di comportamento modale nel pendolarismo universitario quotidiano per stimare le sue implicazioni climatiche ed economiche (spesa degli utenti) e, sulla base di questo
2. valutare la potenziale riduzione delle emissioni di gas serra in relazione ai cambiamenti nelle (i) modalità di viaggio (maggiore uso di autobus, biciclette e *car sharing*), (ii) miglioramenti tecnologici (miglioramento dell'efficienza e uso di auto elettriche) e (iii) la combinazione dei due (maggiore uso di biciclette elettriche).

Le informazioni sono state raccolte con un sondaggio online gestito con il software LIME SURVEY e inviato a tutti gli utenti ULE. Il sondaggio aveva due sezioni: la prima era progettata per identificare gli intervistati, raccogliendo dati come il sesso, il legame con l'Università, e il centro di studio o di lavoro; la seconda sezione si concentrava sulle abitudini di mobilità e comprendeva sette sottosezioni con domande sulle abitudini attuali e gli ostacoli per cambiarle.

Dalle informazioni raccolte, la mobilità degli utenti ULE è stata valutata con un approccio multidisciplinare che ha considerato viaggi da e verso l'università secondo uno schema porta a porta. Oltre al *software* GIS, è stato usato uno strumento metodologico basato sui seguenti indicatori: a) la distribuzione modale (a piedi, in bicicletta, in autobus, in auto moto e treno); b) distanza di viaggio (chilometri); c) tempo di viaggio (minuti); d) costi monetari (euro); e) emissioni di gas serra (kg CO_{2eq}) associati a questi viaggi. Il numero di spostamenti di ogni individuo e la distribuzione modale di ogni individuo sono stati raccolti come dati primari, mentre le distanze (da e verso, che non necessariamente coincidono) sono state stimate con l'aiuto di uno strumento di informazione geografica chiamato CartoCiudad (www.cartociudad.es), che fornisce informazioni dettagliate sulle direzioni e sulla rete stradale urbana e periurbana a livello statale con una struttura topologica generata da GIS costruita su dati ufficiali per la Spagna.

L'indicatore di base utilizzato per calcolare le emissioni di gas serra della mobilità all'ULE era il totale dei passeggeri-chilometri (pkm) per modalità di trasporto. In alternativa, il totale dei veicoli-chilometri (vkm). Dall'indicatore pkm, l'impronta di carbonio (CF) è stata stimata implementando la metodologia LCA. L'analisi economica è stata eseguita implementando la metodologia ciclo di vita (LCC).

Sono stati definiti sette scenari alternativi e raggruppati in tre gruppi al fine di valutare la possibile riduzione di emissioni in relazione ai cambiamenti nel: (i) comportamento di viaggio - una sfera sulla quale su cui l'Università può esercitare la sua influenza; (ii) miglioramenti tecnologici, come risultato delle politiche governative focalizzate al raggiungimento degli obiettivi europei di decarbonizzazione; e (iii) una combinazione delle due. All'interno di ogni scenario, il potenziale di riduzione delle emissioni totali di gas

serra e il corrispondente effetto sul costo monetario totale sono stati valutati secondo tre o quattro sotto-scenari che riflettono cambiamenti graduali classificati in base all'impatto.

La modalità di viaggio più spesso utilizzata per recarsi all'ULE è stata a piedi, seguita dall'utilizzo dell'auto e della bicicletta (rispettivamente 41,5%, 34,2% e 13,8% del totale dei viaggi). I pendolari che hanno scelto di camminare o andare in bicicletta hanno coperto distanze più brevi (1,90 e 2,77 km, rispettivamente) rispetto a quelli che hanno scelto modi motorizzati come la moto o l'auto (4,90 e 12,40 km, rispettivamente).

Andare a piedi o in bicicletta all'università non ha implicazioni dirette sul clima o sull'economia. Al contrario, guidare un'auto ha generato emissioni medie di 2,29 kg di CO_{2eq} per viaggio, molto più alte di quelle prodotte dall'autobus (0,39 kg di CO_{2eq}) o dalla bicicletta (0,33 kg di CO_{2eq}). In termini economici, il costo medio diretto del pendolarismo in autobus è stato stimato a 0,79 € per viaggio, che era anche superiore a quelli ottenuti per le auto e le moto (0,69 € e 0,33 € per viaggio, rispettivamente).

Il 94% del numero totale di viaggi è stato effettuato entro un raggio di 6 km. I principali ostacoli all'uso dell'autobus dichiarate dagli utenti ULE sono la bassa frequenza del servizio (secondo il 41,3% degli intervistati) e il suo costo (31,3%), mentre per l'uso della bicicletta le barriere sono legate alla sicurezza delle aree di parcheggio (45,6%) e, soprattutto, lo stato e la sicurezza delle piste ciclabili (52,1%).

I risultati del calcolo dei dati del campione settimanale per l'intera popolazione e l'anno accademico di riferimento sono 5,36 milioni di viaggi, 31,03 milioni di passeggeri-chilometri e 5,0 milioni di tonnellate di CO_{2eq}, le automobili sono responsabili di circa il 95% delle emissioni. L'80,4% delle emissioni sono state generate durante il viaggio, mentre il restante 16,1% erano emissioni indirette prodotte in altre fasi del sistema di trasporto.

Un cambiamento modale e tecnologico che promuova un aumento del 25% nell'uso di biciclette elettriche permetterebbe di coprire distanze maggiori con il 12,4% di emissioni in meno rispetto allo scenario iniziale. La combinazione di misure migliorerebbe questi risultati. Per esempio, se il 25% delle distanze tra 0 e 6, tra 6 e 12, e >12 km fossero percorse in bicicletta muscolare o elettrica, le emissioni diminuirebbero del 18%. In termini economici, è importante sottolineare il potenziale di risparmio del *car sharing* e anche, in misura minore, di un aumento dell'uso del trasporto pubblico e delle biciclette elettriche.

Anche se la maggior parte delle distanze percorse per raggiungere l'Università è inferiore a 6 km (94,3% dei pendolari), l'uso dell'auto privata è secondo per importanza (34%) dopo il viaggio a piedi (41,5%), ed è il principale *hotspot* in termini di inquinamento ambientale (le automobili sono responsabili di circa il 95% delle emissioni di gas serra). I risultati mostrano come le politiche universitarie focalizzate sul miglioramento delle abitudini di mobilità (maggiore uso di autobus, biciclette e spostamenti a piedi) possono ridurre notevolmente le emissioni di gas serra in un intervallo di distanza di 0-6 km. Per esempio, la sostituzione delle auto con le biciclette (50% nelle distanze <4 km) ridurrebbe le emissioni di CO_{2eq} del 17,5% e aumenterebbe il risparmio monetario del 14,8%. Tuttavia, il 5,8% dei viaggi rimanenti (> 6 km) causa il 49,4% delle emissioni. Oltre questa distanza, le

politiche orientate al comportamento si rivelano insufficienti e sono necessarie anche azioni e misure ad altri livelli che incoraggino il cambiamento tecnologico (uso di auto elettriche e biciclette, ecc.) e il miglioramento delle infrastrutture.

Philips *et al.* (2022) nel loro studio, hanno stimato la massima capacità di risparmio di CO₂ conseguente all'utilizzo di *e-bike* come modalità di spostamento sostitutiva dei viaggi in auto. Nello studio è stata utilizzata la microsimulazione spaziale (conosciuta anche come sintesi della popolazione) per generare una popolazione rappresentativa di individui.

La microsimulazione spaziale collega i dati del censimento di piccole aree a dati anonimi per simulare una popolazione di individui per ogni piccola sezione nell'area di studio. Una volta generate, le caratteristiche della popolazione sintetica sono state utilizzate per stimare la capacità degli individui di viaggiare in bicicletta, tenendo conto della distribuzione delle distanze percorse in auto in quelle aree, ma anche del fatto che alcune persone possono percorrere maggiori distanze. Questa considerazione dell'eterogeneità all'interno dell'area è un vantaggio della microsimulazione spaziale rispetto alle tecniche aggregate, che assumono semplicemente che ogni individuo in un'area abbia lo stesso livello di prestazione fisica.

Per la stima della popolazione sintetica sono stati considerati sia gli attributi demografici di base (età, sesso, stato economico e istruzione), disponibili sia nel censimento che nell'indagine sanitaria per l'Inghilterra (HSE), denominati "attributi di vincolo", sia i dati sanitari (*Body Mass Index* -BMI) e di frequenza dell'esercizio fisico vigoroso), disponibili solo nell'HSE, denominati "attributi non vincolanti".

La capacità di viaggiare in *e-bike* è la distanza che una persona è fisicamente in grado di percorrere su base giornaliera, tenendo conto dello sforzo fisico del ciclista e dell'assistenza motoria che riceve. Viene considerata anche la pendenza dei percorsi, il peso della bicicletta, del ciclista e degli oggetti che porta con sé. È stato ipotizzato che gli individui trasportino 15 kg (equivalente al trasporto di un bambino piccolo, della spesa o di oggetti quotidiani). La potenza e il peso della bicicletta e del ciclista, più i 15 kg che vengono trasportati, sono aggiunti al codice che calcola la velocità di viaggio e la distanza che l'individuo è in grado di percorrere. Per calcolare la capacità massima di viaggiare in *e-bike* è stato assunto che tutti abbiano accesso a una *e-bike*. Per facilitare il confronto, è stata stimata la distanza massima che ogni individuo è capace di percorrere a piedi e con bicicletta tradizionale. È inoltre stato assunto che il rischio di incidenti tra l'utilizzo dell'*e-bike* e della bicicletta muscolare sia simile.

È stata stimata l'emissione di CO₂ media per km, a cui sono state aggiunte emissioni stimate del ciclo del carburante (47 g/km), della produzione (46 g/km) e del ciclo di vita per l'auto media europea. Sono state inoltre considerate le emissioni del ciclo di vita associate alle biciclette all'*ebiking*. La *European Cycling Federation* (ECF), stima la CO₂ del ciclo di vita per km percorso in bicicletta (21 g/km per le biciclette esistenti) e in *e-bike* (22 g/km - nuova produzione di *e-bike*). Queste stime tengono conto delle emissioni di CO₂ del ciclo di vita non solo per la produzione di batterie e biciclette, ma anche per le emissioni di CO₂ per generare l'elettricità necessaria per caricare la bicicletta elettrica.

La capacità di riduzione della CO₂ delle *e-bike* in Inghilterra è di 24,4 milioni di tonnellate l'anno, considerando le emissioni del ciclo di vita sia delle auto che delle *e-bike*. Per ogni individuo che utilizza una *e-bike* per sostituire i km percorsi in auto, si stima un risparmio medio di 0,58 tonnellate di CO₂ all'anno. Se tutti avessero accesso a una bicicletta, allora la riduzione potenziale di CO₂ sarebbe di 15 milioni di tonnellate, il 61% della capacità di risparmio dalle biciclette elettriche.

La capacità di riduzione di CO₂ delle *e-bike* per persona è maggiore per i residenti delle aree rurali e più bassa per i residenti dei grandi centri urbani. Nelle zone rurali, le persone guidano un maggior numero di km all'anno rispetto agli abitanti delle città. Nelle aree urbane c'è una maggiore proporzione di viaggi brevi in auto a causa della relativa vicinanza delle attività. La lunghezza mediana del viaggio in auto nelle aree urbane è di 5 km, mentre nelle aree rurali è di 10 km. Questi sono entrambi inferiori alla stima della distanza massima media di viaggio in *e-bike* di 20 km (rispetto agli 11 km in bicicletta) della popolazione sintetica.

I viaggi in *e-bike* hanno una capacità di riduzione del carbonio del 125% superiore a quella delle biciclette nelle aree rurali ma solo del 56% nelle aree urbane. Le zone rurali hanno inoltre un trasporto pubblico debole rispetto agli agglomerati urbani e sono prevalentemente dipendenti dalle auto.

In Inghilterra, i finanziamenti per il trasporto attivo sono stati piuttosto modesti al di fuori dei grandi centri urbani. L'investimento in *e-bike* nelle aree rurali e nelle città potrebbe anche migliorare l'accessibilità come co-beneficio alla riduzione di CO₂.

La micro-simulazione ha mostrato che la massima capacità totale di ridurre le emissioni di CO₂ delle auto usando le biciclette elettriche è di 24,4 milioni di tonnellate all'anno. Anche se la produzione di CO₂ della flotta automobilistica si ridurrà con l'elettrificazione, la progressione è lenta, ma l'adozione di massa delle biciclette elettriche potrebbe dare un significativo contributo alla riduzione della CO₂ nei trasporti, soprattutto nelle aree in cui gli spostamenti convenzionali (a piedi e in bicicletta) non si adattano ai modelli di viaggio e la fornitura di autobus è relativamente costosa.

5.3 Conclusioni

Gli spostamenti pedonali e ciclabili che implicano l'impiego della capacità fisica dell'uomo sono definiti come forme di mobilità dolce o mobilità attiva. La mobilità dolce costituisce la modalità per eccellenza di mobilità urbana sostenibile per molteplici aspetti perché, a differenza del trasporto motorizzato privato, non comporta lo sfruttamento di risorse non rinnovabili, la produzione di emissioni inquinanti e di gas serra in atmosfera, ma piuttosto apporta dei benefici in termini di salute, di coesione sociale e di presidio del territorio. Anche l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2016) incentiva i cittadini alla mobilità attiva e sottolinea l'importanza della pianificazione urbanistica e delle politiche dei trasporti per migliorare l'accessibilità e la sicurezza degli spostamenti a piedi e in bicicletta.

I risultati presentati dagli studi considerati hanno indicato che le forme di mobilità attiva possono costituire un'alternativa valida alla mobilità motorizzata ricorrendo alla mobilità a piedi per coprire percorsi di breve durata, e alla bicicletta per distanze medio – lunghe. Alla mobilità attiva può corrispondere un risparmio sulle emissioni di anidride carbonica purché siano rispettate alcune condizioni.

La presenza di infrastrutture ciclabili e pedonali, ben ramificate nel tessuto urbano e collegate con i più importanti punti di interesse, può promuovere e favorire l'aumento dell'attività fisica della popolazione. Infatti, la scelta della bicicletta è determinata da molte variabili interdipendenti che includono il grado di accessibilità ai luoghi, la struttura della rete di trasporto e la relativa attrattiva di alcuni fattori (accesso al trasporto pubblico, servizi di *bike sharing*, costi del parcheggio e del carburante, ecc.).

Le infrastrutture per le biciclette (velostazioni protette, rastrelliere, ecc.) hanno un'importanza significativa soprattutto per i nuovi ciclisti, ma sono di supporto anche per coloro che andavano in bici in precedenza. Incrementare le infrastrutture per i parcheggi fa parte delle azioni da mettere in atto per promuovere la mobilità ciclistica.

Le campagne di sensibilizzazione pubblica sono uno strumento indispensabile per mettere in evidenza gli aspetti positivi dell'uso della bicicletta, non solo come attività ricreativa, ma anche come possibile modalità di trasporto urbano. Le campagne pubbliche devono esaltare gli aspetti ambientali, economici e sanitari della mobilità dolce, mostrando in particolare il miglioramento in termini di sicurezza stradale legato a questo forma di trasporto. È opportuno reiterare le campagne di promozione e sensibilizzazione nel tempo al fine di garantire il mantenimento se non l'incremento del numero dei pedoni e dei ciclisti non solo a fini ludici e ricreativi ma anche per sostituire gli spostamenti motorizzati.

Sulla base di quanto riportato in letteratura, alcune variabili demografiche hanno un impatto significativo sull'uso della bicicletta: l'età, il sesso, la razza, il reddito, il livello di istruzione, lo stato occupazionale, il tipo di famiglia, la densità di popolazione e la densità di occupazione, ecc. In molti casi risulta indispensabile ricorrere anche ad un incentivo economico all'acquisto di biciclette sia tradizionali che a pedalata assistita per garantire un buon livello di utilizzo dei percorsi pedonali e ciclopedonali. Non trascurabili sono gli effetti negativi della mobilità dolce sulla salute umana legati ad una maggiore esposizione all'inquinamento atmosferico, acustico e agli incidenti stradali, in particolare quando si cammina o si va in bicicletta in zone particolarmente trafficate e/o inquinate.

Spesso le metodologie utilizzate per valutare gli impatti emissivi delle varie forme di mobilità hanno considerato il ciclismo una modalità di trasporto a emissioni zero, supponendo che non ci siano nuove emissioni da un progetto per la costruzione di una pista ciclabile. Tuttavia, il ciclismo è una modalità a zero emissioni, ma solo in fase operativa. Infatti, le emissioni legate al LCA della costruzione e della manutenzione delle piste ciclabili, sommate a quelle necessarie per la produzione, distribuzione e preparazione degli alimenti necessari per fornire energia per poter pedalare, sono significative e vanno considerate nel calcolo dei benefici ambientali di questa modalità di trasporto. È stato

stimato che un chilometro percorso in bicicletta da un utente che segue una dieta media americana richieda una produzione di alimenti che contribuisce all'emissione di 42 g di CO_{2eq} circa.

Molti autori concordano che la maggior parte degli spostamenti brevi in automobile (sotto i 2 km) può essere considerato potenzialmente sostituibile da uno spostamento a piedi o in bicicletta. Tuttavia, sono ancora numerose le resistenze che inducono i cittadini ad utilizzare l'automobile per spostarsi su brevi distanze quali la necessità di rispettare vincoli temporali, la convenienza, la necessità di trasportare carichi pesanti, necessità di accompagnare altri passeggeri o i bambini a scuola, la carenza altre di modalità di trasporto accettabili e una maggiore sicurezza percepita.

6 Pedibus

6.1 Introduzione

Il pedibus si definisce come un *"gruppo di studenti che vanno e tornano da scuola a piedi, accompagnati da volontari (genitori, insegnanti ecc.) lungo percorsi prestabiliti e il più possibile sicuri"*⁹¹.

Un incremento degli spostamenti casa-scuola con modalità di trasporto attivo potrebbe contribuire in modo significativo alla riduzione delle emissioni di GHG urbane e ridurre i problemi di congestione nei pressi delle scuole.

I principali vantaggi dell'utilizzo di modalità di trasporto attivo nelle scuole sono:

- aspetti sanitari: i viaggi attivi regolari, come camminare e andare in bicicletta, possono portare importanti benefici per la salute (miglioramento delle condizioni fisiche, riduzione dell'obesità, ecc.);
- cambiamenti climatici: l'aumento del trasporto attivo e la riduzione dell'utilizzo dell'auto privata determina una riduzione dei consumi in carburante e delle emissioni associate che contribuiscono al cambiamento climatico;
- benefici sociali: il gruppo che cammina verso le scuole può essere un aspetto sociale significativo per la popolazione giovane;
- riduzione dell'esclusione sociale: andare a scuola a piedi aiuta a ridurre l'esclusione sociale tra i residenti e promuove principi di equità tra le popolazioni più giovani.
- sviluppo dell'economia: il miglioramento e la promozione di percorsi verso le strutture scolastiche possono aiutare a sviluppare le economie locali e sostenere l'uso a lungo termine del trasporto non motorizzato nelle aree urbane;

Lo spostamento attivo casa-scuola è un'opportunità per incrementare i livelli di attività fisica dei bambini, numerosi studi hanno esaminato questo fenomeno e le motivazioni che hanno portato a queste scelte.

Negli ultimi anni si è osservata una riduzione degli spostamenti attivi degli alunni per recarsi a scuola, sostituiti da pratiche meno sostenibili e a maggior impatto ambientale (maggiore inquinamento) e sulla salute (impatti diretti: ridotti livelli di attività fisica; impatti indiretti: esposizione a maggiori livelli di inquinamento atmosferico NO_x e PM_{2,5}).

Tali impatti si accumulano su scala globale, con emissioni di CO₂, causando effetti sul cambiamento climatico. Le concentrazioni di CO₂ equivalenti sono utilizzate come misura dei gas effetto serra. Si stima che gli spostamenti casa-scuola in Inghilterra contribuiscano

⁹¹ <https://www.garzantilinguistica.it/ricerca/?q=pedibus>

per 658 tonnellate di CO₂ ogni anno (DCFS, 2010⁹²), pertanto adottare modalità di spostamento sostenibili potrebbe comportare sostanziali benefici ambientali.

Tuttavia, per stimare, modellare o registrare i percorsi degli alunni tra casa e scuola, al fine di quantificare la relazione, vengono adottati diversi approcci metodologici, che vanno dalla misurazione della distanza in linea retta, alla simulazione di percorsi all'interno di un sistema informativo geografico (GIS), al tracciamento degli spostamenti con dispositivi GPS, alla annotazione individuale degli spostamenti su un diario o su una mappa. Anche per questa tipologia di mobilità è stata effettuata una ricerca utilizzando i seguenti data base Pub Med, Science Direct, DOAJ, Arxiv e JStore; e sono stati selezionati 2 articoli.

6.2 Stato dell'arte

L'articolo di Bearman e Singleton (2014) implementa una misura chiamata criterio delle distanze, che presenta la percentuale cumulativa di alunni che utilizzano un particolare modalità di trasporto a seconda delle distanze da percorrere. Utilizzando una serie di dati di trasporto è possibile conoscere le distanze soglia oltre le quali è probabile che le modalità di spostamento cambino a favore di altre (Harrison *et al.*, 2011). Una distanza soglia per il pedibus rappresenta il punto in cui l'85% degli alunni cambia da una modalità ad un'altra, ed indica quindi la distanza massima che gli allievi sono disposti a coprire con spostamenti di tipo attivo (a piedi o in bicicletta). Anche la presenza di infrastrutture (piste ciclabili, aree pedonali, ecc.) ed una maggiore sicurezza stradale possono incoraggiare gli spostamenti di tipo attivo. Pochi studi hanno esaminato l'impatto di queste tipologie di spostamento sull'ambiente ed in particolare sulle emissioni di CO₂.

In Inghilterra i dati sugli spostamenti casa-scuola sono stati raccolti dal *national school census* tra luglio 2006 e dicembre 2011 per valutare l'impatto dell'iniziativa *Travelling to School Initiative* (TSI) del Dipartimento per l'Istruzione (2010). Nel loro studio gli autori hanno preso una parte di questi dati raccolti nel *Pupil Database*⁹³ relativi alla località di Norfolk, che comprende 435 scuole primarie e 77 secondarie per un totale di 54.383 alunni. I dati utilizzati in questo documento sono limitati agli alunni domiciliati a Norfolk e che frequentano anche una scuola di Norfolk durante l'anno scolastico 2010-2011.

L'obiettivo di questa ricerca è quello di stimare l'impatto degli scenari di scelta della modalità alternativa sui tassi di spostamento attivo e le probabili implicazioni sulla salute e sull'impatto ambientale.

Sulla base della distanza media degli spostamenti casa-scuola degli alunni ottenuta con il GPS sono state calcolate le emissioni di CO₂ attribuibili alle differenti modalità di

⁹² DCFS, 2010. Road to Zero Carbon. DCSF-00111-2010. Department for Children, Schools and Families, London.

DEFRA, 2012. 2012 Guidelines to Defra/DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting.

https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69554/pb13773-ghg-conversion-factors-2012.pdf

⁹³ <https://www.gov.uk/guidance/how-to-access-department-for-education-dfe-data-extracts>

spostamento. Per le stime delle emissioni dei veicoli sono stati utilizzati i dati della flotta dell'area geografica esaminata, presi dalla *Driver and Vehicle Licensing Agency* (DVLA).

I dati iniziali mostrano una maggiore frequenza di spostamenti a piedi per le scuole primarie e secondarie, rispetto agli studi precedenti (che hanno analizzato un differente campione di studenti). I ragazzi delle scuole secondarie tendono a spostarsi per distanze medie maggiori. Relativamente al criterio della distanza, per le scuole primarie la soglia era di 1,5 km per gli spostamenti a piedi e 2 km per quelli in bicicletta. Per le scuole secondarie la soglia era di 2,5 km per gli spostamenti a piedi e 3 km per quelli in bicicletta.

Gli autori hanno sviluppato tre scenari ipotizzando un incremento degli spostamenti a piedi e in bicicletta. Nel primo, tutti gli interventi favorivano un ampio incremento degli spostamenti attivi; il secondo prevedeva l'introduzione di un pedibus; il terzo prevedeva interventi di promozione mirati a favorire gli spostamenti attivi. Per tutti e tre gli scenari si è ipotizzato che una parte del tragitto fatto precedentemente con l'automobile venisse sostituito da modalità attive (camminare, andare in bicicletta). I cambiamenti maggiori osservati hanno interessato distanze brevi, meno quelle più lunghe.

Gli scenari non includono trasferimenti dall'andare in autobus o a piedi all'andare in bicicletta; tuttavia, forniscono un'approssimazione del potenziale impatto di un sostanziale spostamento verso il trasporto attivo. Ogni cambiamento nella modalità di viaggio è stato applicato ad ogni scenario, le rotte degli alunni verso la scuola sono state modellizzate e sono state ricalcolate le emissioni di CO₂ e le distanze. Tale processo si è reso necessario, poiché i percorsi seguiti dalle auto non sono necessariamente gli stessi dei pedoni o dei ciclisti.

Il primo scenario prevede un ampio incremento di pedoni e ciclisti, l'incremento dell'uso della bicicletta è stato possibile poiché la frequenza di utilizzo era bassa.

Nel secondo scenario il pedibus ha riscontrato un grande successo nelle scuole primarie, con una riduzione del 20% di utilizzo dell'auto privata. Tutti i partecipanti al pedibus abitavano entro i 2 km dalla scuola.

Il terzo scenario ha riscontrato un incremento del trasporto attivo del 20% grazie a differenti iniziative di promozione.

Nei tre scenari l'incremento della mobilità attiva è sempre correlato alla distanza da percorrere (criterio della distanza). Con il pedibus nelle scuole secondarie la distanza è aumentata di 1 km, con la bicicletta il criterio della distanza è aumentato di 1,5 km. In tutti gli scenari vi è una riduzione delle emissioni di CO₂. Le riduzioni maggiori di CO₂ sono state stimate nelle aree urbane, dove i ragazzi percorrono distanze minori per recarsi a scuola. Oltre la CO₂ gli autori hanno stimato anche una riduzione di NO_x e PM_{2,5} e degli incidenti stradali. Altri benefici associati alla riduzione delle emissioni, sono la riduzione delle complicanze cardiorespiratorie conseguenti all'esposizione ad inquinamento atmosferico e la riduzione di malattie metaboliche e obesità grazie ad un aumento dei livelli di attività fisica.

I tre scenari mostrano differenti livelli di riduzione delle emissioni di CO₂. Nel primo scenario si registrano maggiori riduzioni nella scuola primaria (19%) e minori nella scuola secondaria (7,3%), a causa delle maggiori distanze che interessano gli alunni delle scuole secondarie. Vi è, inoltre, un lieve incremento della distanza media percorsa ed è più significativo il numero di alunni che sceglie una modalità di spostamento attivo, la distribuzione spaziale di questa diminuzione si osserva soprattutto nelle aree urbane di Norfolk, dove la distanza media dalla scuola è inferiore. Il secondo scenario riflette questa tendenza e sono favoriti gli spostamenti con distanze inferiori ai 2 km. Le riduzioni di emissioni per la scuola primaria sono significative (13,2%). Il terzo scenario (*target* mirati di trasporto attivo) ha un impatto su scala geografica più ampia, ma in media la riduzione delle emissioni è simile allo scenario 1 (11,5 % scenario 1 vs 11,7% scenario 3), inoltre le differenze tra scuola primaria e secondaria sono più rilevanti. Le scuole secondarie sono più attive e lo scenario mirato sembra essere il più efficace.

Tra i limiti principali, in primo luogo non sono stati valutati gli spostamenti in autobus, perché non sono disponibili dati sulle linee di autobus ed è per questo che sono stati presi in considerazione solo i cambiamenti di modalità dall'automobile alla bicicletta e a piedi. Per il calcolo delle emissioni è stato utilizzato un valore medio di emissione di CO₂ che sottostima il valore reale, essendo stati utilizzati delle vetture immatricolate dopo il 2001.

Il progetto "*Support to Sustainable Transport in the city of Belgrade*" (Gavrilova, 2014) si compone di diverse parti:

- il Piano di trasporto urbano sostenibile della città di Belgrado;
- la promozione degli spostamenti con la bicicletta, accompagnata da un'estensione delle piste ciclabili;
- un progetto pilota di pedibus.

L'obiettivo del progetto è di quantificare l'impatto dei gas a effetto serra degli interventi di trasporto sostenibile nella città di Belgrado, per sviluppare uno scenario dinamico di emissioni di base per il periodo 2013-2024 e stimare l'impatto diretto e indiretto delle componenti del progetto.

Al fine di questa revisione sono riportati dati sulla quantificazione del risparmio di GHG grazie all'implementazione del pedibus nelle scuole primarie della città di Belgrado. Per stimare le emissioni relative agli spostamenti casa-scuola sono stati utilizzati i dati da un'indagine condotta nelle scuole riguardanti il tasso di utilizzo del trasporto motorizzato e le distanze percorse e l'età media dei veicoli e lo standard ambientale dei veicoli. Dall'indagine risulta che il 20% degli alunni viene accompagnato in automobile, l'età media dei veicoli privati a Belgrado è di 13 anni, con standard euro 3 (emissione media per veicolo di 180 g di CO₂/km). La distanza percorsa è di circa 1,5 km in una direzione. È stato stimato che l'implementazione del pedibus nella scuola elementare "St. Sava" porterebbe un risparmio di 0,077 kt di emissioni di CO₂ per il periodo 2013-2024. Nell'ambito del progetto, è stato ipotizzato di implementare il pedibus in altre quattro scuole primarie nella città di Belgrado, il che potrebbe portare una riduzione annuale di 0,026 kt di CO_{2eq}.

6.3 Conclusioni

Il pedibus rappresenta un modo sano, sicuro, divertente ed ecologico per andare a scuola. Oltre all'impatto positivo sull'ambiente e sul clima, il pedibus determina molti altri vantaggi: aspetti sociali e di mobilità inclusiva, supporto all'economia nazionale e locale, promozione di uno stile di vita sano, educativo per la popolazione e, in ultima analisi, supporto all'efficienza e alla sicurezza del trasporto urbano.

I benefici del pedibus sono quelli di educare i ragazzi alla sostenibilità ambientale, ma anche alla prevenzione dei problemi cardio-circolatori, legati ad esempio al sovrappeso, per gli effetti positivi dell'attività motoria e del camminare in genere anche solo per mezz'ora al giorno.

L'esercizio fisico è, inoltre, correlato alla produzione di ormoni chiamati "endorfine" che hanno un effetto positivo sull'umore dei bambini. La produzione di endorfine rilascia energia e migliora la qualità del sonno, riducendo ansietà, *stress* e depressione, disturbi che possono coinvolgere anche i bambini.

Andare a scuola diventa un momento di condivisione con i compagni di classe, capace di rinsaldare i rapporti sociali tra i bambini.

Attivare il pedibus comporta, inoltre, l'avvio di un circolo virtuoso: se più bambini vanno a piedi, diminuiscono le automobili parcheggiate davanti alla scuola, c'è meno traffico, meno rumore e le automobili percorrono più lentamente le strade percorse dal pedibus. Dal punto di vista educativo per un bambino vi è un aumento dell'autonomia e i bambini possono recarsi autonomamente sul percorso casa scuola già a partire dalla terza/quarta elementare.

6.4 Tabella riepilogativa mobilità dolce e pedibus

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Massink <i>et al.</i> (2011)	Stima delle emissioni di CO ₂ evitate sulla base dei i dati sulle attuali quote modali della mobilità ciclistica e calcolo del valore climatico della bicicletta, definito come il totale delle emissioni di CO ₂ evitate da tutti i viaggi in bicicletta.	A 20.686 intervistati è stato chiesto di compilare un diario di viaggio che fornisse informazioni sul modo di trasporto, sulla fascia socioeconomica dell'intervistato, sullo scopo del viaggio e sull'origine/destinazione degli spostamenti.		Il traffico totale indotto dalle modalità alternative equivale a un costo opportunità di 151 tonnellate di CO ₂ al giorno o di 55.115 tonnellate di CO ₂ all'anno, che può essere visto come un "beneficio di opportunità" perché rappresenta le emissioni di CO ₂ evitate. Rispetto alle prestazioni totali del traffico di Bogotá, tale valore corrisponde alla possibilità di evitare il 2,4% delle emissioni complessive di CO ₂ .
Gavrilova (2014)	La stima della possibile riduzione delle emissioni di gas a effetto serra è stata effettuata sulla base dei dati derivanti dall'indagine sull'utilizzo della bicicletta. con il modello COPERT IV, applicato al parco auto della città di Belgrado ed una stima del consumo di carburante.			I risultati delle stime indicano un potenziale di mitigazione cumulativo, per il periodo 2013-2024, di 10,132 kt di CO _{2eq} .
Brand <i>et al.</i> (2014)	Utilizzo di questionari per ricavare le velocità medie e le distanze medie percorse per ogni viaggio. Stima delle emissioni di CO ₂ "a caldo" e "a freddo" (emissioni in eccesso durante la fase di riscaldamento). Per i viaggi in autobus, in treno e in altre modalità, le distanze percorse sono state moltiplicate per i fattori di emissione della CO ₂ medi specifici	A 1.849 adulti è stato somministrato un questionario nel 2010 (anno di riferimento <i>baseline</i>) ed una seconda volta a distanza di un anno nel 2011, dopo la costruzione di nuovi percorsi ciclopedonali nell'ambito del		Al <i>follow-up</i> di un anno, le emissioni medie di CO ₂ sono state di 31 kg per persona a settimana, con una riduzione stimata di 1,7 kg di CO ₂ rispetto allo scenario di base. A due anni di <i>follow-up</i> , le emissioni medie sono state inferiori di 3 kg di CO ₂ rispetto al valore di riferimento.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
	per la modalità di trasporto, ottenuti dal Ministero dell'Ambiente del Regno Unito.	programma <i>Sustrans Connect2</i> , che ha coinvolto il territorio di tre comuni del Regno Unito. Un secondo campione di 1.510 adulti è stato selezionato per completare il questionario nell'anno di riferimento (2010) e dopo un <i>follow-up</i> di due anni (2012).		
Rudolph (2014)	Il modello utilizzato per calcolare i risultati degli scenari si basa sulla procedura tradizionale del modello sequenziale in quattro fasi per la pianificazione degli spostamenti urbani, che considera: la generazione del viaggio, la distribuzione del viaggio, la scelta modale e l'assegnazione del percorso.	È stato condotto un sondaggio, tra aprile 2011 e febbraio 2012, su 231 residenti tedeschi che utilizzavano un <i>pedelec</i> privato per i propri spostamenti. L'indagine aveva lo scopo di identificare le motivazioni che portavano all'acquisto e all'utilizzo del <i>pedelec</i> e i modelli comportamentali dell'utente, come ad esempio gli scopi degli spostamenti e le distanze percorse.	Sono stati creati due scenari per la città di Wuppertal. Il primo scenario ipotizza il <i>business as usual</i> , con un miglioramento delle infrastrutture ciclistiche, ossia tracciare piste ciclabili su strade e nel rendere gradualmente a senso unico le strade a doppio senso per le biciclette. Il secondo scenario si basa sull'introduzione di politiche per incoraggiare l'acquisto e l'utilizzo di <i>pedelec</i> .	Nello scenario BAU, il potenziale della mobilità ciclabile, con o senza pedalata assistita elettrica, entra in gioco su percorsi di due chilometri. Le biciclette e i <i>pedelec</i> raddoppierebbero la loro quota modale dall'1,6% nel 2012 al 3,2% nel 2050. Lo scenario del BAU ha un effetto limitato di mitigazione del cambiamento climatico. Nello scenario di promozione dei <i>pedelec</i> , verrebbe osservata una riduzione delle emissioni di CO ₂ , che nel 2050 sarebbero in calo di 523.000 t.
Mrkajic <i>et al.</i> (2015)	Adeguamento e messa in sicurezza di due parcheggi (A1 e A2). L'impatto dell'intervento è stato misurato osservando il numero di	Sono stati somministrati dei questionari per stimare le modifiche comportamentali relative		

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
	<p>rastrelliere occupate, prima e dopo l'intervento. L'osservazione è stata effettuata per 5 giorni lavorativi per 4 mesi.</p> <p>Per stimare la CO₂ si è stimata una distanza media casa-università di 7,6 km per il viaggio di andata e ritorno per 251 giorni lavorativi (escludendo fine settimana e festivi). Utilizzando i dati dell'<i>Europe Cycling Federation study</i> si è quantificata un'emissione di 21 g di CO₂ per km in bicicletta, mentre con autovettura e con autobus le emissioni sono di 271 g e 101 g per km.</p>	<p>alle modalità di spostamento. Sono stati intervistati 44 studenti ciclisti e 49 che non si spostano in bicicletta. I questionari avevano una prima parte di domande in comune, mentre la seconda parte differiva tra i due gruppi.</p>		
<p>Tiwari <i>et al.</i> (2015)</p>	<p>È stato condotto uno studio sul comportamento di viaggio dei cittadini di due città indiane: Rajkot e Vishakhapatnam. L'obiettivo era di stimare gli impatti dell'ambiente edificato e delle infrastrutture di NMT e del trasporto pubblico sul consumo di energia e sulle emissioni equivalenti di CO₂ in città indiane di medie dimensioni. È stato analizzato l'impatto del miglioramento dell'ambiente costruito e delle infrastrutture sulle scelte delle modalità di viaggio, sul consumo di carburante, sulle emissioni e sulla sicurezza stradale.</p>		<p>Sono stati sviluppati tre scenari: 1) miglioramento solo dell'infrastruttura non motorizzata NMT, 2) miglioramento solo del trasporto pubblico (TP) e 3) miglioramento sia dell'infrastruttura NMT che del TP. In ogni scenario sono stati ipotizzati spostamenti da diverse modalità di viaggio in base alla distribuzione della lunghezza del viaggio in città.</p>	<p>Le emissioni di CO₂ equivalenti mostrano la maggiore riduzione nello scenario 3 (NMT e PT combinati) in entrambe le città; tuttavia, la riduzione percentuale è maggiore in Rajkot rispetto a Vizag. L'analisi mostra l'importanza delle infrastrutture per il NMT per la sicurezza. I maggiori benefici per la sicurezza sono stimati nello scenario di miglioramento del NMT.</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Matute <i>et al.</i> (2016)	È stato valutato il ciclo di vita sviluppando e validando modelli che incorporano dati demografici e cambiamenti nel comportamento di viaggio per stimare le riduzioni dei gas serra. È stata stimata la riduzione delle percorrenze delle autovetture prima e dopo gli interventi sulle infrastrutture per l'utilizzo delle biciclette. Si è conteggiato il numero di biciclette in transito e si sono raccolti altri dati con il questionario. Il set di dati è composto da 46 località prima e dopo il conteggio delle biciclette e 44 località in cui sono state installate infrastrutture per biciclette.	Si sono raccolti dati grazie ad un'indagine condotta a Los Angeles, tra gennaio e febbraio 2016 (si è utilizzato un questionario cartaceo (463 risposte), e interviste orali di cinque minuti (155 risposte)).		Quasi tutte le piste ciclabili hanno mostrato un aumento del numero di ciclisti. Solo cinque piste su 44 hanno mostrato una diminuzione del numero di ciclisti. La variazione percentuale media è del 110%, il che significa che, in media, il numero di ciclisti è più che raddoppiato. Alcune piste hanno registrato un aumento di utenti di oltre il 200%, e l'aumento massimo osservato è stato di oltre il 500%. L'aumento dell'utilizzo della bicicletta non sembra essere correlato con la tipologia di infrastruttura (corsie, piste ciclabili, sentieri ciclabili).
Tarulescu <i>et al.</i> (2017)	È stato realizzato un modello di previsione per stimare la diminuzione del consumo energetico e della CO ₂ da trasporto su strada per la città di Ghimbav. Sono state considerate diverse misure di ottimizzazione: il rinnovo del parco veicoli; la costruzione di un raccordo anulare per deviare il traffico urbano; strade a scorrimento veloce; la realizzazione di piste ciclabili. Per ogni misura è stato utilizzato un modello matematico per calcolare il consumo di energia e le emissioni di CO ₂ dovute al settore dei trasporti su strada.			La realizzazione di piste ciclabili porterebbe una riduzione del consumo energetico e delle emissioni di CO ₂ dell'11,2%, la strategia di rinnovamento del parco veicoli a una riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di CO ₂ del 5%.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Giannakos <i>et al.</i> (2017)	L'analisi è stata condotta per mezzo del modello microscopico di simulazione del traffico con il <i>software</i> Aimsun. Sono state condotte simulazioni sia statiche che dinamiche e sono stati confrontati i risultati ottenuti con i due approcci. Nel modello di traffico utilizzato è stata incorporata una funzione di calcolo delle emissioni inquinanti dovute al trasporto stradale.		Le simulazioni sono state effettuate prendendo in considerazione quattro scenari, tre scenari relativi ad una diversa implementazione di aree pedonali ed uno scenario di base senza schemi di pedonalizzazione.	Per il consumo di carburante, nella modellizzazione aggregata si registra un aumento del 3 e del 2% con i primi due scenari di pedonalizzazione ed una riduzione del 4% con il terzo scenario che è anche quello che ha un impatto maggiore in termini di emissioni di CO ₂ , con un aumento del 6%, mentre i primi due scenari sono responsabili di un aumento dell'1 e del 4%, rispettivamente. La riduzione della domanda del traffico del 10 e del 20% comporta una riduzione significativa dei consumi di carburante e delle emissioni di CO ₂ in tutti gli scenari.
Guariso e Malvestiti (2017)	Gli impatti della ciclabilità vengono valutati mediante la combinazione di due modelli, uno che ne stima i benefici sulla salute (HEAT) ed un altro (R-R) che ne stima gli effetti negativi sanitari ed economici derivanti da un'aumentata esposizione all'inquinamento atmosferico.		Sono stati ipotizzati 4 scenari. Lo Scenario attuale analizza la situazione attuale di Milano. L'uso della bicicletta è riferito al 2013, in cui si sono registrati circa 3 milioni di spostamenti al giorno di cui il 5,7% in bicicletta. La [PM10] media annua di è posta uguale a 42 µg/m ³ sulla base dei dati di monitoraggio del 2015. Nello Scenario al 2024 si ipotizza un maggior	Analizzando e confrontando gli <i>output</i> del modello HEAT e del modello R-R, i benefici derivanti dall'uso delle biciclette sono maggiori degli effetti negativi in tutti gli scenari considerati. In particolare, il rapporto benefici/effetti negativi varia tra 19 e 22 e rimane stabile in tutti gli scenari considerati, a conferma della robustezza dei risultati ottenuti. Il valore massimo del rapporto benefici/effetti negativi viene raggiunto nello Scenario con miglioramento della qualità dell'aria. A Milano, nonostante

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
			<p>numero di ciclisti coerentemente allo shift modale stimato per il 2024 dal PUMS. La [PM10] media annua è la stessa dello scenario attuale.</p> <p>Lo Scenario con miglioramento della qualità dell'aria differisce dallo Scenario al 2024 per la [PM10] media annua pari a 5 µg/m³ in coerenza con il trend del PM10 osservato a Milano negli ultimi 15 anni.</p> <p>Lo Scenario Amsterdam applica la percentuale degli spostamenti in bicicletta tipica della città di Amsterdam (32%) al numero giornaliero di spostamenti registrato a Milano nel 2013 (2.978.000). La [PM10] media annua è pari 42 µg/m³ come nello Scenario attuale.</p>	<p>l'elevata esposizione all'inquinamento atmosferico, gli effetti positivi dell'attività fisica, di chi va in bicicletta, superano ampiamente gli effetti negativi, e la mobilità ciclabile può essere considerata una modalità di spostamento vantaggiosa.</p> <p>Nello Scenario al 2024 le riduzioni delle emissioni di CO₂ e di PM10 sono rispettivamente di circa 7.600 e 2 tonnellate, mentre con lo Scenario Amsterdam si stima una riduzione maggiore pari a circa 100.000 e 28 tonnellate di CO₂ e di PM10 rispettivamente.</p>
Bahmankhah e Coelho (2017)	Gli autori utilizzano una piattaforma di simulazione su piccola scala (VISSIM) del traffico stradale e delle emissioni derivate a partire dalla potenza specifica dei veicoli. Grazie all'uso di tale piattaforma viene			Sono stati analizzati quattro itinerari alternativi (A, B, C e D) tra l'area del campus universitario di Aveiro ed un'area commerciale. Il percorso C è quello caratterizzato dalle maggiori

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
	<p>condotta un'analisi del traffico veicolare, che consente di stimare le emissioni di CO₂ e di NO_x dovute alla circolazione degli autoveicoli nel sistema stradale considerato. Inoltre, gli autori hanno applicato la metodologia SSAM (<i>Surrogate Safety Assessment Methodology</i>) per valutare la sicurezza stradale.</p>			<p>condizioni di sicurezza rispetto ai percorsi A, B e D, rispetto ai quali si ha una riduzione del numero di conflitti rispettivamente del 18,7, 22,7 e 92%. Per quanto riguarda le emissioni di CO₂ e NO_x, il percorso C è caratterizzato dal miglior profilo emissivo, ma anche da un tempo medio di percorrenza di biciclette e autovetture superiore a quello dei percorsi A e B.</p>
<p>Keall <i>et al.</i> (2018)</p>	<p>È stato calcolato il risparmio di emissioni di CO₂ con uno studio semi-sperimentale, utilizzando i dati sulle distanze percorse registrate dai contachilometri dei veicoli collegati alle patenti di guida. È stato possibile confrontare le distanze percorse dalle autovetture prima e dopo gli interventi di realizzazione delle infrastrutture ciclabili e pedonali e in una città, in cui non erano stati effettuati interventi, utilizzata come controllo.</p>			<p>I risultati mostrano una riduzione dei VKT del 1,6% dal 2010 al 2014, mentre dal 2011 al 2013 la riduzione è stata dell'1%. Il maggior decremento è stato subito dopo gli interventi effettuati nel 2011. La riduzione di CO₂ è in media di 0,2359 kg per VKT per la flotta passeggeri della Nuova Zelanda ed è stata calcolata dividendo l'emissione totale stimata di questo settore per il totale dei VKT.</p>
<p>Astegiano <i>et al.</i> (2019)</p>	<p>È stato adottato un modello di dinamica dei sistemi denominato ASTRA (ASsessment of TRAnsport Strategies) in combinazione con svariati altri modelli relativi alla produzione e al consumo di energia. Tale modello fornisce un approccio generale per simulare gli impatti di diverse strategie sui consumi</p>		<p>È stato di creato uno scenario base che includesse l'uso delle biciclette elettriche dal 2015 sino al 2050. Il passo successivo è stato quello di definire uno scenario di <i>policy</i>, in cui l'uso delle autovetture private fosse</p>	<p>I risultati del modello indicano un possibile impatto positivo dell'uso delle biciclette elettriche nella riduzione delle modalità di trasporto motorizzato. Tale riduzione risulta maggiore ipotizzando uno scenario che prevede l'introduzione di un sistema di pedaggi.</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
	energetici dovuti ai trasporti e sulle emissioni di carbonio.		penalizzato dall'adozione di un sistema di pedaggi per i veicoli che volessero accedere ad una vasta area urbana a partire dal 2020.	Mediante l'applicazione del modello è stata stimata la riduzione, rispetto allo scenario <i>baseline</i> , delle emissioni di gas serra e degli altri inquinanti atmosferici per effetto dell'introduzione del sistema di pedaggi applicata a spostamenti urbani di distanza inferiore a 50 km. La riduzione maggiore delle emissioni viene ottenuta nel 2020 (-0,7% per la CO ₂ ; -0,4% per il CO; -0,8% per gli NO _x ; -0,4% per i VOC; -0,7% per il PM.
Neves e Brand (2019)	L'indagine utilizza i dati raccolti con uno studio osservazionale su 50 partecipanti nella città gallese di Cardiff ed i risultati forniscono elementi utili a comprendere le abitudini di viaggio dei partecipanti e i possibili guadagni in termini di riduzioni delle emissioni di CO _{2eq} dovute al trasporto stradale.	Sono state raccolte informazioni quantitative relative ai comportamenti di viaggio dei partecipanti per mezzo di dispositivi GPS e di diari di viaggio compilati settimanalmente e dati di tipo qualitativo attraverso delle interviste ai partecipanti. Le osservazioni sono state ripetute per una settimana, nel 2011 ed una seconda volta nel 2012 nella stessa stagione dell'anno precedente.		Gli autori hanno stimato che se la quota (41%) di spostamenti brevi effettuata in automobile considerata potenzialmente sostituibile con spostamenti effettuati con bicicletta o a piedi fosse realizzata con forme di mobilità attiva, si otterrebbe una riduzione delle emissioni di CO _{2eq} dovute al trasporto autostradale del 4,5% corrispondete a 1,15 kg di CO _{2eq} emesse in meno da una persona in una settimana. Tale riduzione equivale al 4% delle emissioni di CO _{2eq} dovute a tutti i trasporti di superficie.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Smargiassi <i>et al.</i> (2020)	<p>Per la stima delle emissioni in atmosfera sono stati utilizzati i dati delle immatricolazioni dei veicoli della <i>Société de l'Assurance Automobile du Québec</i> (SAAQ) per stimare la distribuzione nel 2061 per gli scenari BAU e Ottimale.</p> <p>Per la stima delle emissioni è stato usato il modello EPA MOVES al fine di generare fattori di emissione per Y2031 per l'azoto ossidi di azoto e gas a effetto serra, biossido di carbonio equivalente in g/km/veh, riflettendo la distribuzione dei veicoli di proprietà.</p> <p>Il modello di dispersione CALPUFF è stato utilizzato per stimare le concentrazioni di NO₂ in tutto il dominio di studio.</p>		Sono stati confrontati, per un giorno della settimana, il numero di viaggi e le distanze percorse con le diverse modalità, e gli impatti sull'ambiente e sulla salute in due regioni della Great Montreal Region (centro e periferia), per tre scenari per l'anno 2061: un <i>Y2061 business as usual</i> , e scenari ottimali con, e senza telelavoro.	<p>Le emissioni di gas serra di Y2061 risultano più basse per la BAU con alta penetrazione dei veicoli elettrici (circa il 50%) e per lo scenario ottimale (con elevata densità urbana e minore utilizzo modale dell'auto) che ha considerato solo l'efficienza del carburante e le tecnologie di controllo delle emissioni fino all'anno 2031.</p> <p>Le percentuali di viaggi in auto e in treno sono simili per lo scenario Y2031 e Y2061 BAU ma i chilometri percorsi in auto, e le emissioni di CO₂ e NO₂ sono aumentate, a causa dell'aumento della popolazione.</p>
Pérez-Neira <i>et al.</i> (2020)	Attraverso l'implementazione di un'analisi del ciclo di vita (approccio <i>door-to-door</i> e <i>well-to-wheel</i>), sono state esaminate le relazioni esistenti tra distribuzione modale, distanze, tempi di viaggio, struttura urbana, impronta di carbonio diretta e indiretta e costi monetari di pendolarismo degli utenti dell'Università di Leon (ULE).	Le informazioni sono state raccolte con un sondaggio online e inviato a tutti gli utenti ULE. Il sondaggio ha due sezioni: la prima progettata per identificare gli intervistati; la seconda sezione concentrata sulle abitudini di mobilità e comprensiva di sette sottosezioni con domande sulle abitudini attuali e gli ostacoli per cambiarle.		I risultati mostrano come le politiche universitarie focalizzate sul miglioramento delle abitudini di mobilità (maggiore uso di autobus, biciclette e spostamenti a piedi) possono ridurre notevolmente le emissioni di gas serra in un intervallo di distanza di 0-6 km. Per esempio, la sostituzione delle auto con le biciclette (50% nelle distanze <4 km) ridurrebbe le emissioni di CO _{2eq} del 17,5% e aumenterebbe il risparmio monetario del 14,8%.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Philips <i>et al.</i> (2022)	<p>È stata utilizzata la microsimulazione spaziale per generare una popolazione rappresentativa di individui.</p> <p>La microsimulazione spaziale collega i dati del censimento di piccole aree a dati anonimi per simulare una popolazione di individui per ogni piccola sezione nell'area di studio. Una volta generate, le caratteristiche della popolazione sintetica sono state utilizzate per stimare la capacità degli individui di viaggiare in bicicletta, tenendo conto della distribuzione delle distanze percorse in auto in quelle aree, ma anche del fatto che alcune persone possono percorrere maggiori distanze.</p>			<p>La capacità di riduzione della CO₂ delle <i>e-bike</i> in Inghilterra è di 24,4 milioni di tonnellate l'anno, considerando le emissioni del ciclo di vita sia delle auto che delle <i>e-bike</i>. Per ogni individuo che utilizza una <i>e-bike</i> per sostituire i km percorsi in auto, si stima un risparmio medio di 0,58 tonnellate di CO₂ all'anno. Se tutti avessero accesso a una bicicletta, allora la riduzione potenziale di CO₂ sarebbe di 15 milioni di tonnellate, il 61% della capacità di risparmio dalle biciclette elettriche. La capacità di riduzione di CO₂ delle <i>e-bike</i> per persona è maggiore per i residenti delle aree rurali, e più bassa per i residenti dei grandi centri urbani.</p>
Bearman e Singleton (2014) (Pedibus)	<p>È stato adottato un criterio delle distanze, che presenta la percentuale cumulativa di alunni che utilizzano un particolare modalità di trasporto a seconda delle distanze da percorrere. Utilizzando una serie di dati di trasporto è possibile conoscere le distanze soglia oltre le quali è probabile che le modalità di spostamento cambino a favore di altre.</p>	<p>I dati sugli spostamenti casa-scuola sono stati raccolti dal <i>national school census</i> tra luglio 2006 e dicembre 2011 per valutare l'impatto dell'iniziativa <i>Travelling to School Initiative</i> (TSI) del Dipartimento per l'Istruzione (2010). Gli autori hanno preso una parte di questi dati raccolti nel <i>Pupil Database</i> relativi</p>	<p>Gli autori hanno sviluppato 3 scenari ipotizzando un incremento degli spostamenti a piedi e in bicicletta. Nel primo, tutti gli interventi favorivano un ampio incremento degli spostamenti attivi; il secondo prevedeva l'introduzione di un pedibus; il terzo prevedeva interventi di promozione</p>	<p>I tre scenari mostrano differenti livelli di riduzione delle emissioni di CO₂. Nel primo scenario si registrano maggiori riduzioni nella scuola primaria (19%) e minori nella scuola secondaria (7,3%), a causa delle maggiori distanze che interessano gli alunni delle scuole secondarie. Il secondo scenario riflette questa tendenza, e sono favoriti gli spostamenti con distanze inferiori ai 2 km. Le riduzioni di emissioni per la scuola</p>

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
	<p>Sulla base della distanza media degli spostamenti casa-scuola degli alunni ottenuta con il GPS sono state calcolate le emissioni di CO₂ attribuibili alle differenti modalità di spostamento. Per le stime delle emissioni dei veicoli sono stati utilizzati i dati della flotta dell'area geografica esaminata, presi dalla <i>Driver and Vehicle Licensing Agency</i> (DVLA).</p>	<p>alla località di Norfolk, che comprende 435 scuole primarie e 77 secondarie per un totale di 54.383 alunni. I dati utilizzati in questo documento sono limitati agli alunni domiciliati a Norfolk e che frequentano anche una scuola di Norfolk durante l'anno scolastico 2010-2011.</p>	<p>mirati a favorire gli spostamenti attivi. Per tutti e tre gli scenari si è ipotizzato che una parte del tragitto fatto precedentemente con l'automobile venisse sostituito da modalità attive. I cambiamenti maggiori osservati hanno interessato distanze brevi, meno quelle più lunghe.</p>	<p>primaria sono significative (13,2%). Il terzo scenario ha un impatto su scala geografica più ampia, ma in media la riduzione delle emissioni è simile allo scenario 1 (11,5 % scenario 1 vs 11,7% scenario 3), inoltre le differenze tra scuola primaria e secondaria sono più rilevanti. Le scuole secondarie sono più attive e lo scenario mirato sembra essere il più efficace.</p>
<p>Gavrilova (2014) (Pedibus]</p>	<p>Per stimare le emissioni relative agli spostamenti casa-scuola sono stati utilizzati i dati da un'indagine condotta nelle scuole riguardanti il tasso di utilizzo del trasporto motorizzato e le distanze percorse e l'età media dei veicoli e lo standard ambientale dei veicoli.</p>			<p>È stato stimato che l'implementazione del pedibus nella scuola elementare "St. Sava" porterebbe un risparmio di 0,077 kt di emissioni di CO₂ per il periodo 2013-2024. Nell'ambito del progetto, è stato ipotizzato di implementare il pedibus in altre quattro scuole primarie nella città di Belgrado, il che potrebbe portare una riduzione annuale di 0,026 kt di CO_{2eq}.</p>

7 Micromobilità

7.1 Introduzione

La micromobilità è una soluzione innovativa di trasporto urbano che mira a fornire opzioni di viaggio a breve distanza, compresi gli spostamenti del primo e dell'ultimo chilometro. L'attrattiva della micromobilità è fornire un'alternativa di trasporto flessibile, sostenibile, economica e su richiesta, riducendo la dipendenza dall'uso di veicoli privati per gli spostamenti a breve distanza. Le soluzioni di micromobilità comprendono una serie di dispositivi leggeri o mini-veicoli che funzionano a velocità solitamente non superiori a 45 km/h. Questi dispositivi, che comprendono biciclette, monopattini, *skateboard*, *segway* e *hoverboard*, possono essere a trazione umana o elettrica e sono di proprietà privata o condivisa. La loro popolarità riflette anche il crescente riconoscimento del fatto che l'uso di veicoli privati ha un impatto negativo sulla salute e sulla qualità della vita, soprattutto se si considerano la congestione, le emissioni e la qualità dell'aria. Negli ultimi anni, e con i progressi del *mobile computing*, la micromobilità ha guadagnato ulteriore popolarità come modalità di trasporto condivisa che può essere prenotata utilizzando applicazioni popolari su dispositivi mobili e smartphone connessi. La rapida adozione della micromobilità, soprattutto per gli spostamenti del primo e dell'ultimo chilometro, ha contribuito anche a promuovere modalità di spostamento attive, con benefici per la salute degli abitanti delle città. Sempre più spesso la micromobilità è riconosciuta come un mix importante nell'ecosistema della mobilità urbana intelligente, che adattarsi facilmente alle esigenze degli utenti, compresi gli spostamenti individuali e familiari su brevi distanze, ma anche per la consegna di pacchi nelle aree urbane.

Le principali città del mondo hanno implementato una serie di forme di micromobilità condivisa come alternativa ai veicoli privati per gli spostamenti brevi. Attualmente, le varie forme di micromobilità sono ampiamente utilizzate per servire viaggi di passeggeri inferiori a 5 km, che rappresentano il 50-60% dei chilometri totali percorsi dai passeggeri in Cina, nell'UE e negli Stati Uniti. I nuovi servizi offerti dalla micromobilità condivisa, incrementati dal sempre più diffuso utilizzo degli smartphone e della localizzazione hanno modificato significativamente le modalità di viaggio con implicazioni sociali, economiche, energetiche e ambientali. I servizi di micromobilità condivisa hanno contribuito a risolvere il problema del primo/ultimo miglio di accesso ai servizi di trasporto pubblico, riducendo potenzialmente la dipendenza dai veicoli a motore di proprietà privata. Si dovrebbero considerare le diverse modalità di micromobilità come un'integrazione alle modalità di spostamento esistenti. L'introduzione di modalità di micromobilità non dovrebbe essere accompagnata da una riduzione del livello dei servizi di trasporto pubblico, ma si dovrebbe tendere a realizzare una relazione di complementarità tra i servizi esistenti per massimizzare il benessere complessivo degli utenti, considerando la micromobilità come parte di un sistema di trasporto integrato. L'integrazione della micromobilità con il trasporto pubblico rende entrambi più competitivi e più *user friendly*, il che può contribuire a ridurre la diffusa dipendenza dall'auto. Una buona integrazione dovrebbe

considerare simultaneamente tre aspetti: le caratteristiche del sistema (ad esempio, le infrastrutture necessarie per la micromobilità, i costi e le politiche pubbliche), gli utenti (ad esempio, i loro attributi socio-economici e demografici e le preferenze) e gli impatti (ad esempio, l'accessibilità,⁹⁴ i passeggeri, i benefici economici e gli effetti sulla salute) (Jiangping *et al.*, 2022).

È in questo contesto che i servizi di mobilità condivisa, come applicazione del concetto di *sharing economy*, sono emersi nelle aree urbane. La mobilità condivisa può comprendere più modalità e può operare secondo diversi modelli di business. Ad esempio, i servizi di mobilità condivisa legati alle automobili includono il *ride-hailing* o *ride-sourcing*, il *car sharing* a postazione fissa, il *car sharing free floating* e il *ride sharing*. Nel complesso, il potenziale dirompente della mobilità condivisa è amplificato dal suo rapido sviluppo, poiché si prevede che il suo valore nel mercato globale crescerà da 1,1 miliardi di dollari nel 2015 a 6,5 miliardi di dollari entro il 2024 (Latinopoulos *et al.*, 2021).

I monopattini elettrici come servizio di micromobilità condivisa hanno fatto la loro comparsa nel 2017, quando il primo servizio *dockless* o *free floating* è stato lanciato da Bird a Santa Monica, in California. Tuttavia, la loro storia come veicolo inizia più di un secolo fa. Il primo monopattino motorizzato apparve nel 1915, si chiamava Autoped ed era molto popolare negli Stati Uniti. Il mezzo veniva utilizzato per il pendolarismo e per scopi ricreativi, oltre che da aziende come i servizi postali per consegnare la posta. Il costo elevato rispetto alle biciclette e il basso comfort rispetto alle motociclette sono stati i principali fattori che ne hanno limitato il successo commerciale.

Passando agli anni recenti, il primo monopattino motorizzato è stato rilasciato da Go-Ped nel 1985. Con l'invenzione delle batterie agli ioni di litio e gli sviluppi tecnologici dei motori elettrici, nell'ultimo decennio il progetto Go-Ped ha iniziato a trasformarsi nei primi prototipi di monopattini elettrici. Rispetto alle loro controparti alimentate a gas, i monopattini elettrici offrono una significativa riduzione dei costi. Tuttavia, sembra che il passo decisivo per la loro popolarità sia stata la consapevolezza delle loro potenzialità acquisita dopo con l'espansione dei sistemi di *bike sharing*. Sebbene i monopattini elettrici condivisi siano in circolazione solo da pochi anni, stanno rapidamente diventando parte integrante delle città di tutto il mondo, modificando i nostri modelli di mobilità.

Si stima che solo in Europa ci siano 20 milioni di utenti e che il tasso di adozione dei monopattini elettrici sia quattro volte più veloce di quello del *bike sharing*. Le prime osservazioni suggeriscono che hanno già avuto un impatto positivo nel generare meno inquinamento, nel diminuire i livelli di utilizzo dell'auto e nell'apportare benefici alla salute. I monopattini elettrici sono alimentati da un motore elettrico e hanno una velocità media

⁹⁴ L'accessibilità è la qualità del viaggio e si realizza a livello di comunità e di singolo individuo attraverso tecniche di gestione dell'accesso (*Access Management techniques*) ai differenti usi del territorio. Si concentra sui tempi di percorrenza, sui costi di viaggio, sulle opzioni di viaggio, sul comfort e sui rischi, rispondendo alle esigenze di tutti all'interno della comunità. L'obiettivo è aumentare la capacità complessiva del sistema di transito senza compromettere l'efficienza e la facilità di accesso. (<https://community-planning.extension.org/>)

di 25 km/h. Il ridotto sforzo fisico, rispetto alla bicicletta, li rende appetibili al pubblico per una varietà di viaggi o condizioni esterne, come il caldo estivo, e per un'ampia gamma di tipologie di utenti. Altri fattori che hanno innescato la loro crescita accelerata sono la flessibilità dei prezzi e la facilità di guida, in quanto non è richiesta alcuna competenza particolare.

Se da un lato i vantaggi della micromobilità e delle nuove modalità flessibili come i monopattini elettrici sono indiscutibili, dall'altro pongono delle sfide per la regolamentazione comunale. I problemi di sicurezza, gli atti di vandalismo e l'incertezza della regolamentazione hanno creato dubbi sul successo a lungo termine di questa nuova modalità. Fino a poco tempo fa, i monopattini elettrici in diverse città del mondo operavano in una relativa "zona grigia" perché non erano inclusi nel codice dei veicoli della strada.

Dopo una ricerca bibliografia effettuata sui database PubMed, Science Direct e DOAJ, sono stati selezionati 5 articoli, che esaminavano i benefici ambientali in relazione all'utilizzo di servizi di micromobilità.

7.2 Stato dell'arte

Abduljabbar *et al.* (2021) hanno effettuato una revisione sistematica della letteratura sul ruolo della micromobilità come soluzione trasformativa per raggiungere i risultati di sostenibilità negli ambienti urbani. Lo studio ha mostrato che le modalità di micromobilità sono generalmente considerate un modo di viaggiare a basse emissioni di carbonio e trasformativo, che può contribuire in modo significativo alla sostenibilità urbana. L'analisi delle citazioni, in particolare, ha aiutato a classificare la letteratura in quattro temi di ricerca principali che riguardano i benefici ambientali, la tecnologia, le politiche e le scelte comportamentali.

I risultati principali riportati dalla *review* sono stati: il contributo della micromobilità ad alleviare la congestione, ad affrontare le disuguaglianze nell'accessibilità ai servizi e alle opportunità e a ridurre le emissioni. Le soluzioni di micromobilità consentono di ottenere questi miglioramenti sotto diversi aspetti. Il primo aspetto è la quantità e il tipo di energia richiesta dalla micromobilità rispetto ad altre modalità di trasporto, perché i veicoli di piccole dimensioni consumano molta meno energia. Nei Paesi in cui la produzione di energia pulita è limitata, questi veicoli di piccole dimensioni, che richiedono una quantità minore di energia, hanno in proporzione benefici più ampi. Inoltre, tutte le nuove forme di micromobilità utilizzano motori elettrici, più efficienti e meno inquinanti dei motori a combustione. Da un punto di vista pratico, tuttavia, questo risultato può essere raggiunto solo prendendo in considerazione una visione olistica dell'integrazione della micromobilità nel mix di soluzioni di trasporto attraverso strategie mirate per ridurre gli effetti ambientali del ciclo di vita associati al loro utilizzo.

Lo studio di Liou *et al.* (2021) è il primo a fornire una matrice sistematica dei benefici monetari, compresi i benefici in termini di riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) e

altri benefici per la salute derivanti dalla riduzione dell'inquinamento atmosferico, modificando il sistema di trasporto pubblico su strada a Taiwan con tipologie a basse emissioni di carbonio. In particolare, i benefici totali in termini di riduzione delle emissioni derivanti dal passaggio da tutti i veicoli a combustione interna a veicoli ibridi, veicoli elettrici ibridi plug-in o veicoli elettrici genererebbe una media di 760 milioni di dollari di riduzione delle emissioni di gas serra e 2.091 milioni di dollari di benefici per la salute, basati sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico, per un beneficio totale di 2.851 milioni di dollari all'anno. Per un passaggio da monopattini a combustione a monopattini elettrici leggeri o pesanti, i benefici medi di riduzione delle emissioni di gas serra sarebbero di 96 milioni di dollari, mentre i co-benefici per la salute derivanti dalla riduzione dell'inquinamento atmosferico sarebbero circa 1.000 milioni di dollari, per un beneficio totale di 1.100 milioni di dollari all'anno. È essenziale e importante valutare i benefici derivanti dalla riduzione delle emissioni di gas serra e i co-benefici per la salute ottenuti grazie alla riduzione del PM_{2,5} e dei suoi precursori, NO_x e SO_x, in base ai diversi usi del trasporto.

Questo studio stima la riduzione delle emissioni di GHG e degli inquinanti atmosferici in termini monetari per il trasporto privato su strada.

Il punto di vista convenzionale riguardo ai cambiamenti nelle emissioni di gas serra nel settore dei trasporti è di perseguire obiettivi di consistente riduzione delle emissioni. A tal fine, cambiare tutti gli attuali ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*) a HEV (*Hybrid Electric Vehicle*), PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) e EV (*Electric Vehicle*) ridurrà le emissioni rispettivamente del 42,5%, 39,8% o 42,2%, nel caso in esame. Senza ulteriori informazioni sul numero esatto di veicoli che passano da un tipo di combustione interna a uno elettrico, è ragionevole considerare la riduzione delle emissioni del 41,5% ottenuta calcolando la media delle modifiche apportate a ciascuno dei tre tipi di veicoli elettrici. Allo stesso modo, per la forma di trasporto quotidiano più comunemente usata a Taiwan, i monopattini, le emissioni di gas serra diminuiscono dal 60% al 76% a seconda del tipo di monopattino scelto.

Poiché le informazioni relative alla riduzione delle emissioni di gas serra e i co-benefici per la salute per 1.000 km di guida o di viaggio sono forniti in una matrice di benefici, il beneficio totale può essere calcolato per qualsiasi combinazione di veicoli e/o monopattini che passano al tipo elettrico. Tali informazioni sono importanti anche per la determinazione delle tasse, una delle politiche di controllo delle emissioni di gas serra. Poiché la riduzione dei gas serra ridurrà contemporaneamente i livelli di inquinanti atmosferici, è molto più facile persuadere le persone ad accettare la tassa per la riduzione delle emissioni di gas serra. Inoltre, la riduzione delle emissioni non è esente da costi, le informazioni sui benefici derivanti dal passaggio a un trasporto privato su strada a basse emissioni di carbonio sono essenziali per incoraggiare le persone a cambiare abitudini e scelte di mobilità. Se l'attenzione si concentra sui benefici di riduzione delle emissioni di gas serra e sui co-benefici per la salute, come presentato in questo studio, il sussidio può essere equamente allocato per un veicolo o un monopattino passando da un veicolo tradizionale a uno elettrico. Attualmente, a Taiwan ci sono più di 13 milioni di monopattini

con motore a combustione da 50 o 125 cc, circa il doppio dei veicoli. È molto più facile sovvenzionare il passaggio dei monopattini al tipo elettrico.

Severengiz *et al.* (2020) illustrano, nella loro ricerca, una metodologia per determinare l'impatto ambientale dei nuovi servizi di mobilità, come i monopattini elettrici condivisi. Il documento utilizza indicatori ambientali quantificabili, tra cui il potenziale di riscaldamento globale, la qualità dell'aria locale e la domanda di spazi pubblici, presentando un caso studio per la città di Bochum, in Germania. Per dimostrare il potenziale impatto ambientale di un sistema di monopattini elettrici in condivisione, sono stati sviluppati ed esaminati tre scenari di ripartizione modale. I risultati mostrano che i nuovi servizi di mobilità potrebbero ridurre l'impatto ambientale dei sistemi di trasporto urbano.

Il primo passo è la valutazione dell'impatto ambientale delle diverse modalità di trasporto sulla base degli indicatori ambientali selezionati. Applicando l'impatto ambientale di ciascuna modalità di trasporto alla ripartizione modale della città, è possibile quantificare l'impronta ambientale dell'intero settore del trasporto privato della città.

Gli autori individuano due aree di indagine: il trasporto individuale motorizzato: il *Motorised Individual Transport* (MIT) e i nuovi servizi di mobilità, rappresentati dalla condivisione di monopattini. La valutazione dei monopattini condivisi include informazioni specifiche, come la sostituzione delle batterie effettuata dal personale che utilizza veicoli di servizio a motore diesel. In questo caso studio i monopattini sono elettrici con una velocità massima non superiore a 45 km/h, con una potenza nominale continua massima non superiore a 4 kW e una capacità di trasporto fino a due persone. Per quanto concerne l'analisi del trasporto pubblico, il documento si basa sui dati relativi alle modalità di trasporto urbano come gli autobus e i tram. Inoltre, vengono presi in considerazione gli spostamenti in bicicletta e a piedi. Viene inoltre considerata anche la produzione di biciclette.

La valutazione del ciclo di vita (LCA) prende in esame la produzione, la fase di utilizzo e il riciclo delle auto. La fase di utilizzo è suddivisa tra emissioni *Well-to-Tank* (WtW) e *Tank-to-Wheels* (TtW). Le emissioni di gas serra sono espresse in *Global Warming Potential over 100 years* (GWP100) in kg di CO₂ equivalente per persona per km. Poiché il riscaldamento globale è un problema mondiale, il GWP100 è calcolato sul ciclo di vita di ciascun prodotto di mobilità. La qualità dell'aria locale è valutata su base TtW per il PM e per gli NO_x, ciascuno espresso in mg per persona per km. La prospettiva TtW riflette le problematiche locali associate ai prodotti di mobilità. Il calcolo delle emissioni di PM include sia i gas di scarico sia le emissioni dovute all'abrasione degli pneumatici, della strada e dei freni. La domanda di spazio nel traffico per persona mette in relazione la domanda di spazio di un veicolo nel traffico con il numero effettivo di persone trasportate per veicolo (monopattino, bicicletta, a piedi, trasporto pubblico, MIT). Per calcolare la domanda di spazio nel traffico, sono state utilizzate le dimensioni dei modelli più comuni per il MIT e il trasporto pubblico, mentre per la bicicletta e il monopattino sono state utilizzate le dimensioni di un veicolo medio standard. La domanda di spazio di parcheggio al giorno è calcolata moltiplicando la domanda di spazio di parcheggio di un veicolo per il tempo di occupazione dello spazio

pubblico di parcheggio al giorno. Questi indicatori sono stati selezionati in quanto più rilevanti per le problematiche delle aree urbane associate al settore dei trasporti.

Per ogni indicatore ambientale il MIT rappresenta la linea di base al 100%. Tutte le altre modalità di trasporto sono indicate come frazioni di questa linea di base. In termini di GWP100 il MIT è il modo di trasporto con le emissioni più elevate. Ciò è dovuto al fatto che un numero relativamente basso di persone (1,3 in media per pkm) viene trasportato spostando una massa relativamente elevata e utilizzando quasi il 100% di combustibili fossili. Il GWP dei monopattini condivisi è meno della metà di quello del MIT e può essere ulteriormente ridotto se le batterie vengono caricate utilizzando elettricità da fonti rinnovabili (rispettivamente al 19% per i monopattini privati e al 25% per quelli condivisi). Vale la pena notare che la differenza tra monopattini elettrici e monopattini elettrici in condivisione è rappresentata dalle emissioni locali di PM e NO_x prodotte dai veicoli con motore a combustione azionati dai dipendenti durante le operazioni di scambio delle batterie, che sostituiscono le batterie esaurite con quelle cariche, in un sistema in condivisione. Pertanto, i monopattini condivisi non sono esenti da emissioni locali di PM e NO_x. La frequenza dello scambio e la distanza percorsa sono state determinate sulla base delle esperienze dei dipendenti e degli studi di Innoz⁹⁵ sul comportamento degli utenti durante la condivisione dei monopattini. Anche il calcolo del tempo di sosta di un monopattino in condivisione si basa su questi studi. Con una media di 6 noleggi per veicolo al giorno e un tempo medio di utilizzo per noleggio di 17,5 minuti, si ottiene un tempo di circolazione di 1,75 ore al giorno. I risultati per i monopattini elettrici e monopattini elettrici in condivisione si riferiscono al parco elettrico tedesco con 568 gCO₂/kWh. I risultati per il trasporto pubblico si basano sui dati relativi ad autobus e tram. È da notare che le emissioni di NO_x per il trasporto pubblico sono più elevate. Ciò è dovuto principalmente al fatto che molti veicoli sono diesel.

L'attuale ripartizione modale è considerata un sistema di riferimento che rappresenta lo *status quo*. Inoltre, sono stati sviluppati tre scenari per studiare come potrebbe cambiare la ripartizione modale introducendo un sistema di monopattini elettrici in condivisione a Bochum. Si ipotizza che il sistema di monopattini elettrici in condivisione copra il 5% degli spostamenti effettuati e che le quote degli altri mezzi di trasporto cambino in modi diversi. Questi scenari si basano sull'ipotesi che, sebbene le quote delle tipologie di trasporto nella ripartizione modale cambino, il volume di traffico totale non venga influenzato.

- Scenario 1: il nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione offre un'alternativa al MIT. Rafforzando il servizio di condivisione dei monopattini, la quota del MIT nella ripartizione modale si riduce. Tuttavia, questo effetto è limitato, poiché il monopattino è un'alternativa interessante solo per le brevi distanze. Si ipotizza che la percentuale di spostamenti con i mezzi pubblici, in bicicletta o a piedi rimanga invariata.
- Scenario 2: il potenziamento del nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione porta anche a un maggiore utilizzo dei mezzi pubblici. Questo

⁹⁵ Howe, E. Global Scooter Sharing Market Report. Innoz; 2018.

scenario si basa sull'ipotesi che i servizi di *sharing* e il trasporto pubblico formino insieme un "servizio di mobilità intermodale" che rappresenta un'alternativa interessante e conveniente al MIT, anche per le distanze più lunghe. La quota del MIT nella ripartizione modale è quindi in diminuzione. La percentuale di spostamenti in bicicletta o a piedi rimane invariata.

- Scenario 3: il nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione è percepito come un'alternativa al trasporto pubblico, agli spostamenti a piedi e in bicicletta, ma non al MIT. Di conseguenza, la quota di spostamenti effettuati con i mezzi pubblici, in bicicletta o a piedi diminuirà, ma la quota del MIT rimarrà invariata.

I risultati mostrano che nello scenario 2, si riduce maggiormente l'impatto ambientale per tutti gli indicatori, in particolare la domanda di parcheggi; in modo meno netto diminuiscono il fabbisogno di spazio per il traffico e le emissioni di NO_x. Il GWP in questo scenario diminuisce di 7 punti percentuali rispetto alla situazione di riferimento. Lo scenario 1 rappresenta un leggero miglioramento dell'impatto ambientale dei trasporti. Le emissioni di GWP e NO_x sono inferiori di circa cinque punti percentuali rispetto allo scenario di riferimento. Le emissioni di PM e il fabbisogno di spazio per i parcheggi diminuiscono ulteriormente. Nello scenario 3, il fabbisogno di spazio potrebbe addirittura aumentare. Anche le emissioni di GWP e PM non migliorano. Solo per le emissioni di NO_x si registra una diminuzione.

Nel complesso, l'uso di monopattini elettrici in condivisione ha un impatto ambientale inferiore a quello del MIT, ma non è altrettanto ecologico come il trasporto pubblico, gli spostamenti a piedi e in bicicletta. Quando si introduce in una città un servizio di monopattini elettrici in condivisione, si raccomanda di promuovere sempre il trasporto pubblico, gli spostamenti a piedi e in bicicletta. Questo è l'unico modo per garantire che le modalità di trasporto meno rispettose dell'ambiente (MIT) rispetto ai monopattini vengano sostituiti dall'introduzione della condivisione e non a svantaggio dei modi di trasporto più ecologico (trasporto pubblico, spostamenti a piedi e in bicicletta).

Con la metodologia sviluppata in questo lavoro è possibile non solo quantificare l'impatto ambientale, ma anche formulare raccomandazioni alle autorità locali per ridurre l'impatto ambientale dei nuovi servizi di mobilità. Una raccomandazione potrebbe essere la distribuzione di stazioni decentralizzate per lo scambio di batterie alimentate da energia elettrica rinnovabile, dove l'utente può cambiare la batteria.

L'obiettivo della ricerca sviluppata in India da Maheshwari *et al.* (2020) è quello di determinare un mix ottimale delle varie modalità di trasporto possibili, che soddisfi la futura domanda di trasporto e tenga sotto controllo le emissioni di anidride carbonica,

minimizzando il costo dell'investimento. Le metodologie utilizzate sono l'analisi Pinch⁹⁶ e la metodologia della curva composita limitante⁹⁷ per trovare la soluzione ottimale.

Nello studio sono prese in considerazione: le auto elettriche, i monopattini elettrici, i risciò elettrici e gli autobus a benzina; per i modi di trasporto, si considerano le emissioni di esercizio, mentre per i veicoli che verranno aggiunti per soddisfare la crescente domanda, si considerano le emissioni del ciclo di vita.

Per stimare la ripartizione modale che ridurrebbe le emissioni di CO₂, sono stati studiati tre scenari, al 2032, basati sulla domanda di viaggio prevista, considerando i passeggeri-chilometro:

1. *business as usual*;
2. si lascia invariata l'attuale ripartizione modale, mentre vengono introdotte nuove tecnologie automobilistiche;
3. riduzione delle emissioni di CO₂ minimizzando i costi.

L'obiettivo di questo scenario è trovare un mix ottimale di modalità per la futura domanda di trasporto passeggeri nel 2032. L'ottimizzazione è stata effettuata con un vincolo sul livello di emissioni di carbonio, soddisfacendo la domanda prevista e minimizzando il costo sostenuto per raggiungere il livello di emissioni previsto.

I risultati ottenuti per gli scenari sono i seguenti:

- Lo Scenario 1 stima che nel 2032 saranno emessi circa cinque miliardi di tonnellate di CO₂, se la ripartizione modale rimane invariata e non si introduce l'utilizzo di nuove tecnologie.
- Lo Scenario 2 stima che nel 2032 saranno emessi 3,78 miliardi di tonnellate di CO₂, un valore pari a circa il 74,5% dello scenario 1. Tuttavia, i costi salirebbero ad un livello enorme.
- Nello Scenario 3 i risultati vengono suddivisi in due scenari: 3A e 3B. Il primo prevede una riduzione del 25% delle emissioni di CO₂ ma i risultati potrebbero variare notevolmente a causa del diverso numero di veicoli privati. I modelli 3A e 3B illustrano il probabile impatto sulla ripartizione modale in base al costo prioritario delle emissioni per chilometro. Nel modello 3A, la quota massima di spostamenti a piedi e in bicicletta viene mantenuta come nell'anno base 2012, mentre, nel modello 3B viene aumentato il limite al 25%. È opportuno ricordare che viene data maggiore importanza al sistema di trasporto pubblico in termini di quota di autobus, connettività *end-to-end* e connettività dell'ultimo miglio attraverso l'introduzione di veicoli a tre ruote. Una riduzione del 37% delle

⁹⁶ La Pinch Analysis è un metodo di ottimizzazione di reti complesse di scambiatori, che si possono verificare in situazioni nelle quali si presentano carichi termici e carichi di raffreddamento a diversi livelli di temperatura. https://e-l.unifi.it/pluginfile.php/852908/mod_resource/content/2/Introduzione_alla_Pinch_Analysis.pdf

⁹⁷ La curva composita rappresenta il processo di scambio termico (raffreddamento o riscaldamento) di un insieme di flussi (caldi o freddi), che si usa con la Pinch Analysis. https://moodle2.units.it/pluginfile.php/398135/mod_resource/content/1/2021_1a%20parte%20Pinch%20Analysis_v01.pdf

emissioni di CO₂ è possibile se si concepiscono quartieri a misura di pedone e di ciclista, che soddisfino anche le esigenze di una città sana e di uno stile di vita sano.

Utilizzando l'analisi Pinch, le soluzioni sono risultate controintuitive, in quanto il costo sostenuto dovrebbe aumentare quando il livello di emissioni diminuisce. Tuttavia, la distribuzione della domanda per i futuri passeggeri potrebbe essere la chiave per la riduzione, soprattutto se si considera il trasporto non motorizzato. Quando il livello di emissioni è diminuito, aumenta la domanda di mezzi di trasporto più economici, come gli spostamenti a piedi e in bicicletta, riducendo così il costo totale. In questo studio sono state considerate solo le emissioni di anidride carbonica. Un indice completo che includa anche gli altri inquinanti prodotti dai veicoli può fornire un quadro migliore dei danni causati all'ambiente.

Hollingsworth *et al.* (2019) focalizzano la loro attenzione sull'impatto ambientale del ciclo di vita dei monopattini elettrici condivisi, stimando gli impatti totali di questa opzione di mobilità associati al riscaldamento globale, all'acidificazione, all'eutrofizzazione e all'impatto respiratorio.

Il sistema LCA prende in considerazione i materiali, la produzione, il trasporto, l'uso e la ricarica dei monopattini elettrici e il fine vita. A causa della mancanza di dati disponibili e della breve durata di vita dei monopattini, viene esclusa la manutenzione ordinaria (es. sostituzione di pneumatici o parti). L'unità funzionale dello studio è il chilometro-passeggero percorso.

Gli autori hanno realizzato un inventario accurato dei componenti necessari per costruire un monopattino elettrico, basando la caratterizzazione dei materiali sulla documentazione fornita dal produttore e sui codici dei materiali impressi direttamente sui componenti. Gli oneri di produzione sono stimati a partire dal processo della produzione di biciclette elettriche, che viene utilizzato come *proxy* per l'energia necessaria per produrre e assemblare il monopattino a partire dai suoi componenti. È stato utilizzato un approccio basato sul materiale riciclato e nel caso in oggetto si ipotizza un riciclo del 24% di alluminio. Supponendo che il monopattino e la batteria siano assemblati a Shenzhen (Cina), come indicato dal produttore, sono stati calcolati gli oneri di trasporto fino in California (USA), stimando un risultato di 207 tonnellate-km e 70 tonnellate-km rispettivamente per la spedizione e l'autotrasporto di ogni monopattino.

Gli impatti della fase di utilizzo sono influenzati dalla distanza giornaliera percorsa da ogni monopattino, dal metodo di prelievo dei monopattini per la ricarica, dalla frequenza di ricarica, dall'ora del giorno e dal luogo di ricarica. Gli autori assumono una velocità di carica di 84 W e una carica completa della batteria di 0,335 kWh. Inoltre, è stato ipotizzato che gli addetti alla manutenzione ritirino i monopattini ogni sera per ricaricarli, indipendentemente dallo stato della carica delle batterie.

Utilizzando il simulatore di emissioni dei veicoli a motore dell'EPA (MOVES versione 2014a)⁹⁸, sono state stimate (kg CO_{2eq}/miglio) le emissioni delle autovetture e degli autocarri sia a benzina che a gasolio. Per gli effetti respiratori (kg PM_{2,5}-eq/miglio), l'acidificazione (kg SO₂-eq/miglio) e l'eutrofizzazione (kg N-eq/miglio), è stata utilizzata una distribuzione lognormale con piccoli veicoli passeggeri (euro 4).

Per quanto concerne la vita media dei monopattini l'intervallo è compreso tra 0,5-2 anni, in base alla garanzia del produttore e alle segnalazioni di danni nell'ambito di programmi di utilizzo condiviso (un monopattino condiviso può avere una durata molto più breve a causa di danni arrecati da parte degli utenti).

Per analizzare la variabilità e l'incertezza intrinseca di alcuni parametri, gli autori hanno condotto uno studio simulato con il metodo Monte Carlo, al fine di determinare la distribuzione complessiva degli impatti del ciclo di vita.

Oltre al caso base, sono stati realizzati tre scenari in base alla raccolta dei monopattini per la ricarica e un ulteriore scenario relativo alla durata di vita del monopattino elettrico:

- "Distanza di raccolta ridotta": si ipotizza che la distanza di raccolta e di distribuzione dei monopattini sia ridotta, con il risultato di 0,6 miglia percorse dal raccoglitore per ogni mezzo.
- "Limite di esaurimento della batteria": i monopattini vengono recuperati e caricati solo quando lo stato di carica della loro batteria scende al di sotto del 50%.
- "Alta efficienza del veicolo": i veicoli utilizzati per la ridistribuzione dei mezzi hanno un'efficienza del carburante di 35 miglia per gallone (cioè 235 g CO_{2eq}/miglio).
- "Alta durata degli monopattini": si ipotizza che la durata di vita di vita dei monopattini sia fissata a due anni.

Gli autori hanno riscontrato che gli impatti sul riscaldamento globale associato all'uso di monopattini condivisi sono influenzati da materiali, dalla produzione e dall'uso del mezzo per la raccolta dei monopattini per la ricarica. L'aumento della durata di vita dei monopattini, la riduzione della distanza di raccolta e di distribuzione, l'uso di veicoli più efficienti e strategie di ricarica meno frequenti possono ridurre gli impatti ambientali negativi in modo significativo.

Senza questi sforzi, i calcoli dello scenario di base per le emissioni del ciclo di vita mostrano un aumento netto dell'impatto sul riscaldamento globale rispetto ai metodi di trasporto compensati nel 65% delle simulazioni. Nel complesso, questi risultati suggeriscono che, sebbene i monopattini possano essere una soluzione efficace alla congestione urbana e al problema dell'ultimo miglio, non necessariamente riducono gli impatti ambientali del sistema di trasporto.

⁹⁸ Il MOTO Vehicle Emission Simulator (MOVES) dell'EPA è un sistema di modellazione delle emissioni all'avanguardia che stima le emissioni delle fonti mobili a livello nazionale, di contea e di progetto per quanto riguarda gli inquinanti atmosferici, i gas serra e tossici dell'aria. (<https://www.epa.gov/moves/latest-version-motor-vehicle-emission-simulator-moves>).

Le città e le aziende produttrici hanno a disposizione diverse opzioni per ridurre gli oneri ambientali del ciclo di vita associati all'utilizzo dei monopattini, ad esempio: permettere ai monopattini di rimanere nelle aree pubbliche durante la notte diminuirebbe l'onere associato al problema della ricarica e della redistribuzione; una gestione centralizzata di raccolta dei monopattini potrebbe ridurre i chilometri percorsi in auto per la raccolta e la distribuzione; adottare o far rispettare politiche anti-vandalismo e incentivare l'uso di mezzi efficienti per la raccolta/distribuzione.

I risultati dell'analisi Monte Carlo mostrano un valore medio degli impatti sul riscaldamento globale del ciclo di vita pari a 202 g CO_{2eq}/passeggero-miglio, dovuto a materiali e produzione (50%), seguito dalla raccolta giornaliera per la ricarica (cui corrisponde un 43% dell'impatto).

Gli autori mostrano come, migliorando le fasi di raccolta e ricarica quindi, utilizzando veicoli a basso consumo di carburante per la raccolta (con un rendimento di 177 g CO_{2eq}/passeggero-miglio), limitando la raccolta dei monopattini a quelli con uno stato di carica della batteria basso (164 g CO_{2eq}/miglio-passeggero) e la riduzione delle percorrenze per la raccolta e la distribuzione dei monopattini (147 g CO_{2eq}/miglio-passeggero), si riducano gli impatti sul riscaldamento globale del ciclo di vita. Inoltre, i risultati si sono dimostrati molto sensibili alla durata di vita dei monopattini; infatti, garantendo che i monopattini condivisi siano utilizzati per due anni si riducono le emissioni medie del ciclo di vita a 141 g CO_{2eq}/km.

In base alle ipotesi di base, gli autori hanno riscontrato che le emissioni di gas serra del ciclo di vita associate ai monopattini è più alto nel 65% delle simulazioni Monte Carlo rispetto alle altre modalità di trasporto che vengono sostituite. L'impatto scenderebbe al 35-50% con il miglioramento e l'efficientamento dei processi di raccolta dei monopattini e al 4% ipotizzando una durata di vita media dei monopattini di due anni.

7.3 Conclusioni

La micromobilità può contribuire ad alleviare la congestione, ad affrontare le disuguaglianze nell'accessibilità ai servizi e alle opportunità e a ridurre le emissioni. Inoltre, i veicoli di piccole dimensioni consumano meno energia. Tuttavia, i benefici possono essere raggiunti solo prendendo in considerazione una visione olistica dell'integrazione della micromobilità nel mix di soluzioni di trasporto attraverso strategie mirate per ridurre gli effetti ambientali del ciclo di vita associati al loro utilizzo.

La letteratura riguardante i monopattini elettrici è ancora piuttosto esigua, considerando che la diffusione è avvenuta in modo prorompente solo negli ultimissimi anni. Dagli studi analizzati è emerso che gli impatti ambientali della ricarica elettrica sono modesti rispetto alla produzione di materiali, alla fabbricazione e agli altri oneri associati al trasferimento dei monopattini alle stazioni di ricarica.

I risultati dello studio di Hollingsworth *et al.* (2019) suggeriscono che, sebbene i monopattini elettrici possano essere una soluzione efficace alla congestione urbana e al

problema dell'ultimo miglio, non necessariamente riducono gli impatti ambientali del sistema di trasporto; solo migliorando le fasi di raccolta e ricarica dei mezzi si può arrivare a una riduzione degli impatti sul riscaldamento globale derivanti dal ciclo di vita dei monopattini elettrici. L'aumento della durata di vita dei monopattini (ad esempio attraverso politiche anti-vandalismo per ridurre i danni e l'uso improprio, prolungandone così l'aspettativa di vita operativa), la riduzione delle percorrenze per la raccolta e distribuzione durante la ricarica delle batterie, una migliore gestione centrale dei processi di redistribuzione, una ricarica meno frequente e la possibilità di lasciare i monopattini in aree pubbliche sicure, ridurrebbero il loro impatto ambientale. Inoltre, le corse con i monopattini sostituiscono l'uso di veicoli privati solo in minima parte; se i monopattini sostituissero per metà del tempo gli spostamenti con veicoli privati, si otterrebbe (in media) un beneficio ambientale netto.

Secondo le valutazioni di Severengiz *et al.* (2020) i servizi di monopattini elettrici in condivisione hanno un impatto ambientale inferiore a quello del trasporto privato motorizzato, ma non sono altrettanto ecologici come il trasporto pubblico, gli spostamenti a piedi e in bicicletta.

7.4 Tabella riepilogativa micromobilità

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Liou et al. (2021)	Fornisce una matrice sistematica dei benefici monetari, compresi i benefici in termini di riduzione delle emissioni di gas serra (GHG) e altri benefici per la salute derivanti dalla riduzione dell'inquinamento atmosferico, modificando il sistema di trasporto pubblico su strada a Taiwan con tipologie a basse emissioni di carbonio		Un solo scenario: passaggio da tutti i veicoli a combustione interna a veicoli ibridi, veicoli elettrici ibridi plug-in o veicoli elettrici genererebbe una media di 760 milioni di dollari di riduzione delle emissioni di gas serra e 2.091 milioni di dollari di benefici per la salute, basati sulla riduzione dell'inquinamento atmosferico, per un beneficio totale di 2.851 milioni di dollari all'anno	Cambiare tutti gli attuali ICEV (Internal Combustion Engine Vehicle) a HEV (Hybrid Electric Vehicle), PHEV (Plug-in Hybrid Electric Vehicle) e EV (Electric Vehicle) ridurrà le emissioni rispettivamente del 42,5%, 39,8% o 42,2%, nel caso in esame. Non conoscendo il numero esatto di veicoli che passano da un tipo di combustione interna a uno elettrico, si considera una riduzione delle emissioni del 41,5% (media delle modifiche apportate a ciascuno dei tre tipi di veicoli elettrici). Per i monopattini, le emissioni di gas serra diminuiscono dal 60% al 76% a seconda della tipologia.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Severengiz <i>et al.</i> , (2020)	Il primo passo è la valutazione dell'impatto ambientale delle diverse modalità di trasporto sulla base degli indicatori ambientali selezionati. Applicando l'impatto ambientale di ciascuna modalità di trasporto alla ripartizione modale della città, è possibile quantificare l'impronta ambientale dell'intero settore del trasporto privato della città.		Tre scenari: Scenario 1: il nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione offre un'alternativa al MIT. Solo per brevi distanze Scenario 2: il potenziamento del nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione porta anche a un maggiore utilizzo dei mezzi pubblici. Scenario 3: il nuovo servizio di monopattini elettrici in condivisione è percepito come un'alternativa al trasporto pubblico, agli spostamenti a piedi e in bicicletta, ma non al MIT.	I risultati mostrano che nello scenario 2, si riduce maggiormente l'impatto ambientale per tutti gli indicatori, (parcheggi; traffico e le emissioni di NO _x). Il GWP in questo scenario diminuisce di 7 punti percentuali rispetto alla situazione di riferimento. Lo scenario 1 rappresenta un leggero miglioramento dell'impatto ambientale dei trasporti. Le emissioni di GWP e NO _x sono inferiori di circa cinque punti percentuali rispetto allo scenario di riferimento. Le emissioni di PM e il fabbisogno di spazio per i parcheggi diminuiscono ulteriormente. Nello scenario 3, il fabbisogno di spazio potrebbe addirittura aumentare. Anche le emissioni di GWP e PM non migliorano. Solo per le emissioni di NO _x si registra una diminuzione.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Maheshwari <i>et al.</i> (2020)	Le metodologie utilizzate sono l'analisi Pinch e la metodologia della curva composita limitante per trovare la soluzione ottimale. per determinare un mix ottimale delle varie modalità di trasporto possibili, che soddisfi la futura domanda di trasporto e tenga sotto controllo le emissioni di anidride carbonica, minimizzando il costo dell'investimento		Sono stati studiati tre scenari, al 2032: 1. <i>business as usual</i> ; 2. si lascia invariata l'attuale ripartizione modale, mentre vengono introdotte nuove tecnologie automobilistiche; 3. riduzione delle emissioni di CO ₂ minimizzando i costi.	. I risultati ottenuti per gli scenari sono i seguenti: - Lo Scenario 1 stima che nel 2032 saranno emessi circa cinque miliardi di tonnellate di CO ₂ . - Lo Scenario 2 stima che nel 2032 saranno emessi 3,78 miliardi di tonnellate di CO ₂ , circa il 74,5% dello scenario 1. Costi elevati. - Nello Scenario 3 i risultati vengono suddivisi in due scenari: 3A e 3B. Il primo prevede una riduzione del 25% delle emissioni di CO ₂ . Nel modello 3A, la quota massima di spostamenti a piedi e in bicicletta viene mantenuta come nell'anno base 2012, mentre, nel modello 3B viene aumentato il limite al 25%.

Autori	Metodologia	Questionario	Scenari	Possibili benefici conseguiti
Hollingsworth <i>et al.</i> (2019)	Stima dell'impatto ambientale del ciclo di vita dei monopattini elettrici condivisi, stimando gli impatti totali di questa opzione di mobilità associati al riscaldamento globale, all'acidificazione, all'eutrofizzazione e all'impatto respiratorio		<p>Oltre al caso base, sono stati realizzati 4 scenari:</p> <p>-“Distanza di raccolta ridotta”: ipotizzando 0,6 miglia percorse dal raccoglitore per ogni mezzo.</p> <p>-“Limite di esaurimento della batteria”: i monopattini vengono recuperati e caricati solo quando lo stato di carica della loro batteria scende al di sotto del 50%.</p> <p>-“Alta efficienza del veicolo”: i veicoli utilizzati per la redistribuzione dei mezzi hanno un'efficienza del carburante di 35 miglia per gallone (cioè 235 g CO₂eq/miglio).</p> <p>-“Alta durata degli monopattini”: si ipotizza che la durata di vita di vita dei monopattini sia fissata a due anni.</p>	<p>I risultati dell'analisi Monte Carlo mostrano un valore medio degli impatti sul riscaldamento globale del ciclo di vita pari a 202 g CO₂eq/passeggero-miglio, dovuto a materiali e produzione (50%), seguito dalla raccolta giornaliera per la ricarica (cui corrisponde un 43% dell'impatto).</p> <p>Migliorando le fasi di raccolta e ricarica utilizzando veicoli a basso consumo di carburante (con un rendimento di 177 g CO₂eq/passeggero-miglio), raccogliendo solo i monopattini con stato di carica della batteria basso (164 g CO₂eq/miglio-passeggero) e riducendo le percorrenze per la raccolta e la distribuzione dei monopattini (147 g CO₂eq/miglio-passeggero), si riducono gli impatti sul riscaldamento globale del ciclo di vita. Se i monopattini condivisi sono utilizzati per due anni si riducono le emissioni medie del ciclo di vita a 141 g CO₂eq/km.</p>

Conclusioni

Questa breve disanima dei differenti studi presentati non ha la pretesa di essere in nessun modo esaustiva, ma ha lo scopo di presentare e proporre metodologie di ricerca utili per affrontare la questione della sostenibilità del settore trasporto urbano. Settore che, come si evince dall'analisi della letteratura scientifica, riguarda strettamente la possibilità di costruire delle città intelligenti e sostenibili ossia dei luoghi che rispettino le necessità dei cittadini, tra cui quella di muoversi è riconosciuta tra le fondamentali.

Al fine di consentire la riduzione strutturale e permanente dell'impatto ambientale derivante dal traffico veicolare nelle aree urbane e metropolitane, è necessario disporre di strumenti utili alla pianificazione, programmazione, gestione e promozione di soluzioni ottimali di mobilità sostenibile. Strumenti che consentano al decisore di valutare i possibili benefici ambientali associati alle varie soluzioni di mobilità sostenibile. Il presente documento vuole fornire una panoramica aggiornata delle più recenti metodologie riportate nella letteratura scientifica che consentono di stimare i benefici ambientali associati ad alcune tipologie di progetti di mobilità sostenibile (*sharing mobility*, pedibus, mobilità dolce, ecc.) in termini di riduzione di gas climalteranti, gas inquinanti e particolato.

La maggior parte degli studi riportati si basa sulla somministrazione di questionari agli utenti locali, strumento indispensabile per poter ricostruire in modo affidabile le abitudini di spostamento degli utenti. Le indagini basate su questionari devono essere strutturate in modo rigoroso, devono riportare un congruo numero di domande che non stanchi il lettore e devono porre particolare attenzione alla selezione e alla costruzione dei quesiti, così da poter ricavare le informazioni di interesse. I limiti di questa tipologia di raccolta dati risiedono principalmente in: i dati raccolti tramite questionario sono auto dichiarati e non rilevati e pertanto possono essere inficiati dagli intervistati con sovrastima o sottostima delle informazioni riportate; i risultati ottenuti possono mostrare differenze sostanziali, in quanto le indagini sono condotte in differenti realtà territoriali e i gruppi di persone intervistate non sono sempre omogenei.

Anche le differenti metodologie di calcolo utilizzate per stimare la riduzione delle emissioni (il metodo *tank-to-wheel*, il metodo *well-to-tank* o l'analisi del ciclo di vita), possono portare a differenze sostanziali.

La difformità dei risultati è conseguenza del fatto che gli studi sono stati condotti in modo molto diverso fra loro (campionamento delle percorrenze, dimensione del campione, metodo di stima dei benefici ambientali, diversi fattori di emissione e diverse variabili considerate), il che rende complessa la confrontabilità dei risultati.

Generalmente gli studi hanno dimostrato che il *car sharing* riduce il numero di auto private e le distanze percorse, apportando così una riduzione di emissioni di gas serra. Infatti, i veicoli in *car sharing* sono più nuovi della maggior parte dei veicoli personali, sono sottoposti a frequenti cicli di manutenzione, sono rinnovati con alta frequenza e moltissimi sono ad alimentazione elettrica il che significa che i miglioramenti nella tecnologia dei

motori, nell'efficienza dei carburanti e nei livelli di emissione sono maggiori nei veicoli in *car sharing* che nelle auto private.

Inoltre, le auto in *sharing* sono quasi sempre *city car* che sostituiscono veicoli troppo potenti e troppo grandi per le necessità di spostamento quotidiano all'interno di un'area urbana e contribuiscono alla riduzione della domanda di infrastrutture di parcheggio.

I risultati indicano anche che lo *sharing* probabilmente ha influenzato l'acquisto di una seconda o terza auto per affidarsi ai servizi di condivisione.

Interessanti sono anche le conclusioni che evidenziano alcune esternalità negative dell'uso delle auto in *sharing* che spesso diventano dei *competitor* del TPL o che vengono utilizzate per percorrere distanze brevi (per contenere i costi o entrare in zone a traffico limitato) o che vengono condotte con uno stile di guida più aggressivo rispetto alla media per ridurre al minimo il tempo ed il costo di noleggio ma con impatti sia sui consumi di carburante che sulla sicurezza e sul rischio di incidenti.

Una politica mirata a promuovere un maggiore tasso di occupazione di una singola automobile ha evidenti benefici, prima di tutto la diminuzione del consumo di carburante e conseguentemente delle emissioni nonché una riduzione dei volumi di traffico e della domanda di parcheggio. Il *carpooling* risponde a pieno titolo a questa esigenza. Tuttavia, il buon funzionamento del *car pooling* è legato in modo indissolubile ad una serie di condizioni per attrarre un elevato numero di utenti, quali la disponibilità di App o *software* che ne potenzino l'elemento della flessibilità e della accessibilità, la possibilità di poter accedere ad incentivi (buoni mobilità aziendali, ecc.), la pianificazione strategica dei percorsi. Gli studi presentati sono abbastanza concordi nel sostenere una diminuzione delle emissioni e dei costi a carico dei *car pooler*.

Il numero di programmi di *bike sharing* è cresciuto notevolmente negli ultimi 10 anni, in particolare in Nord America, in Europa e in Cina. Si ipotizza che l'uso di questo servizio possa portare alla riduzione dell'uso dell'auto, anche se i risultati degli studi mostrano che solo una minoranza dei viaggi in bici sostituisce i viaggi in auto; infatti, molto spesso il *bike sharing* è utilizzato per coprire il "problema del primo o dell'ultimo miglio".

I benefici dei sistemi di *bike sharing* nelle città sono molteplici, come il risparmio dei tempi e delle spese di trasporto, l'alleggerimento della congestione del traffico, la riduzione delle emissioni di gas serra e di inquinanti atmosferici e il miglioramento dei collegamenti di trasporto multimodale. Ovviamente, il consumo di energia per il trasporto si riduce a seconda della modalità di trasporto che viene sostituita dal *bike sharing*: se vengono sostituiti spostamenti dei veicoli personali o dei taxi, si riduce il consumo di carburante e le emissioni corrispondenti, se vengono sostituiti i viaggi a piedi, potrebbe aumentare il consumo di energia a causa del consumo energetico necessario per costruire le stazioni, produrre le biciclette e far funzionare il sistema.

Interessanti sono alcune conclusioni che riguardano un fattore molte volte trascurato per stimare i benefici ambientali del *bike sharing* e riguarda le emissioni generate dal ricollocamento dei mezzi in condivisione (bici ma anche scooter) per riequilibrare la

disponibilità dei veicoli e garantire la manutenzione delle biciclette rotte. Il ricollocamento avviene normalmente nelle ore notturne con mezzi di grosse dimensioni per garantire più offerta nelle zone in cui la domanda è maggiore.

In generale si può concludere che un'economia circolare basata sulla condivisione, come la condivisione di biciclette o automobili, è una modalità possibile per ridurre il consumo di energia e le emissioni nel settore dei trasporti.

Le misure di riduzione dei limiti di velocità e di istituzione di aree urbane con limiti a 30 e 20 km/h sono essenzialmente adottate per ridurre l'incidentalità e migliorare la convivenza tra auto, biciclette e pedoni. Le prime **zone 30** in Europa risalgono agli anni '80 del secolo scorso e in Italia sono state introdotte negli anni '90. Attualmente sono molto diffuse in tutti i Paesi europei, dalla Spagna alla Danimarca, a Bruxelles nel 2020 la zona 30 è stata estesa a tutto il centro urbano. Mentre la riduzione di numero e gravità degli incidenti è riscontrata in tutte le città che hanno adottato le zone 30, ed è generalmente condivisa anche la diminuzione delle emissioni di rumore, non è altrettanto chiaro l'effetto positivo sulle emissioni di inquinanti atmosferici.

Gli studi riportati raggiungono conclusioni diverse a seconda del modello utilizzato (macroscopico o microscopico⁹⁹ dal tipo di inquinante e di autovettura considerato (diesel o benzina) e dal tipo di dissuasore adottato (dossi rialzati che "rompono" lo stile di guida con frenate e accelerazioni o semplici telecamere che obbligano i veicoli a ridurre la velocità per tratti di strada più o meno lunghi).

Una nota del Centro Studi francese su Rischi, Ambiente, Mobilità e Urbanistica¹⁰⁰, una review pubblicata nel 2018 da ATKINS Ltd per conto del Ministero dei Trasporti inglese¹⁰¹ e uno studio dell'Università di Belfast¹⁰², arrivano alle stesse conclusioni: la variabilità delle emissioni legata a cicli di guida e a motorizzazioni diverse rende poco attendibile qualsiasi valore in un verso o nell'altro.

I risultati presentati dagli studi hanno indicato che le forme di **mobilità attiva** (a piedi e/o in bicicletta) possono costituire un'alternativa valida alla mobilità motorizzata ricorrendo alla mobilità a piedi per coprire percorsi di breve durata e alla bicicletta per distanze medio-lunghe. Alla mobilità attiva corrisponde un risparmio sulle emissioni in quanto non comporta lo sfruttamento di combustibili fossili. Tuttavia, nel calcolo dei benefici ambientali di questa modalità di trasporto vanno considerate le emissioni legate al LCA della costruzione e della manutenzione delle piste ciclabili, sommate a quelle necessarie per la produzione, distribuzione e preparazione degli alimenti necessari per fornire energia per poter pedalare. È stato stimato che un chilometro percorso in bicicletta da un utente

⁹⁹Il modello macroscopico è basato sulla velocità media dell'intero flusso veicolare.

I modelli di tracciamento microscopico, invece, considerano il comportamento dei singoli veicoli, che sono modellati in modo da obbedire a regole empiriche per il tracciamento delle auto, nel cambio di corsia e nel sorpasso.

¹⁰⁰https://www.cerema.fr/system/files/documents/2021/08/enjeux_et_limite_du_rapport_detude_emissions_routieres_0.pdf

¹⁰¹https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/784907/technical-appendix-4-20mph-rapid-evidence-review.pdf

¹⁰² https://pureadmin.qub.ac.uk/ws/files/183560569/20mph_review_Manuscript_accepted_Pure.pdf

che segue una dieta media americana richieda una produzione di alimenti che contribuisce all'emissione di 42 g di CO_{2eq} circa.

Uno shift modale verso la mobilità attiva richiede alcune condizioni quali la presenza di infrastrutture dedicate alla ciclabilità e pedonalità, curate e mantenute, ben ramificate nel tessuto urbano e collegate con i più importanti punti di snodo multimodale (fermate del TPL, stazioni ferroviarie e metropolitane, parcheggi e velostazioni, ecc.). In particolare, la presenza di infrastrutture per le biciclette (velostazioni protette, rastrelliere, ciclofficine, ecc.) fa parte delle azioni da mettere in atto per promuovere la mobilità ciclistica. Non ultimo, per innescare un cambiamento di abitudini e quindi uno shift modale è indispensabile ricorrere a campagne di sensibilizzazione pubblica finalizzate anche a evidenziare gli aspetti ambientali, economici, sanitari, di coesione sociale e di presidio del territorio associati alla mobilità dolce. Anche l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2016) incentiva i cittadini alla mobilità attiva e sottolinea l'importanza della pianificazione urbanistica e delle politiche dei trasporti per migliorare l'accessibilità e la sicurezza degli spostamenti a piedi e in bicicletta.

Tuttavia, sono ancora numerose le resistenze che inducono i cittadini ad utilizzare l'automobile per spostarsi su brevi distanze (sotto i 2 km) quali la necessità di rispettare vincoli temporali, la convenienza, la necessità di trasportare carichi pesanti, necessità di accompagnare altri passeggeri o i bambini a scuola, la carenza altre di modalità di trasporto accettabili ed una maggiore sicurezza percepita.

Risultano interessanti alcune conclusioni sull'impatto che alcune variabili demografiche hanno sull'uso della bicicletta: l'età, il sesso, la razza, il reddito, il livello di istruzione, stato occupazionale, tipo di famiglia, densità di popolazione e densità di occupazione, ecc. Ad esempio, in Italia (Istat, 2018)¹⁰³ le donne occupate scelgono modalità di mobilità più sostenibili per gli spostamenti casa-lavoro (14,8% si muove a piedi, il 2,0% in bici, il 9,6% con il trasporto pubblico); i giovani e i più istruiti scelgono di spostarsi più spesso con i mezzi pubblici o in bici. L'uso del mezzo privato per andare al lavoro è invece prevalentemente appannaggio degli uomini tra i 25 e i 44 anni e con livelli medi di istruzione. La scelta della bicicletta come mezzo di spostamento da parte delle donne è riportata anche in uno studio (Goel *et al.*, 2022)¹⁰⁴ sviluppato in 17 Paesi dei sei continenti, in cui si mostra come in quasi tutte le aree geografiche in cui la modalità ciclistica raggiunge una quota di uso superiore al 7%, le donne hanno effettuato lo stesso numero di viaggi in bicicletta degli uomini e a volte anche di più; al contrario la quota di spostamenti in bicicletta da parte delle donne è molto più bassa nelle aree geografiche con quote di mobilità ciclistica inferiori al 7%.

¹⁰³ ISTAT. 2018. Spostamenti quotidiani e nuove forme di mobilità. Anno 2017.

<https://www.istat.it/it/files/2018/11/Report-mobilit%C3%A0-sostenibile.pdf>

¹⁰⁴ Rahul Goel, Anna Goodman, Rachel Aldred, Ryota Nakamura, Lamed Tatah, Leandro Martin Totaro Garcia, Belen Zapata-Diomed, Thiago Herick de Sa, Geetam Tiwari, Audrey de Nazelle, Marko Tainio, Ralph Buehler, Thomas Götschi & James Woodcock (2022) Cycling behaviour in 17 countries across 6 continents: levels of cycling, who cycles, for what purpose, and how far?, *Transport Reviews*, 42:1, 58-81, DOI: 10.1080/01441647.2021.1915898

In un recente studio (Momeni e Antipova, 2022)¹⁰⁵ che analizza l'associazione tra forma urbana, dati sociodemografici e comportamento di viaggio nel 1990, 2000 e 2010 nella Contea di Shelby, Tennessee, utilizzando i dati del censimento degli USA sulle modalità di trasporto attive e passive, si riporta che sono le persone con un grado di istruzione maggiore a preferire la bicicletta.

In molti casi risulta indispensabile ricorrere anche ad un incentivo economico all'acquisto di biciclette sia tradizionali che a pedalata assistita per garantire un buon livello di utilizzo dei percorsi pedonali e ciclopeditoni. Non trascurabili sono gli effetti negativi della mobilità dolce sulla salute umana legati ad una maggiore esposizione all'inquinamento atmosferico, acustico e agli incidenti stradali, in particolare quando si cammina o si va in bicicletta in zone particolarmente trafficate e/o inquinate.

Newsom e Sloman (2019) sostengono che una delle ragioni principali per un maggiore utilizzo di biciclette elettriche in Europa piuttosto che nel Regno Unito è l'uso diffuso di incentivi. Anche gli interventi infrastrutturali come la costruzione di piste ciclabili e l'ottimizzazione dei segnali stradali per favorire i ciclisti attraverso le "onde verdi" (Pucher e Buehler, 2008) incoraggiano il viaggio attivo.

Il **pedibus** rappresenta un modo sano, sicuro, divertente ed ecologico per andare a scuola. Oltre all'impatto positivo sull'ambiente e sul clima, il pedibus determina molti altri vantaggi: aspetti sociali e di mobilità inclusiva capace di rinsaldare i rapporti sociali tra i bambini, l'educazione dei ragazzi alla sostenibilità ambientale, ma soprattutto la promozione di uno stile di vita sano per gli effetti positivi dell'attività motoria e del camminare in genere anche solo per mezz'ora al giorno, correlato anche alla produzione di endorfine che hanno un effetto positivo sull'umore dei bambini. Infine, da un punto di vista educativo il pedibus può generare un aumento dell'autonomia dei bambini.

Attivare il pedibus comporta, inoltre, l'avvio di un circolo virtuoso: se più bambini vanno a piedi, vengono ridotti i volumi di traffico ed i livelli di inquinamento acustico, diminuiscono le automobili parcheggiate davanti alla scuola. Si può ipotizzare anche un cambiamento nelle abitudini di spostamento anche per altre attività che si svolgono nella giornata.

¹⁰⁵ Momeni E. e Antipova A. 2022. A micro-level analysis of commuting and urban land using the Simpson's index and socio-demographic factors, *Applied Geography*, Volume 144.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622822001266>

Bibliografia

Introduzione

Automobil Club d'Italia (ACI) 2021 *Annuario statistico* (<https://www.aci.it/laci/studi-e-ricerche/dati-e-statistiche/annuario-statistico/annuario-statistico-2021.html>)

Commissione Europea 2021 *Strategia europea per la mobilità sostenibile e intelligente* <https://www.consilium.europa.eu/it/press/press-releases/2021/06/03/sustainable-and-smart-mobility-strategy-council-adopts-conclusions/>

Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale (ISPRA) 2022. *Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2020. National Inventory Report 2022*. ISPRA Rapporti 360/2022. https://www.isprambiente.gov.it/files2022/pubblicazioni/rapporti/nir2022-italy_r360.pdf

Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) 2020 *Strategia italiana di lungo termine sulla riduzione delle emissioni dei gas a effetto serra*, https://www.mite.gov.it/sites/default/files/lts_gennaio_2021.pdf

Ministero delle Imprese e del Made in Italy 2020 *Piano Nazionale Energia e Clima* (PNIEC) <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-p/piano-nazionale-integrato-per-l-energia-e-il-clima-2030-pniec.html#:~:text=Il%20Piano%20Nazionale%20Integrato%20per,nostro%20Paese%20verso%20la%20decarbonizzazione.>

Ministero delle Infrastrutture e delle Mobilità Sostenibili (MIMS) 2021 *Conto Nazionale delle Infrastrutture e dei Trasporti 2020-2021*. <https://www.mit.gov.it/node/17497>

Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza <https://www.mise.gov.it/index.php/it/68-incentivi/2042324-piano-nazionale-di-ripresa-e-resilienza-i-progetti-del-mise>

Car sharing

Amatuni L., Ottelin J., Steubing B. e Mogollon J., 2020. *Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Life cycle assessment of the modal shift and lifetime shift rebound effects*. Journal of Cleaner Production, 266, 121869.

Baptista P., Melo S., Rolin C., 2014. *Energy, environmental and mobility impacts of car sharing. Empirical results from Lisbon, Portugal*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, pp. 28-37.

Brand G., Scheidegger A., Schwank O. e Braunschweig A., 1998. *Weighting in Ecobalances with the Ecoscarcity Method – Ecofactors 1997*. BUWAL (SAFEL) Environment Series No. 297, Bern.

Bundesverb and CarSharing e Loose, V. W., 2009. *The State of European Car-Sharing*. MOMO Final Report D 2.4 Work Package 2.

-
- Chen T.D. e Kockelman K.M., 2016. *Carsharing's life-cycle impacts on energy use and greenhouse gas emissions*. Transp. Res. Part D: Transp. Environ. 47, pp. 276-284.
- Chicco A. e Diana M. 2021. Air emissions impacts of modal diversion patterns induced by one-way car sharing: A case study from the city of Turin. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 91, February 2021, 102685.
- Ding N., Pan J., Zhang Z. e Jang J., 2019. *Life cycle assessment of car sharing models and the effect on GWP of urban transportation: A case study of Beijing*. Science of The Total Environment, 688, pp. 1137- 1144.
- Doka G. e Ziegler S., 2000. *Complete life cycle assessment for vehicle models of the mobility carsharing fleet Switzerland*. 1st Swiss Transport Research Conference.
- Ferrari Luna T., Uriona-Maldonado M., Rodrigues Vaz C. 2020. The influence of e-carsharing schemes on electric vehicle adoption and carbon emissions: An emerging economy study. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 79 <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102226>
- Firnkorn J. e Müller M., 2011. *What will be the environmental effects of new free-floating car-sharing systems? The case of car2go in Ulm*. Ecological economic 70, pp. 1519-1528.
- Kawaguchi T., Murata H., Fukushige S. e Kobayashi H., 2019. *Scenario analysis of car- and ride-sharing services based on life cycle simulation*. Procedia CIRP 80, pp. 328-333.
- Jung J. e Koo Y., 2018. *Analyzing the effects of car sharing services on the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions*. Sustainability 10, pp. 539-556.
- Martin E. W. e Shaheen S. A., 2011. *Greenhouse Gas Emission Impacts of Carsharing in North America*. IEEE Transactions on intelligent transportations systems 12;4, pp. 1524-9050.
- Migliore M., D'Orso G., Caminiti D. 2020. The environmental benefits of carsharing: the case study of Palermo. Transportation Research Procedia Volume 48, 2020, Pages 2127-2139.
- Namazu M. e Dowlatabadi H., 2015. *Characterizing the GHG emission impacts of carsharing: a case of Vancouver*. Environ. Res. Lett. 124017.
- Nijland H., van Meerkerk J. e Hoen A., 2015. *Impact of car sharing on mobility and CO₂ emissions*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- Nijland H. e van Meerkerk J., 2017. *Mobility and environmental impacts of car sharing in the Netherlands*. Environmental Innovation and Societal Transitions. 23, pp. 84-91.
- Rabbitt N. e Ghosh B., 2016. *Economic and environmental impacts of organised Car Sharing Services: A case study of Ireland*. Research in Transportation Economics 57, pp. 3-12.
- Santos G., 2018. *Sustainability and Shared Mobility Models*. Sustainability 10, pp. 3194-3207.

Shaheen S., Cohen A. e Roberts J. D., 2006. *Carsharing in North America: market growth, current developments, and future potential*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, pp. 116–124.

Silvestri A., Foudialbon S., Asuantegi G.A. 2021. The contribution of carsharing to low carbon mobility: Complementarity and substitution with other modes. Research in Transportation Economics Volume 85, <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100968>

Zeng G., 2013. *Research on Car Sharing Service from a Life Cycle Perspective*, Research Center for Eco-Environmental Sciences. Chinese Academy of Sciences, Beijing.

Zhang M., Hui Y. e Wang M., 2012. *Urban greenhouse gas emission of car sharing*. China population, resources and environment 22, pp. 48–53

Bike sharing

Chena Y., Zhoua,D., Zhaoc Y et al., 2020 Life cycle carbon dioxide emissions of bike sharing in China: Production ,operation, and recycling. Resources, Conservation and Recycling Volume 162, November 2020, 105011 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105011>.

D’Almeida L. Rye T., Pomponi F. Emissions assessment of bike sharing schemes: The case of Just Eat Cycles in Edinburgh, UK Sustainable Cities and Society Volume 71, August 2021, 103012.

Fishman E., Washington S. e Haworth N., 2014. *Bike share’s impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia*. Transportation Research Part D: Transport and Environment 31, pp. 13-20.

Goodman, A. e Cheshire, J., 2014. *Inequalities in the London bicycle sharing system revisited: Impacts of extending the scheme to poorer areas but then doubling prices*. Journal of Transport Geography 41, pp. 272–279.

Kou Z., Wang. X., Chiu S. F. e Cai H., 2020. *Quantifying greenhouse gas emissions reduction from bike share systems: a model considering real-world trips and transportation mode choice patterns*. Resources, Conservation and Recycling 153, 104534.

Meddin R., 2015. *The bike sharing world - 2014 - Year end data* (pub. online)

Olszewski R., Palka P. e Turek A., 2018. *Solving “Smart City” Transport Problems by Designing Carpooling Gamification Schemes with Multi-Agent Systems: The Case of the So-Called “Mordor of Warsaw”*. Sensors 18, p. 141.

Ricci M., 2015. *Bike sharing: A review of evidence on impacts and processes of implementation and operation*. Research in Transportation Business and Management 15, pp. 28-38.

Shaheen S. A., Martin E. W., Chan N. D., Cohen A. P. e Pogodzinski M., 2014. *Public bikesharing in North America during a period of rapid expansion: Understanding business models, industry trends and user impacts*. San Jose (CA) Mineta Transportation Institute (pub. online).

Sobolevsky S., Levitskaya E., Chan H., Postle P. e Kontokosta C., 2018. *Impact Of Bike Sharing In New York City* (pub. online).

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1808/1808.06606.pdf>

Steyn D. e Lane E., 2012. *Modelling Reductions of Carbon Emissions Under Various Scenarios of a Public Bicycle Share System Within Vancouver, BC* (pub. online).

Wang Y. e Szeto W. Y., 2018. *Static green repositioning in bike sharing systems with broken bikes*. Transportation Research Part D 65, pp. 438–457.

Zhang Y. e Mi Z., 2018. *Environmental benefits of bike sharing: A big data-based analysis*. Applied Energy 220.

Carpooling

Bruck B. P., Incerti V., Iori M. e Vignoli M., (2017). *Minimizing CO₂ emissions on a practical daily carpooling problem*. Computers & Operations Research 81, pp. 40-50.

Javid R. J., Nejat A., Salari M., 2016 (a). *The Environmental Impacts of Carpooling in the United States*. Conference: 2016 Transportation, Land and Air Quality Conference (pub. on line).

Javid R. J., 2016 (b). *Greenhouse Gas and Air Pollution Emission Reduction from Incentivized Carpooling*. Journal of Transport & Health 3, S62-S78.

Javid R. J., Nejat A. e Hayhoe K., 2017. *Quantifying the environmental impacts of increasing high occupancy vehicle lanes in the United States*. Transportation Research Part D, 56, pp. 155-174.

Li W., Pu Z., Li Y., Tu M. 2021. *How does ridesplitting reduce emissions from ridesourcing? A spatiotemporal analysis in Chengdu, China*. Transportation Research Part D 95 (2021) 102885. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102885>

Liu X., Yan X., Liu F., Wang R. e Leng Y., 2019. *A trip-specific model for fuel saving estimation and subsidy policy making of carpooling based on empirical data*. Applied Energy 240, pp. 295-311

Martin E. W. e Shaheen S. A., 2011. *Greenhouse gas emission impacts of carsharing in North America*. IEEE Transactions on intelligent transportation systems 12(4), pp. 1074-1086.

Minett P. e Pearce J., 2011. *Estimating the Energy Consumption Impact of Casual Carpooling*. Energies. 4, pp. 126-139.

Rayaprolu. S., 2018. *Shared mobility and its impact on emissions*
<https://atpio.org/shared-mobility-and-its-impact-on-emissions/>

Seyedabrishamia S., Mamdoohi A., Barzegar A. e Hasanpour S., 2012. *Impact of Carpooling on Fuel Saving in Urban Transportation: Case Study of Tehran*. Social and Behavioral Science. 54, pp. 323-331.

Stewart, K., 2015. *Assessing the Carbon Impact of ICT Measures: A Case Study Investigation Using Latis Model*. *Transportation Science and Technology* 4(2), pp. 277-134

Zone 30 e traffic calming

Ahn K. E Rakha H., 2009. *A field evaluation case study of the environmental and energy impacts of traffic calming*. *Transportation Research Part D* (14), pp. 411–424.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2009.01.007>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920909000169>

Atkins, AECOM, Maher M. (UCL). 2018. 20mph Research Study – Rapid Evidence Review. Job n. 5133131 For Department for Transport (UK).
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/784907/technical-appendix-4-20mph-rapid-evidence-review.pdf

Bellefleur O. e Gagnon F., 2011. *Urban traffic calming and Health*. National Collaborating Centre for Healthy Public Policy.
https://www.ncchpp.ca/docs/ReviewLiteratureTrafficCalming_En.pdf

Casanova J. e Fonseca N., 2012. *Environmental assessment of low speed policies for motor vehicles mobility in city centers*. *Global NEST Journal* 14(2), pp. 192-201

Cleland, C. L., McComb, K., Kee, F., Jepson, R., Kelly, M., Milton, K., Nightingale, G., Kelly, P., Baker, G., Craig, N., Williams, A., & Hunter, R. F. 2019. Effects of 20mph interventions on a range of public health outcomes: A meta-narrative evidence synthesis. *Journal of Transport and Health*. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100633>

European Environment Agency, 2011. *Do lower speed limits on motorways reduce fuel consumption and pollutant emissions?*
<https://www.eea.europa.eu/articles/reducing-speed-limits-on-motorways>

Madireddy M., De Coensel B., Can A., Degraeuwe B., Beusen B., De Vlieger I. e Botteldooren D., 2011. *Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 16 (7), pp. 504-508

Panis L. I., Broekx S. e Liu R., 2006 (a). *Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits*. *Science of the Total Environment* 371, pp. 270-285.

Panis L. I., Beckx C. e Broekx S., 2006 (b). *Impact of 30 km/h zone introduction on vehicle exhaust emissions in urban areas*. *Proceedings of the European Transport Conference 2006*.

Panis L. I., Beckx C., De Vlieger I. e Schrooten L., 2007. *Estimating PM emission reductions from speed management policies*. *Dustconf 2007*. Maastricht Netherlands.

Panis L. I., Beckx C., Broekx S., De Vlieger I., Schrooten L, Degraeuwe B. e Pelkmans L., 2011. *PM, NO_x and CO₂ emission reductions from speed management policies in Europe*. *Transport Policy* 18, pp. 32-37.

Pérez-Sansalvador J. C., Lakouari N., Diaz J. G. e Pomares Hernández S. E., 2020. *The Effect of Speed Humps on Instantaneous Traffic Emissions*. Applied Science 10(5), p. 1592.

Renaud. M. 2021. Emissions routières des polluants atmosphériques - courbes et facteurs d'influence. Cerema; Bron.

Senato Dipartimento per l'ambiente, i trasporti e la protezione del clima. 2021. Concetto di studio degli effetti sull'aria e sul traffico di 30 km/h con stabilizzazione del traffico come misure del Piano Aria Pulita per la riduzione di NO₂. Senatsverwaltung Umwelt, Verkehr und Klimaschutz, Berlin.

Williams D. e North R., 2013. *An evaluation of the estimated impacts on vehicle emissions of a 20mph speed restriction in central London*. Centre for Transport Studies Imperial College London, Final Report April 2013.
<https://www.cityoflondon.gov.uk/business/environmental-health/environmental-protection/air-quality/Documents/speed-restriction-air-quality-report-2013-for-web.pdf>.

Mobilità dolce e pedibus

Astegiano P., Fermi F., Martino A., 2019. *Investigating the impact of e-bikes on modal share and greenhouse emissions: a system dynamic approach*. Transportation Research Procedia 37, pp. 163-170.

Bahmankhah B. e Coelho M. C., 2017. *Multi-objective optimization for short distance trips in an urban area: choosing between motor vehicle or cycling mobility for a safe, smooth and less polluted route*. Transportation Research Procedia 27, pp. 428–435.

Bearman N. e Singleton A. D., 2014. *Modelling the potential impact on CO₂ emissions of an increased uptake of active travel for the home to school commute using individual level data*. Journal of Transport & Health 1, pp. 295-304.

Brand C., Goodman A. e Ogilvie D., 2014. *Evaluating the impacts of new walking and cycling infrastructure on carbon dioxide emissions from motorized travel: a controlled longitudinal study*. Applied Energy 128, pp. 84-295.

Gavrilova E., 2014. *Sustainable transport and GHG emissions in Belgrade* (pub. online).

Giannakos L., Mintsis E., Basbas S., Mintsis G., Taxiltaris C., 2017. *Simulating traffic and environmental effects of pedestrianization and traffic management. A comparison between static and dynamic traffic assignment*. Transportation Research Procedia 24, pp. 313–320.

https://www.researchgate.net/publication/317373308_Simulating_traffic_and_environmental_effects_of_pedestrianization_and_traffic_management_A_comparison_between_static_and_dynamic_traffic_assignment

Guariso G. e Malvestiti G., 2017. *Assessing the Value of Systematic Cycling in a Polluted Urban Environment* Climate 5(3), 65.

-
- Harrison F., Burgoine T., Corder K., van Sluijs E. M. e Jones A., 2014. *How well do modelled routes to school record the environments children are exposed to? A cross-sectional comparison of GIS-modelled and GPS-measured routes to school*. International Journal of Health Geographics 13(5). <http://dx.doi.org/10.1186/1476-072X-13-5>
- Keall M., Chapman R., Howden-Chapman P., Witten K., Abrahamse W. E Woodward A., 2015. *Increasing active travel: results of a quasiexperimental study of an intervention to encourage walking and cycling*. Journal of Epidemiology and Community Health. 69(12), pp.1184-1190.
- Keall M. D., Shaw C., Chapman R. e Howden-Chapman P., 2018. *Reductions in carbon dioxide emissions from an intervention to promote cycling and walking: A case study from New Zealand*. Transportation Research Part D 65, pp. 687-696.
- Massink R., Zuidgeest M., Rijnsburger J., Sarmiento O. L. e van Maarseveen M., 2011. *The Climate Value of Cycling*. Natural Resources Forum. 2(35), pp. 100-111.
- Matute J., Huff H., Lederman J., de la Peza D. e Johnson K., 2016. *Toward Accurate and Valid Estimates of Greenhouse Gas Reductions from Bikeway Projects* (pub. online). <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/32447>
- Mrkajic V., Vukelic D. e Mihajlov A., 2015. *Reduction of CO₂ emission and non-environmental co-benefits of bicycle infrastructure provision: the case of the University of Novi Sad, Serbia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 49, pp. 232-242.
- Neves A. e Brand C., 2019. *Assessing the potential for carbon emissions savings from replacing short car trips with walking and cycling using a mixed GPS-travel diary approach*. Transportation Research Part A 123, pp. 130-146.
- Pérez-Neira D, Rodríguez-Fernández M. P., Hidalgo-González C. 2020. *The greenhouse gas mitigation potential of university commuting: A case study of the University of León (Spain)*. Journal of Transport Geography Volume 82, January 2020, 102550
- Philips I., Anable J., Chatterton T., 2022. *E-bikes and their capability to reduce car CO₂ emissions*. Transport Policy (116):11–23.
- Rudolph F., 2014. *Promotion of Pedelecs as a Means to Foster Low-Carbon Mobility: Scenarios for the German city of Wuppertal*. Transportation Research Procedia (4):461-471.
- Smargiassia A., Plantec C., Morency P., et al. 2020. *Environmental and health impacts of transportation and land use scenarios in 2061*. Environmental Research (187):109622.
- Tarulescu S., Tarulescu R., Soica A. e Leahu C. I., 2017. *Smart Transportation CO₂ Emission Reduction Strategies*. Materials Science and Engineering 252.
- Tiwari G., Jain D. e Rao K. R., 2015. *Impact of public transport and non-motorized transport infrastructure on travel mode shares, energy, emissions and safety: Case of Indian cities*. Transportation Research Part D 44 (2016) 277–291. <https://sampler-erasmus.eu/wp-content/uploads/2021/10/Tiwari-G.-Jain-D.-Ramachandra-Rao-K.-Impact-of-public-transport-and-non-motorized-transport-infrastructure.pdf>

Micromobilità

- Abduljabba Rusul L; Liyanage Sohani; Dia Hussein. 2021. The role of micro-mobility in shaping sustainable cities: A systematic literature review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 92. doi:10.1016/j.trd.2021.102734
- Hollingsworth, J., Copeland, B., Johnson, J., 2019. Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environ. Res. Lett.* 14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8>
- Joseph, Copeland Brenna, Johnson Jeremiah X. 2019. Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environ. Res. Lett.* 14. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab2da8/pdf>
- Jiangping Zhou, Wadud Zia, Jiao Jingjuan, Wang, Yacan. 2022. Understanding and planning shared micro-mobility, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*: 103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103172>
- Latinopoulos Charilaos, Patrier Agathe, Sivakumar Aruna. 2021. Planning for e-scooter use in metropolitan cities: A case study for Paris. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 100.
- Liou JL, Wu PI. Monetary Health Co-Benefits and GHG Emissions Reduction Benefits: Contribution from Private On-the-Road Transport. *Int J Environ Res Public Health*. 2021 May 21;18(11):5537. doi: 10.3390/ijerph18115537.
- Maheshwari Madhur, Jana Arnab, Bandyopadhyay Santanu. 2020. Optimizing the Modal Split to Reduce Carbon Dioxide Emission for Resource-Constrained Societies, *Transportation Research Procedia*, 48: 2063-2073.
- Severengiz Semih, Finke Sebastian, Schelte Nora, Forrister Hayden. 2020. Assessing the Environmental Impact of Novel Mobility Services using Shared Electric Scooters as an Example. *Procedia Manufacturing* Volume 43: 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.114>

QUADERNI
AMBIENTE E SOCIETÀ

26/2023