

Quali sono gli impatti ambientali dei veicoli elettrici? Parte prima - Un'analisi della letteratura

Romeo Danielis¹ *

¹ DEAMS e Centro Giacomo Ciamician, Università degli Studi di Trieste

Lo scopo dell'articolo, nella sua prima parte, è passare in rassegna gli studi internazionali sugli impatti ambientali dei veicoli elettrici, tenuto conto oltre che della fase di utilizzo anche della produzione e smaltimento delle batterie. Data la numerosità degli studi che si potrebbero considerare, una particolare attenzione è dedicata agli studi più recenti, pubblicati dopo il 2020.

Pur essendo la trattazione principalmente incentrata sulle emissioni di gas serra, sono riportate anche stime sulle emissioni di inquinanti locali, sull'uso delle risorse minerali e sulla tossicità per l'uomo, per la terra e per l'acqua. Molti studi effettuano una comparazione con veicoli alimentati da combustibili tradizionali o di recente sperimentazione quale i carburanti sintetici. Oltre a quantificare gli impatti ambientali dei veicoli elettrici, la rassegna avvia una riflessione su quali sono i principali fattori che determinano il risultato finale, fornendoci indicazioni su potenziali politiche per la riduzione dell'impatto ambientale dei trasporti. Al fine di poter meglio collocare le stime presenti in letteratura, l'articolo propone preliminarmente un quadro concettuale di riferimento basato sulla analisi del ciclo di vita delle automobili e dei combustibili.

Il risultato principale è che gran parte degli studi, ad eccezione di due, giungono alla conclusione che i veicoli elettrici possono aiutarci a contenere l'emissione di gas serra, come viene spesso sostenuto anche a giustificazione delle recenti politiche europee. Tutti gli studi esaminati concordano che i veicoli elettrici vedranno nel tempo ridurre le loro emissioni di gas serra grazie alla riduzione dell'intensità carbonica del mix elettrico, mentre i margini di miglioramento per i veicoli a combustione interna sono molto più limitati. C. Relativamente alla quantità di gas serra emessi dai veicoli elettrici, misurati in g CO₂eq/km, le stime differiscono. Con riferimento al periodo attuale (2020 o 2021), i valori variano tra 90-200 g CO₂eq/km, a seconda del paese considerato. In futuro, nel 2030 o nel 2050, gli studi prevedono che si potrà arrivare a 75-90 g CO₂eq/km, nettamente migliori comunque dei valori stimati per i veicoli a combustione interna alimentati a benzina che si attesteranno tra i 180-210 g CO₂eq/km. I veicoli elettrici, comunque, non risolvono tutti i problemi, anzi possono aggravare alcuni di essi rispetto ai veicoli a combustione interna. In particolare, gli studi segnalano un possibile aumento dell'acidificazione dei terreni e delle acque, del consumo di acqua fresca, del consumo di energia elettrica e del particolato fine.

Parole Chiave: automobili elettriche, analisi del ciclo di vita, emissioni di CO₂.

* Corresponding author: romeo.danielis@deams.units.it

1 Introduzione

Secondo l'International Council on Clean Transportation (ICCT, 2020), la produzione e la combustione di carburanti nel settore dei trasporti comporta attualmente l'emissione nell'atmosfera di circa 12 Gigatonnellate (Gt) di CO₂ equivalente¹ (CO₂eq) all'anno, pari a circa il 25% di tutte le emissioni antropogeniche. Le autovetture e i veicoli commerciali leggeri sono responsabili della quota maggiore di emissioni di gas serra legate ai trasporti, attualmente circa 5 Gt CO₂eq.

I governi di numerosi Stati puntano a ridurre le emissioni di CO₂eq dei trasporti, tra l'altro, favorendo la sostituzione degli attuali veicoli a combustione interna (indicati nella letteratura internazionale come ICEV, Internal Combustion Engine Vehicle) e comprendenti i veicoli a benzina, diesel ed i veicoli ibridi, indicati con l'acronimo HEV) con i veicoli elettrici (indicati nella letteratura internazionale come EV, Electric Vehicle, e comprendenti i BEV, Battery-only Electric Vehicle, e i PHEV, Plug-in-Hybrid Electric Vehicle). Ma quanto inquinano effettivamente i veicoli elettrici tenuto conto, oltre che della fase di utilizzo, anche della produzione e smaltimento delle batterie? Più o meno dei veicoli a combustione interna? E se inquinano di meno, di quanto? Considerato che gli impatti ambientali hanno diversa natura (emissioni di inquinanti locali e globali, uso delle risorse minerali, tossicità per l'uomo e l'acqua), come si posizionano i veicoli elettrici rispetto alle altre alimentazioni? Come variano gli impatti ambientali a seconda della dimensione del veicolo elettrico e del paese in cui i diversi componenti (in particolare le batterie) vengono prodotti? Queste sono alcune delle domande a cui cercheremo di fornire risposta in questo articolo.

Il tema merita attenzione per diversi motivi. Anche se in Europa, a partire dal 2035, i veicoli elettrici diventeranno probabilmente la forma di alimentazione prevalente nei prossimi anni, il contributo europeo alla riduzione delle emissioni di gas serra (GHGs, Green House Gases) dipenderà da quanto effettivamente inquinano. Lo stesso dicasi per la Cina, in cui i veicoli elettrici hanno ormai conquistato una fetta di mercato pari ad un terzo del venduto o per negli USA, volendo citare solo i mercati di maggiori dimensioni. Gli elementi da valutare, come vedremo, sono molti, tra cui la composizione delle fonti energetiche primarie usate per produrre l'energia elettrica (che indicheremo d'ora in poi con la forma abbreviata "mix elettrico"²), la composizione chimica delle batterie, il loro riuso e riciclo, nonché le dimensioni dei veicoli.

Quantificare in modo preciso gli impatti complessivi, lungo l'intero ciclo di vita dei veicoli elettrici, rispetto alle altre alimentazioni, consente di rispondere ad un'affermazione frequente proposta da molti commentatori o automobilisti: "Non sono favorevole ai veicoli elettrici e non li comprerò perché inquinano quasi quanto, se non di più, di un'auto tradizionale". Valutare se e in quale misura tale affermazione è corretta o meno, è importante per orientare le scelte di acquisto dei consumatori e le scelte politiche degli amministratori pubblici.

Inoltre, e non meno importante, cercheremo nella seconda parte dell'articolo di capire quali sono le determinanti degli impatti ambientali dei veicoli elettrici. Questo ci permetterà di formulare delle proposte di politica dei trasporti in grado di ridurre al minimo gli impatti ambientali degli stessi.

Lo scopo di questo articolo è passare in rassegna gli studi internazionali finora pubblicati, con particolare attenzione a quelli più recenti, per rispondere in modo più esaustivo possibile alle domande su esposte. Preliminarmente, cercheremo di delineare il quadro concettuale per rispondere a queste domande, illustrando i fattori che devono essere tenuti in considerazione e le diverse configurazioni dell'analisi del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA), che rappresenta la metodologia solitamente utilizzata per tener conto in modo organico degli impatti ambientali di un prodotto lungo tutto il suo corso di vita.

Il tema ha una natura multidisciplinare e richiede, tra l'altro, competenze chimiche, ingegneristiche e biologiche che vanno al di là di quelle tipiche di un economista dei trasporti. È comunque utile che un economista dei trasporti si confronti con questo argomento perché la quantificazione dell'inquinamento ambientale dei veicoli, e la sua evoluzione nel tempo, sono indispensabili per:

¹ La CO₂ equivalente (CO₂eq, o anche CO₂e) è una misura che esprime l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica (CO₂). Viene utilizzata per potere confrontare e sommare insieme i contributi di diversi gas serra.

² In Italia, il GSE ha determinato la composizione del mix energetico iniziale nazionale dell'energia elettrica immessa in rete relativo all'anno di produzione 2021 come segue: fonti rinnovabili 42,32%, carbone 5,07%, gas naturale 48,13%, prodotti petroliferi 0,88%, nucleare 0%, altre fonti 3,60%.

- valutare le motivazioni che sottostanno le scelte dei consumatori;
- decidere quali politiche adottare per ridurre l'impatto ambientale dei trasporti;
- calibrare gli strumenti fiscali di internalizzazione dei costi esterni.

Nel dibattito pubblico spesso si citano alcuni rapporti di istituti di ricerca internazionale, quali l'European Environmental Agency (EEA) o l'International Energy Agency (IEA), ritenuti affidabili. In questo articolo, partiamo da queste fonti, cercando di tener conto degli studi più recenti. Una delle difficoltà nel rispondere alle domande su esposte è, infatti, tener conto del rapido evolversi sia della tecnologia delle batterie che delle fonti energetiche utilizzate per produrre l'elettricità utilizzata per alimentare i veicoli elettrici. Nel fare questo, documenteremo lo sviluppo storico delle stime proposte, cercando anche di anticipare l'evoluzione dell'impatto ambientale delle auto elettriche negli anni a venire.

In questo articolo, l'attenzione è principalmente centrata sui veicoli elettrici, ma in alcuni casi esamineremo i loro impatti ambientali in modo comparativo rispetto ad altre tipologie di alimentazione.

2 Un quadro concettuale per stimare gli impatti ambientali dei veicoli

Analizzare gli impatti ambientali di un veicolo lungo tutto il loro ciclo di vita è estremamente complesso.

Innanzitutto, c'è la fase di produzione dei veicoli che comprende (Figura 1): l'estrazione dei materiali, la produzione dei componenti, la produzione del veicolo.

Durante queste tre fasi si altera il territorio, si sversano emissioni in aria ed acqua, e si consumano diverse fonti energetiche compresa l'energia elettrica. Molte di tali impatti non dipendono dall'alimentazione: sono quindi simili tra un veicolo elettrico ed uno termico. Il veicolo elettrico richiede però la produzione di batterie per la trazione, oltre che per l'avviamento, che comportano l'estrazione e la lavorazione di materiali e metalli di diversa natura, a seconda della composizione chimica della batteria e un abbondante consumo di energia elettrica (Xu et al., 2022). Un vantaggio dei veicoli elettrici è rappresentato, invece, dalla mancata necessità di costruire i diversi componenti necessari per il motore a combustione interna.

Relativamente alla produzione e distribuzione dell'energia elettrica usata per la trazione, si deve tener conto inoltre di molteplici fattori quali:

- le emissioni e gli sversamenti derivanti dall'estrazione di materie prime e dalla fornitura di questi combustibili alle centrali elettriche;
- le emissioni derivanti dalla combustione di tali combustibili nelle centrali elettriche per generare elettricità;
- le perdite di elettricità che si verificano durante la distribuzione dalle centrali elettriche al punto in cui il veicolo elettrico è collegato;
- l'efficienza del veicolo nella ricarica e nell'utilizzo dell'energia elettrica.

Allo stesso modo, per i veicoli con motori a combustione è necessario valutare:

- le emissioni e gli sversamenti durante l'estrazione del petrolio greggio;
- il trasporto di greggio alle raffinerie;
- la raffinazione del petrolio in benzina o gasolio;
- la fornitura di carburante alle stazioni di servizio;
- la combustione di carburante nel motore del veicolo durante la fase di utilizzo.

In aggiunta a questi, è necessario tener conto dello smaltimento, riuso o potenziale riciclo sia dei veicoli che delle batterie.

È evidente che il compito richiesto all'analista è molto oneroso e complesso e che non sempre i dati sui diversi processi sono disponibili ed affidabili. Le incertezze si moltiplicano nel caso non ci si voglia limitare a stimare gli impatti ambientali attuali dei veicoli, ma si cerchi di prevederne la loro evoluzione nel tempo.

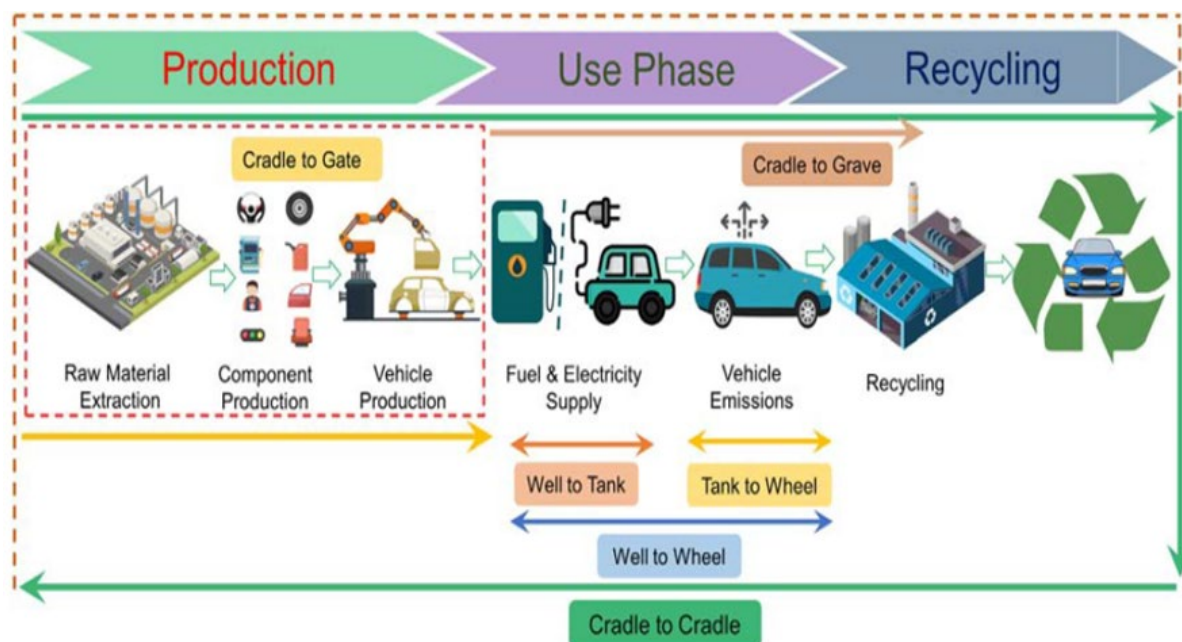


Figura 1 – Illustrazione dei componenti della LCA dei veicoli e dei materiali. Tratta da Xia & Li (2022)

La metodologia per tener conto in modo organico degli impatti ambientali di un prodotto lungo tutto il suo corso di vita viene denominata Life Cycle Assessment (LCA). Essa si compone di una serie di passi solitamente identificati come: definizione dell'obiettivo e dell'ambito, inventario degli impatti lungo il ciclo di vita, valutazione degli impatti, riassunto e interpretazione. Sono stati sviluppati diversi software che supportano i ricercatori nell'elaborare le loro LCA, attingendo a database costantemente aggiornati sia rispetto alle tecnologie esistenti che rispetto alla loro evoluzione futura.

I confini della LCA, ovvero l'insieme degli ambiti presi in considerazione, possono differire dando luogo a diverse definizioni di LCA. Queste sono le più comuni (Verma, 2021) (Figura 1):

- "*Cradle to gate*" si riferisce al ciclo di vita del prodotto dalla lavorazione delle materie prime (*cradle*) al cancello (*gate*) della fabbrica di produzione del veicolo (prima che venga consegnato al consumatore). Le fasi di utilizzo e riciclo non sono considerate;
- "*Cradle to grave*" si riferisce a un ciclo di vita completo dalla fase della materia prima (*cradle*) alla fase di smaltimento (*grave*), includendo l'assemblaggio, la manutenzione e il rifornimento durante tutto il suo ciclo di vita e, infine, lo smantellamento e il riciclaggio dei suoi componenti;
- "*Cradle to Cradle*", dove è un ciclo di vita a circuito chiuso in cui i materiali in eccesso riciclati alla fine del ciclo di vita precedente vengono utilizzati come materie prime per il ciclo di vita successivo;
- "*Well-to-wheel*" (WTW) copre solo il ciclo di vita del vettore energetico (i.e. carburanti o elettricità) utilizzato per guidare il veicolo stesso. Il WTW può essere suddiviso nella fase "*well-to-tank*" (WTT) che si concentra sulla catena di approvvigionamento del carburante e nella fase "*tank-to-wheel*" (TTW), che considera il funzionamento del veicolo.

3 L'impatto ambientale dei veicoli elettrici: un'analisi della letteratura

Il tema degli impatti ambientali dei veicoli è stato trattato in numerosi contributi negli ultimi 20 anni, in particolare da quando i veicoli elettrici hanno mostrato di essere non solo tecnicamente realizzabili, ma di possedere anche una attrattività di mercato.

Anche se è ben chiaro ai ricercatori che le dimensioni dell'impatto ambientale sono numerose (emissioni atmosferiche di diversi tipi di inquinanti quali il CO₂, CO, NO_x, PM, O₃, sversamenti nelle acque e impatti terrestri legate all'estrazione dei materiali per la costruzione dei veicoli e delle batterie e dei combustibili, ecc..), molti studi si sono concentrati nel valutare se i veicoli elettrici permettano

di contenere le emissioni di gas serra, ovvero nel valutare il loro potenziale di riscaldamento globale³ (Global Warming Potential, GWP).

Una sintesi dei risultati ottenuti è contenuta Sacchi et al. (2022), dal quale deriviamo la Tabella 1.

Articoli che concludono che i BEV hanno un minore GWP degli ICEV	Articoli che concludono che i BEV hanno un maggior GWP degli ICEV
Hawkins et al. (2013), Nordelöf et al. (2014), Bauer et al. (2015), Miotti et al. (2016), Ellingsen et al. (2016), Helmers & Weiss (2017), Marmioli et al. (2018), Miotti et al. (2017), Moro & Lonza (2018), <i>Zhixin Wu et al. (2018)</i> , <i>Bicer & Dincer (2018)</i> , <i>Pero et al. (2018)</i> , <i>Cox et al. (2018)</i> , Del Duce et al. (2016), Elgowainy et al. (2018), He et al. (2019), Ajanovic et al. (2019), Rosenfeld et al. (2019), Ziyang Wu et al. (2019), Bigazzi (2019), Knobloch et al. (2020),	Buchal et al. (2019) ⁴ , Kawamoto et al. (2019) ⁵

Tabella 1 – Studi comparativi sul GWP dei veicoli elettrici e termici, desunto da Sacchi et al. (2022)

Gli studi citati da Sacchi et al. (2022) sono stati pubblicati (eccetto uno) prima del 2020. La quasi totalità concludono che i veicoli elettrici già nelle condizioni attuali riducono le emissioni di gas serra durante il ciclo di vita rispetto ai veicoli alimentati a benzina o diesel, o possono ridurle a condizione che la fornitura di elettricità sia associata a basse emissioni di gas serra. Solo due studi giungono a conclusioni diverse. Per questi due studi abbiamo riportato in nota le conclusioni in lingua originale tratte dai riassunti degli articoli. Kawamoto et al. (2019) sostengono che le emissioni dei veicoli elettrici possono essere maggiori se il mix elettrico non è a bassa intensità carbonica e sottolineano il tema della sostituzione delle batterie. Buchal et al. (2019), in uno studio a cura dell'IFO tedesco che ha suscitato ampio dibattito in Germania, giungono alla conclusione che i risultati migliori si ottengono con i veicoli a metano e che i veicoli elettrici sono comunque inferiori a quelli tradizionali.

Tenendo conto di questa discussione, passiamo di seguito in rassegna alcuni contributi recenti per verificare il grado di consenso all'interno della comunità scientifica. Nella selezione degli studi recente non abbiamo applicato criteri selettivi: abbiamo descritto tutti gli studi recenti sulla base della loro notorietà e pubblicazione sulle principali riviste scientifiche. Come si vedrà, gli studi differiscono per focus o per ambito temporale o geografico per cui non sempre è stato possibile effettuare delle comparazioni tra i risultati a cui giungono. Tutti gli studi, comunque, aggiungono spunti di riflessione interessanti.

³ Il potenziale di riscaldamento globale esprime il contributo all'effetto serra di un gas serra relativamente all'effetto della CO₂, il cui potenziale di riferimento è pari a 1. Ogni valore di GWP è calcolato per uno specifico intervallo di tempo (in genere 20, 100 o 500 anni). Considerando il GWP100, il metano ha un impatto pari a 25, ovvero in un periodo di 100 anni una molecola di metano ha un potenziale effetto serra in atmosfera uguale a venticinque molecole di anidride carbonica.

⁴ Buchal et al. (2019) "Es zeigt sich, dass der CO₂-Ausstoß des Elektromotors im günstigen Fall um etwa ein Zehntel und im ungünstigen Fall um ein gutes Viertel über dem Ausstoß des Dieselmotors liegt. Am günstigsten ist der mit Methan betriebene Verbrennungsmotor, der auch dann, wenn man die erhebliche Vorkettenverschmutzung beim Methan berücksichtigt, um ein knappes Drittel unter dem Dieselmotor liegt."

⁵ Kawamoto et al. (2019) "The calculated results showed that CO₂ emission from the assembly of BEV was larger than that of ICV due to the added CO₂ emissions from battery production. However, in regions where renewable energy sources and low CO₂ emitting forms of electric power generation are widely used, as vehicle lifetime driving distance increase, the total operating CO₂ emissions of BEV become less than that of ICV. But for BEV, the CO₂ emissions for replacing the battery with a new one should be added when the lifetime driving distance is over 160,000 km."

3.1 Lo studio Tagliaferri et al. (2016): luci ed ombre dei veicoli elettrici.

Lo studio da cui partiamo è Tagliaferri et al. (2016). Non si tratta di uno studio recente, ma lo richiamiamo perchè presenta una descrizione dettagliata dei diversi tipi impatti LCA di quattro tipologie di veicoli (Tabella 2). Gli autori considerando due tipologie di veicoli elettrici con una diversa composizione della batteria, indicati con gli acronimi EVI e EVII. La conclusione a cui gli autori giungono è che i veicoli elettrici permettono una riduzione in termini di GWP, ma sono una tecnologia peggiorativa in termini di uso delle risorse minerali (Abiotic depletion, ADP) e tossicità per l'uomo e per l'acqua associata all'uso di metalli e prodotti chimici per la produzione delle batterie.

Table 5 – Normalised results of the 'high recycling rate' scenarios for EVI, EVII and ICEV. The normalisation was performed according to the European regionalised impacts reported in the GaBi database (EU25 + 3, year 2000, incl biogenic carbon (region equivalents)).

Total normalised impacts	EVI	EVII	ICE	HEV 30%
Abiotic Depletion (ADP elements)	5.24E-13	1.79E-13	5.64E-14	9.31E-14
Abiotic Depletion (ADP fossil)	3.77E-14	3.80E-14	6.65E-14	5.79E-14
Acidification Potential (AP)	3.57E-14	3.76E-14	3.87E-14	3.84E-14
Eutrophication Potential (EP)	9.76E-15	7.64E-15	9.62E-15	9.03E-15
Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.)	1.62E-12	1.56E-12	8.86E-14	5.31E-13
Global Warming Potential (GWP 100 years)	2.30E-14	2.13E-14	3.21E-14	2.89E-14
Human Toxicity Potential (HTP inf.)	1.75E-13	1.42E-13	8.36E-14	2.91E-14
Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.)	4.06E-12	3.16E-12	8.70E-13	1.01E-13
Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state)	3.09E-14	2.02E-16	1.28E-16	1.56E-12
Photochem. Ozone Creation Potential (POCP)	3.14E-14	3.25E-14	-5.35E-14	1.50E-16
Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.)	8.36E-15	8.23E-15	1.36E-14	-2.77E-14

Tabella 2 – Impatti ambientali normalizzati tratto da Tagliaferri et al. (2016)

3.2 Lo studio Verma et al. (2021): conferma delle luci ed ombra anche per il futuro.

Più recentemente, Verma et al. (2021), passando in rassegna una serie di studi, confermano la presenza di elementi migliorativi ma anche elementi peggiorativi nel passaggio dai veicoli tradizionali ai veicoli elettrici (Tabella 3). Gli elementi migliorativi sono associati alle emissioni di CO₂ equivalenti per km percorso, usato come metrica per la comparazione. Esso comunque varia enormemente tra paesi: è pari a 276 g CO₂eq/km in Polonia nel 2015 mentre vale 129 g CO₂eq/km in Italia, attestandosi comunque sempre su valori più bassi rispetto agli ICEV. Il valore più basso, pari a 90 g CO₂eq/km è previsto in Svizzera ma nel 2030. Al contrario, l'indice di tossicità umana rappresenta un elemento peggiorativi: è molto più elevato per le BEV e si stima rimarrà tale anche in futuro.

Table 3
LCA results of BEV and ICEV of various authors.

Country/Year	Type of analysis	Results	
		Climate change, kg CO ₂ eq/km	Human toxicity, kg 1,4 DB eq/km
Poland, 2018	Cradle-to-grave	BEV 2015: 0.276 BEV 2050: 0.172 ICEV-petrol: 0.284	BEV 2015: 0.331 BEV 2050: 0.234 ICEV-petrol: 0.085
Canada, 2017	Well-to-wheel	BEV: 0.160 ICEV-petrol : 0.270 ICEV-diesel : 0.230	BEV: 0.26 ICEV-petrol: 0.03 ICEV-diesel : 0.04
Italy, 2018	Cradle-to-grave	BEV: 0.129	BEV: 0.027
Sweden, 2014	Wheel-to-wheel	ICEV: 0.203 -	ICEV: 0.00057 BEV: 0.460
Switzerland, 2015	Wheel-to-wheel	BEV 2012: 0.220 BEV 2030: 0.090 ICEV-petrol 2012: 0.30 ICEV-petrol 2030: 0.24 ICEV-diesel 2012: 0.26 ICEV-diesel 2030: 0.21	ICEV-petrol: 0.27 ICEV-diesel: 0.25 BEV 2012: 1.0 BEV 2030: 0.3 ICEV-petrol 2012: 0.26 ICEV-petrol 2030: 0.24 ICEV-diesel 2012: 0.27 ICEV-diesel 2030: 0.25
Italy, 2015	Well-to-tank	BEV: 0.155 ICEV-petrol: 0.300	BEV: 0.136 ICEV-petrol: 0.095

Tabella 3 – Impatti sul clima e sulla tossicità tratto da Verma et al. (2021)

3.3 Lo studio Bieker (2021): i veicoli elettrici consentono già una riduzione delle emissioni di gas serra, con ottime prospettive future.

Bieker (2021) predispone per l'ICCT uno studio molto ampio, non soggetto a referaggio, in cui confronta le emissioni LCA di gas serra di automobili con differenti tecnologie motoristiche (ICEVs, compresi HEVs, PHEVs, BEVs, FCEV) e una varietà di tipi di carburante e fonti di energia tra cui benzina, diesel, gas naturale, biocarburanti, carburanti sintetici, idrogeno ed elettricità, in diversi paesi (Europa, Stati Uniti, Cina e India), per l'anno base 2021 e per il 2030. Data la sua ampiezza, lo studio è molto citato. La LCA ha natura prospettica, in quanto incorpora i profili annuali di riduzione delle emissioni di CO₂eq necessarie a produrre energia elettrica prevista dagli scenari con gli impegni di politici dichiarati (Stated Policy Scenario, STEPS) o sostenibili (Sustainable Development Scenario, SDS). Questo metodo di calcolo è definito in letteratura come "lifetime-weighted" electricity supply mix (Sacchi et al., 2022).

Bieker (2021) giunge a conclusioni molto favorevoli alle BEV per quando riguarda i soli gas serra. Come si può vedere dalla Figura 2, le auto prodotte e utilizzate in Europa avrebbero già al 2021 emissioni LCA di gas serra inferiori a 100 g CO₂eq/km, notevolmente inferiori alle ICEV⁶, che invece sfiorano i 250 g CO₂eq/km. Le BEV sarebbero anche meno impattanti negli Usa, in Cina ed in India già nel 2021, anche se in misura differente. Al 2030, la previsione è che il vantaggio delle BEV si rafforzi ulteriormente in tutti i paesi, toccando in Europa un valore di circa 75 g CO₂eq/km contro i 240 g CO₂eq/km delle ICEV.

⁶ Si noti, inoltre, che nello studio di Bieker (2021, indicare la pagina della citazione e tradurre in italiano, come indicato sopra per gli altri articoli) la riutilizzo della batteria per usi secondari (second-life use) o il riciclo non sono considerati, per cui le emissioni di GHG delle BEV potrebbero risultare probabilmente minori. Inoltre, si fanno le seguenti ipotesi "Cars registered in Europe are considered to be used for an average lifetime of 18 years. In 2014, the average annual mileage of small, lower medium, and SUV segment cars in Germany was 11,000 km/a, 13,500 km/a, and 15,000 km/a, respectively. With an average useful vehicle lifetime of 18 years, the lifetime mileage corresponds to 198,000 km for small, 243,000 km for lower medium, and 270,000 km for SUV segment cars. From the German mobility survey data, it was further deduced that the annual mileage of passenger cars decreases by about 5% per year. Thereby, the annual mileage of a car in the 18th year, for instance, is only 42% of the annual mileage in the first year."

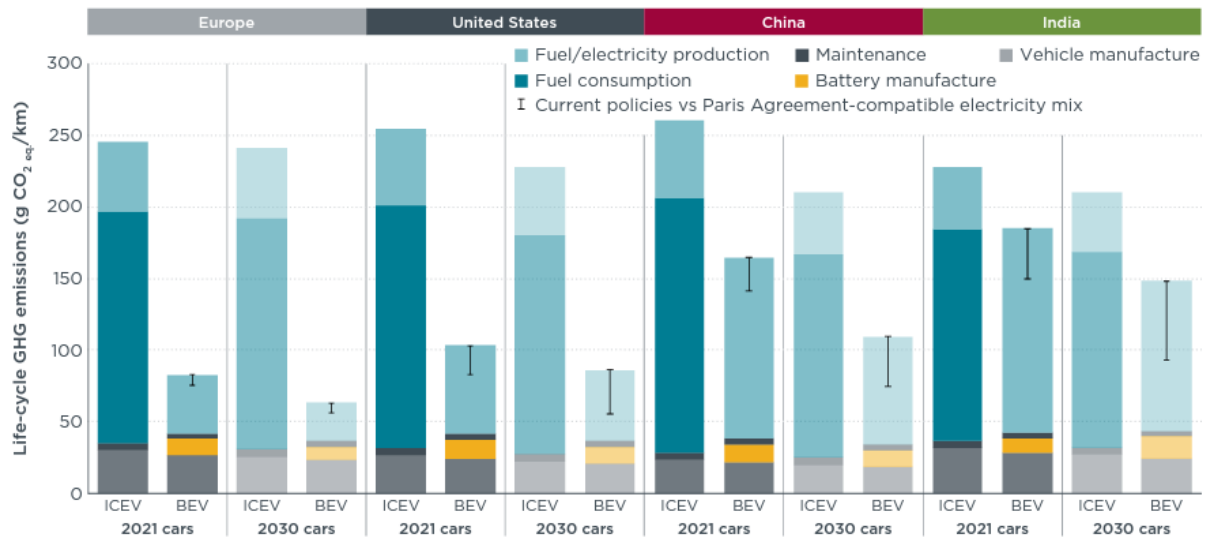


Figure 7.3. Life-cycle GHG emissions of average medium-size gasoline ICEVs and BEVs. The error bars indicate the difference between the development of the electricity mix according to the IEA's Stated Policy Scenario or Sustainable Development Scenario.

Figura 2 – Emissioni LCA di gas serra in Europa, Stati Uniti, Cina e India

3.4 Lo studio Shafique & Luo (2022): Le riduzioni di gas serra dipendono dal mix elettrico del paese.

Shafique & Luo (2022) conducono un interessante studio che esamina il GWP corrente (al 2019), nel 2025 e nel 2030 in diversi paesi. Si notano differenze molto rilevanti tra i paesi, essenzialmente legate al mix elettrico (Figura 3). Per questo, la Svezia, la Norvegia e la Francia, che hanno un mix elettrico a basse emissioni di CO₂eq (i primi due per l'elevato uso delle rinnovabili, la Francia per l'impiego del nucleare), hanno un GWP molto più basso della Cina, della Corea o degli Stati Uniti. Questo studio non è purtroppo confrontabile con i precedenti, perché non viene calcolata la metrica g CO₂eq/km e non vengono calcolati i valori delle alimentazioni tradizionali.

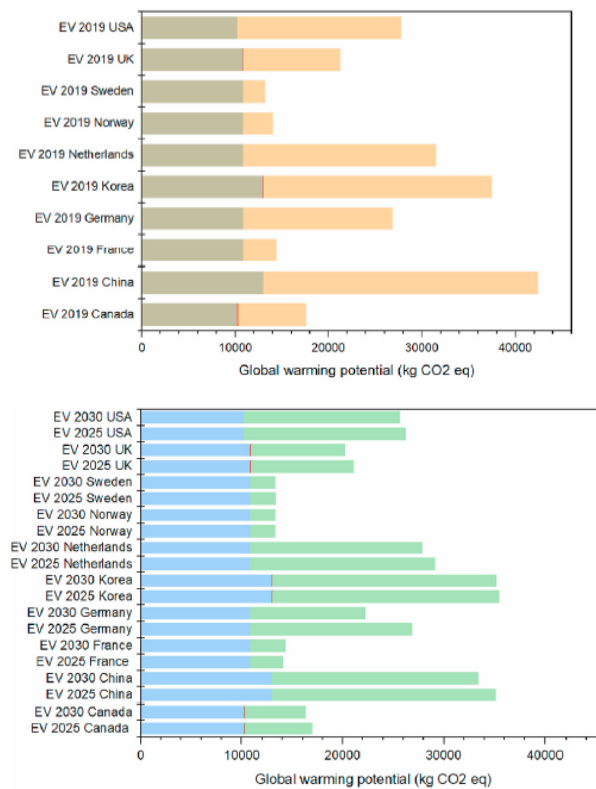


Figura 3 – LCA GWP delle BEV tratte da Shafique & Luo (2022)

3.5 Lo studio Andersson & Börjesson (2021): gli HEV e i PHEV alimentati con biocarburanti sono migliori dei BEV.

Andersson & Börjesson (2021) si concentrano su veicoli con diversi livelli di elettrificazione: HEV, PHEV e BEV di medie dimensioni. Contrariamente ad altri studi, analizzano una combinazione di elettrificazione e biocarburanti. Come carburante di riferimento viene scelta la benzina. Questo viene confrontato con una prima generazione di biocarburante (etanolo E85, principalmente a base di cereali) e poi con un biocarburante di seconda generazione (olio vegetale idrotrattato, HVO, principalmente a base di residui e rifiuti prodotti). Tutti i carburanti, sostengono gli autori, sono ampiamente disponibili presso le stazioni di servizio in Svezia. I risultati sono riportati in Figura 4. Si tenga presente che le emissioni del mix elettrico europeo usate per la stima sono quelle del 2020 (429 g CO₂eq/kWh), senza considerare possibili miglioramenti lungo la vita dell'automobile: si tratta quindi di una LCA attuale e non prospettica. Per il 2050, gli autori invece ipotizzano una riduzione a 38 g CO₂eq/kWh.

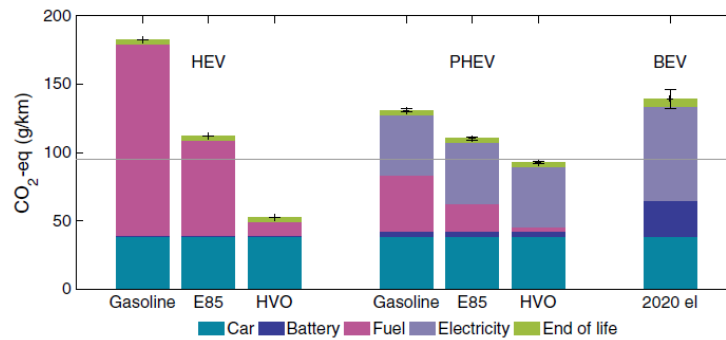


Fig. 2. Life cycle CO₂ emissions from the HEV, PHEV, and BEV model when using 2020 EU-28 electricity. The colors represent, from bottom to top, production phase emissions from the car and battery, usage phase emissions from the fuel and electricity, and end-of-life emissions. The error bars indicate how the span in battery production emissions affects the overall emissions.

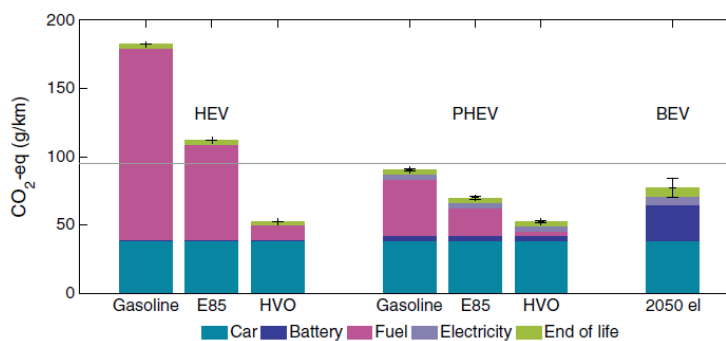


Fig. 3. Life cycle CO₂ emissions from the HEV, PHEV, and BEV model when using 2050 EU-28 electricity.

Figura 4 – Stime del GHW LCA, tratto da Andersson & Börjesson (2021)

Andersson & Börjesson (2021) concludono che i combustibili rinnovabili hanno un maggiore potenziale di riduzione delle emissioni gas serra nel ciclo di vita rispetto a un mix elettrico a basse emissioni di carbonio. Nel 2020, gli autori stimano che le BEV emettono circa 140 g CO₂eq/km, sulla base del mix elettrico europeo, ben maggior quindi di quelle stimate da Bieker (2021) pari a circa 90 g CO₂eq/km. Al contrario, stimano che le auto a benzina emettono circa 180 g CO₂eq/km, molto meno di quanto stimato da Bieker (2021), solo il 24% in più delle BEV. Ma la sorpresa viene dai veicoli alimentati a E85 e HVO. In particolare queste ultime, nella configurazione HEV, più ancora che nei PHEV, hanno emissioni molto basse, decisamente inferiori alle BEV. Ciò è vero sia nel 2020 che nel 2050, pur tenendo conto di un mix elettrico a molto minore intensità carbonica. Questo studio, pertanto, smentirebbe l'orientamento preso a livello europeo di privilegiare le BEV rispetto ai biocarburanti.

3.6 Lo studio Sacchi et al. (2022): ottime potenzialità dei veicoli elettrici per molte (ma non tutte) le categorie di impatto.

Sacchi et al. (2022) presentano uno studio sulla base del software *calculator*, che utilizza scenari di modelli di valutazione integrati per produrre indicatori ambientali del ciclo di vita per le autovetture, con configurazioni motoristiche convenzionali e innovative, per auto di diverse dimensioni e tipi di carburante, considerando sia le tecnologie attuali che quelle future. In particolare, nell'articolo citato, il software viene utilizzato per confrontare BEV, HEV e HEV con carburanti sintetici. L'articolo presenta stime in 35 paesi. In 26 di questi, gli autori trovano che le BEV sono già migliori delle ICEV dal punto di vista delle emissioni di CO₂eq. In Europa, la performance delle BEV è già migliore per tutti i paesi, eccetto Estonia, Bulgaria e Polonia, mentre è incerta in Romania, Grecia e Cipro. Un estratto dei risultati è rappresentato in Figura 5.

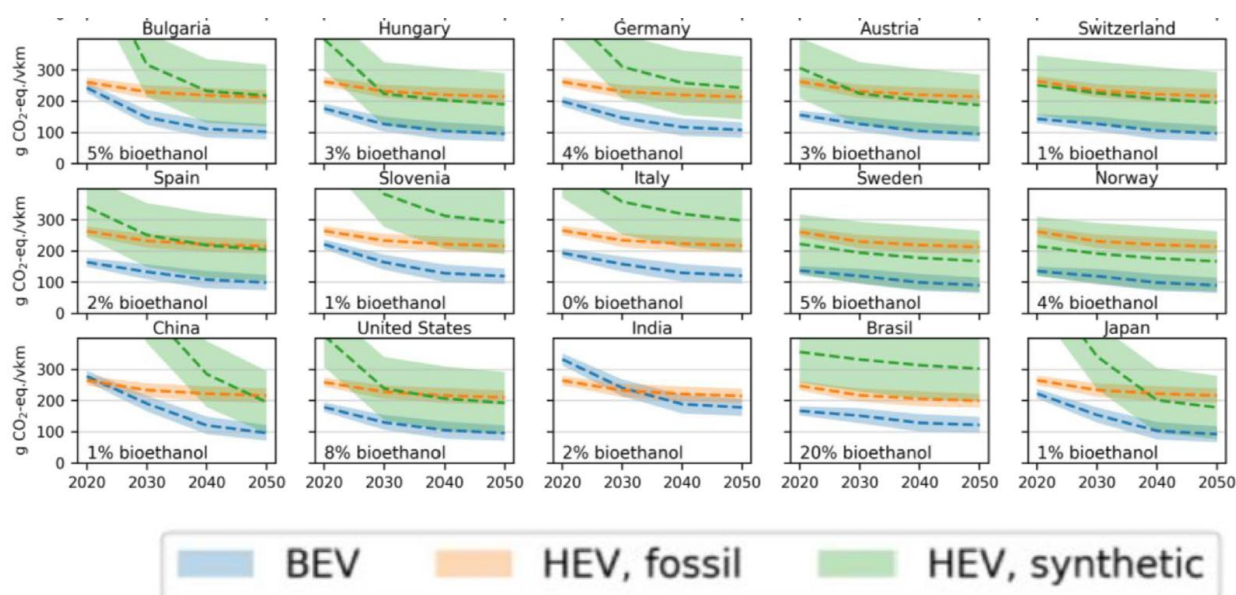


Figura 5 - Emissioni di gas serra nel ciclo di vita di un BEV di medie dimensioni e di un HEV a benzina (utilizzando sia benzina fossile che sintetica), tratto da Sacchi et al. (2022)

Per l'Italia la stima al 2020 è che i BEV emettano circa 200 g CO₂eq/km, inferiori agli HEV, con 0% bioetanolo aggiunto. Il gap tra i BEV e gli ICEV è, secondo gli autori, destinato ad aumentare nel tempo soprattutto in relazione alla riduzione delle emissioni di CO₂eq del mix elettrico. Laddove il mix elettrico è già a basso contenuto di carbonio, vedi Svezia e Norvegia, la differenza tra BEV ed HEV (anche con benzine contenenti una percentuale di bioetanolo) è già considerevole e i BEV possono puntare a livelli di emissioni inferiori a 100 g CO₂eq/km. In Cina, attualmente i due tipi di configurazioni motoristiche sono alla pari, ma la differenza è destinato ad aumentare di molto. In India, invece, il mix elettrico fortemente dipendente dal carbone fa sì che non ci sia nessun vantaggio in termini di CO₂eq, se non a partire dal 2030.

I grafici contengono anche stime relativamente agli HEV alimentati da carburanti sintetici, come recentemente richiesto dalla Germania per approvare la Direttiva europea. In molti casi, Italia e Germania compresa, ciò non permetterà di ridurre le emissioni di CO₂eq al di sotto di quelle attuali di HEV alimentati a benzina. Ciò invece può avvenire, già adesso, nei paesi in cui il mix elettrico è già a basso contenuto di carbonio. In ogni caso, Sacchi et al. (2022) stimano che i carburanti sintetici continueranno ad avere emissioni superiori ai BEV, a causa della loro minore efficienza energetica (fino a 4-5 volte) e quindi del loro maggior consumo di energia elettrica.

Un altro punto da notare è che anche al 2050, i BEV non saranno a impatto zero in termini di CO₂eq, perché comunque sarà necessario mettere GCGs per la produzione della carrozzeria e delle batterie, a meno che si trovi un sostituto ai combustibili fossili in ogni fase della produzione dei veicoli ed in ogni paese.

Inoltre, Sacchi et al. (2022) propongono una stima di altri impatti, quali le emissioni in aria del particolato, il consumo di energia elettrica, l'uso dell'acqua e l'occupazione del suolo (Figura 6).

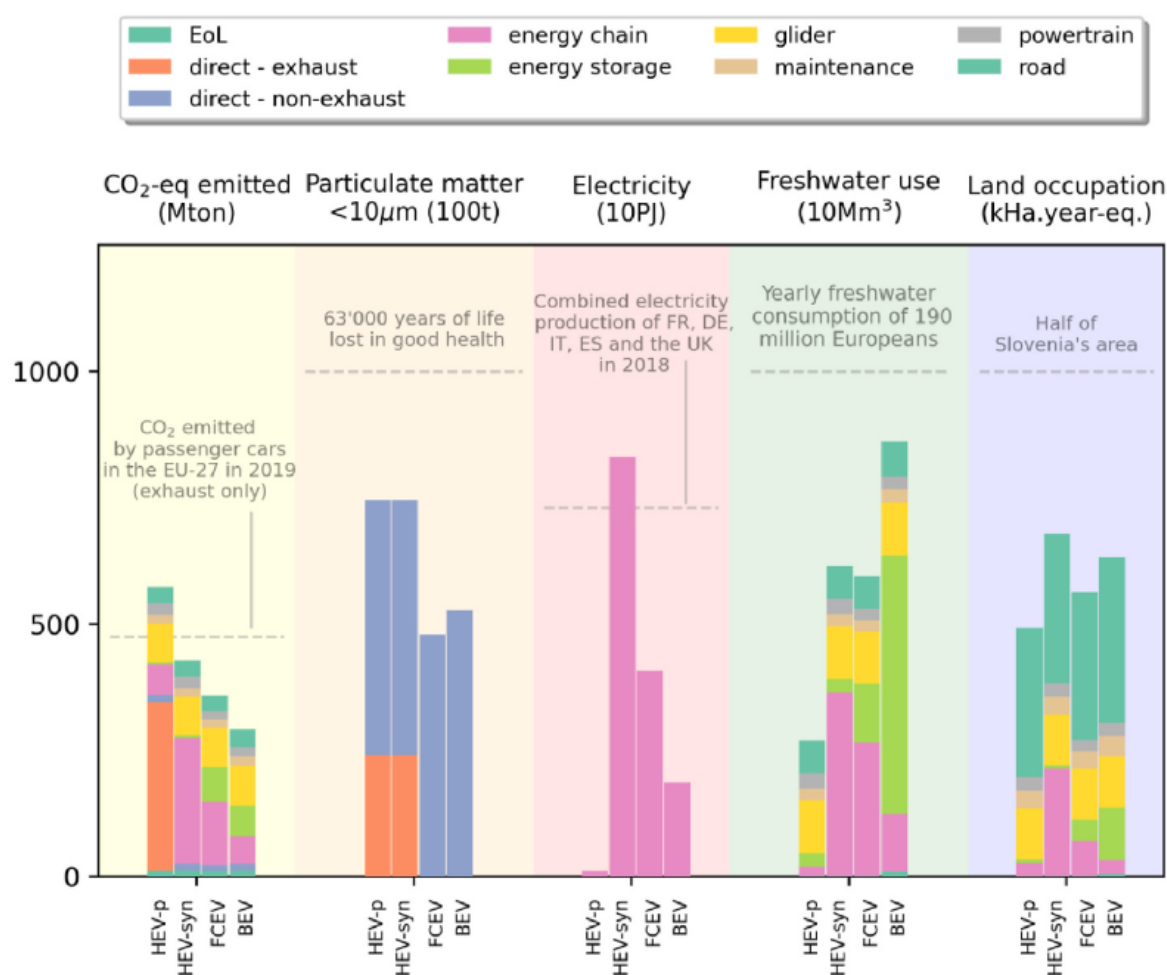


Figura 6 - Indicatori di risorse e inquinamento per diversi veicoli di medie dimensioni nel 2050, tratto da Sacchi et al. (2022)

Al 2050, sotto ipotesi di scenario, i BEV hanno la migliore performance in termini di CO₂eq emessa, la seconda migliore in termini di particolato, causano un incremento del consumo elettrico (ma molto minore rispetto ai carburanti sintetici), richiedono l'ammontare più elevato di acqua fresca e causano una elevata occupazione del suolo.

3.7 Gli studi di Pan et al. (2023) e Puig-Samper Naranjo et al. (2021) sugli impatti sulla qualità dell'aria.

Abbiamo finora dedicato la nostra attenzione all'impatto dei veicoli elettrici sulle emissioni di gas serra in un'ottica dell'intero ciclo di vita del veicolo, in quanto è il problema forse più critico al momento attuale e senz'altro il più dibattuto in letteratura. Non dobbiamo però dimenticare un altro importante contributo dei veicoli elettrici: il miglioramento della qualità dell'aria nei luoghi in cui i veicoli sono usati. I veicoli convenzionali, infatti, emettono considerevoli quantità di particolati (PM), ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili (COV), e sono corresponsabili della formazione di ozono (O₃). Uno studio recente redatto da Pan et al. (2023) stima, con riferimento alle maggiori aree metropolitane degli Stati Uniti, che una diffusione su larga scala dei veicoli elettrici può migliorare la qualità dell'aria e ridurre la mortalità, con enormi benefici in termini economici. Ad esempio, gli autori stimano che a Los Angeles si potrebbe giungere al 2050 ad una riduzione di 1163 decessi prematuri ogni anno, corrispondenti a \$12,61 miliardi di benefici sanitari, e simili risultati valgono anche per New York (576, \$6,24 miliardi), Chicago (276, \$3,00 miliardi), San Joaquin Valley (260, \$2,82 miliardi) e Dallas (186, \$2,02 miliardi). Una delle limitazioni dello studio è che vengono valutate solo le emissioni derivanti dall'uso dei veicoli,

mentre le emissioni a monte - derivanti dalla generazione di energia, dalla produzione di veicoli e dalle infrastrutture stradali - non vengono modellizzate.

Uno studio comparativo degli impatti sulla qualità dell'aria che tiene conto di tutte le fasi LCA è quello di Puig-Samper Naranjo et al. (2021) relativamente alla Spagna. Gli autori trovano che attualmente i veicoli elettrici permettono una riduzione consistente nelle emissioni di gas serra, mentre comportano un aumento della tossicità umana cancerogena (20%) e non cancerogena (61%), della tossicità terrestre (31%), di quella dell'acqua dolce (39%) e marina (41%). Per quanto riguarda la formazione di particolato fine, essi stimano alle condizioni attuali un aumento del 26% rispetto (Figura 7). Ciò significa che, pur riducendosi il contributo in termini di particolato fine laddove i veicoli elettrici sono utilizzati, ci sarebbe un aumento di dimensioni assolute ancora maggiori nei luoghi dove vengono prodotti i veicoli, le batterie, estratti i materiali e generata l'energia elettrica necessaria per il funzionamento dei veicoli elettrici stessi. In altri termini, si avrebbe un trasferimento dell'impatto ambientale dalla fase di utilizzo alle fasi di estrazione e fabbricazione delle materie prime.

Tale risultato vale per la Spagna al 2018, anno di riferimento dello studio. L'aumento sarebbe ancora maggiore in uno scenario in cui è necessario sostituire la batteria durante il ciclo di vita del veicolo elettrico (BEV BR sta per BEV *with battery replacement*). La valutazione però cambia radicalmente prendendo come base il mix elettrico europeo 2030 e diventa positiva considerando il mix elettrico 2050. Al di là delle inevitabili presenza di incertezza riguarda l'evoluzione del mix elettrico, i loro risultati sottolineano l'importanza di associare alla diffusione dei veicoli elettrici un'altrettanta rapida riduzione dell'intensità carbonica nella produzione dell'energia elettrica.

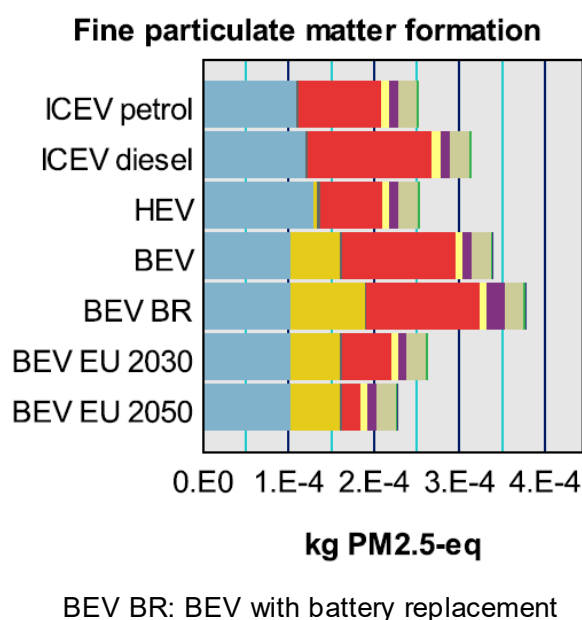


Figura 7 – Contributo alla formazione di particolato fine, tratto da Puig-Samper Naranjo et al., (2021)

La stima proposta da Puig-Samper Naranjo et al. (2021) è solamente di tipo quantitativo (emissioni complessive di particolato fine) e non considera che l'impatto sulla salute umana dipende dal luogo in cui le emissioni avvengono. Se il peggioramento della qualità dell'aria avviene in zone scarsamente abitate (nei luoghi dove avviene l'estrazione e fabbricazione delle materie prime) a vantaggio delle aree densamente abitate (le aree residenziali urbane o rurali), l'impatto complessivo sulla salute potrebbe considerarsi complessivamente positivo anche se le emissioni complessive di particolato fine aumenta. È chiaro comunque che si tratta di un tema complesso, in cui entrano in gioco tante variabili (tecnologiche, urbanistiche, regolamentari, e legali) per cui è difficile elaborare un modello di stima attendibile. L'autore di questo articolo non è a conoscenza di studi che abbiano affrontato questo tema in modo scientificamente convincente.

4 Conclusione

Lo scopo di questo articolo, questa prima parte, era quello passare in rassegna gli studi internazionali sugli impatti ambientali dei veicoli elettrici, tenuto conto oltre che della fase di utilizzo anche della produzione e smaltimento delle batterie. Data la numerosità degli studi che si potrebbero considerare, una particolare attenzione è stata dedicata agli studi più recenti, pubblicati dopo il 2020.

Dall'analisi della letteratura, passata e recente, si possono fare molte considerazioni e trarre diverse conclusioni. Sottolineiamo le seguenti.

- A. I veicoli elettrici hanno diverse proprietà interessanti, in particolare, possono aiutarci a contenere l'emissione di gas serra, come viene spesso sostenuto anche a giustificazione delle recenti politiche europee. C'è un consenso quasi unanime in letteratura che i veicoli elettrici (Tabella 1), tenuto conto dell'intero ciclo di vita, emettano meno gas serra dei veicoli a combustione interna, sicuramente nei paesi europei ma, secondo Bieker (2021), anche negli USA, in Cina e in India. Solo due articoli - Buchal et al. (2019) e Kawamoto et al. (2019) – giungono a conclusioni diverse o sollevano dubbi su questa conclusione. Tra gli articoli recenti (Tabella 4), segnaliamo Andersson & Börjesson (2021) che stimano che i veicoli elettrici siano superiori agli HEV a benzina, ma non agli HEV alimentati con biocombustibili.
- B. Tutti gli studi esaminati concordano che i veicoli elettrici vedranno nel tempo ridurre le loro emissioni di gas serra grazie alla riduzione dell'intensità carbonica del mix elettrico, mentre i margini di miglioramento per i veicoli a combustione interna sono molto più limitati.
- C. Relativamente alla quantità di gas serra emessi dai veicoli elettrici, misurati in g CO₂eq/km, le stime differiscono. Con riferimento al periodo attuale (2020 o 2021), i valori variano tra 90-200 g CO₂eq/km, a seconda del paese considerato. In futuro, nel 2030 o nel 2050, gli studi prevedono che si potrà arrivare a 75-90 g CO₂eq/km, nettamente migliori comunque dei valori stimati per i veicoli a combustione interna alimentati a benzina che si attesteranno tra i 180-210 g CO₂eq/km.

Studio	Paese	BEV*	ICEV*
<i>Bieker (2021)</i>	Europa 2021	BEV: 90	ICEV: 245
	Europa 2030	BEV: 75	ICEV: 240
<i>(Andersson & Börjesson (2021))</i>	Europa 2020	BEV: 140	HEV benzina: 180; HEV E85: 115; HEV HVO: 50
	Europa 2050	BEV: 85	HEV benzina: 180; HEV E85: 110; HEV HVO: 48
	Italia 2020	BEV: 200	HEV benzina: 280
<i>Sacchi et al. (2022)</i>	Italia 2050	BEV: 100	HEV benzina: 210
	Norvegia 2020	BEV: 120	HEV benzina: 280
	Norvegia 2050	BEV: 90	HEV benzina: 210

*Valori g CO₂eq/km desunti dai grafici

Tabella 4 – Confronto tra le stime di emissioni tra gli studi citati (g CO₂eq/km)

I motivi per cui gli studi esaminati giungono a risultati anche assai diversi sono molti, ma i più rilevanti ci sembrano i seguenti:

- i fattori di emissione associati alle diverse fonti energetiche di produzione delle batterie;
- il paese considerato;
- la vita utile del veicolo e il chilometraggio percorso;
- i confini della LCA. Alcuni studi si fermano alla produzione delle batterie mentre altri tengono conto anche del riuso o riciclo della batteria.

I veicoli elettrici, comunque, non risolvono tutti i problemi, anzi possono aggravare alcuni di essi rispetto ai veicoli a combustione interna. In particolare, gli studi segnalano un possibile aumento dell'acidificazione dei terreni e delle acque, del consumo di acqua fresca, del consumo di energia elettrica e del particolato fine.

È necessario, pertanto, approfondire quali sono i fattori che contribuiscono a determinare l'impatto ambientale dei veicoli elettrici e quali politiche pubbliche, relative all'energia ed ai trasporti, possono

indirizzare le case produttrici ed i consumatori verso veicoli elettrici con un minore impatto ambientale. Questo argomento sarà oggetto della seconda parte dell'articolo.

Riferimenti bibliografici

- Ajanovic, A., cells, R. H.-F., & 2019, undefined. (2019). Economic and environmental prospects for battery electric and fuel cell vehicles: a review. *Wiley Online Library*, 19(5), 515–529. <https://doi.org/10.1002/fuce.201800171>
- Andersson, Ö., & Börjesson, P. (2021). The greenhouse gas emissions of an electrified vehicle combined with renewable fuels: Life cycle assessment and policy implications. *Applied Energy*, 289, 116621. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116621>
- Bauer, C., Hofer, J., Althaus, H. J., Del Duce, A., & Simons, A. (2015). The environmental performance of current and future passenger vehicles: Life Cycle Assessment based on a novel scenario analysis framework. *Applied Energy*, 157, 871–883. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.019>
- Bicer, Y., & Dincer, I. (2018). Life cycle environmental impact assessments and comparisons of alternative fuels for clean vehicles. *Resources, Conservation and Recycling*, 132, 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.01.036>
- Bieker, G. (2021). A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars. In *ICCT – International Council on Clean Transportation Europe*. <https://www.team-bhp.com/forum/attachments/electric-cars/2310712d1653112667-things-consider-when-buying-electric-car-global-lca-passenger-cars-jul2021-0.pdf>
- Bigazzi, A. (2019). Comparison of marginal and average emission factors for passenger transportation modes. *Applied Energy*, 242, 1460–1466. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.172>
- Buchal, C., Karl, H.-D., & Sinn, H.-W. (2019). Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? *Ifo Schnelldienst*, 72(08), 40–54. <https://www.econstor.eu/handle/10419/198746>
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., & Van Vuuren, D. P. (2018). Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles. *Environmental Science and Technology*, 52(8), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>
- Del Duce, A., Gauch, M., & Althaus, H. J. (2016). Electric passenger car transport and passenger car life cycle inventories in ecoinvent version 3. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1314–1326. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0792-4>
- Elgowainy, A., Han, J., Ward, J., Joseck, F., Gohlke, D., Lindauer, A., Ramsden, T., Bidy, M., Alexander, M., Barnhart, S., Sutherland, I., Verduzco, L., & Wallington, T. J. (2018). Current and Future United States Light-Duty Vehicle Pathways: Cradle-to-Grave Lifecycle Greenhouse Gas Emissions and Economic Assessment. *Environmental Science and Technology*, 52(4), 2392–2399. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06006>
- Ellingsen, L. A. W., Singh, B., & Strømman, A. H. (2016). The size and range effect: Lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 11(5). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
- Hawkins, T. R., Singh, B., Majeau-Bettez, G., & Strømman, A. H. (2013). Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), 53–64. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>
- He, X., Zhang, S., Wu, Y., Wallington, T. J., Lu, X., Tamor, M. A., McElroy, M. B., Zhang, K. M., Nielsen, C. P., & Hao, J. (2019). Economic and Climate Benefits of Electric Vehicles in China, the United States, and Germany. *Environmental Science and Technology*, 53(18), 11013–11022. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00531>
- Helmets, E., & Weiss, M. (2017). Advances and critical aspects in the life-cycle assessment of battery electric cars. *Energy and Emission Control Technologies*, Volume 5, 1–18. <https://doi.org/10.2147/eect.s60408>
- Kawamoto, R., Mochizuki, H., Moriguchi, Y., Nakano, T., Motohashi, M., Sakai, Y., & Inaba, A. (2019). Estimation of CO₂ Emissions of internal combustion engine vehicle and battery electric vehicle using LCA. *Sustainability (Switzerland)*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/su11092690>
- Knobloch, F., Hanssen, S. V., Lam, A., Pollitt, H., Salas, P., Chewpreecha, U., Huijbregts, M. A. J., & Mercure, J. F. (2020). Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nature Sustainability*, 3(6), 437–447. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0488-7>
- Marmiroli, B., Messagie, M., Dotelli, G., & Van Mierlo, J. (2018). Electricity generation in LCA of electric vehicles: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 8, Issue 8). <https://doi.org/10.3390/app8081384>

- Miotti, M., Hofer, J., & Bauer, C. (2017). Integrated environmental and economic assessment of current and future fuel cell vehicles. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(1), 94–110. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0986-4>
- Miotti, M., Supran, G. J., Kim, E. J., & Trancik, J. E. (2016). Personal Vehicles Evaluated against Climate Change Mitigation Targets. *Environmental Science and Technology*, 50(20), 10795–10804. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00177>
- Moro, A., & Lonza, L. (2018). Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 64, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012>
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A. M., Ljunggren Söderman, M., & Van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? In *International Journal of Life Cycle Assessment* (Vol. 19, Issue 11, pp. 1866–1890). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>
- Pan, S., Yu, W., Fulton, L. M., Jung, J., Choi, Y., & Gao, H. O. (2023). Impacts of the large-scale use of passenger electric vehicles on public health in 30 US metropolitan areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113100>
- Pero, F. Del, Delogu, M., & Pierini, M. (2018). Life Cycle Assessment in the automotive sector: A comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. *Procedia Structural Integrity*, 12, 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>
- Puig-Samper Naranjo, G., Bolonio, D., Ortega, M. F., & García-Martínez, M. J. (2021). Comparative life cycle assessment of conventional, electric and hybrid passenger vehicles in Spain. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125883. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125883>
- Rosenfeld, D. C., Lindorfer, J., & Fazeni-Fraisl, K. (2019). Comparison of advanced fuels—Which technology can win from the life cycle perspective? *Journal of Cleaner Production*, 238, 117879. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117879>
- Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B., & Mutel, C. (2022). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112475>
- Shafique, M., & Luo, X. (2022). Environmental life cycle assessment of battery electric vehicles from the current and future energy mix perspective. *Journal of Environmental Management*, 303. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114050>
- Tagliaferri, C., Evangelisti, S., Acconcia, F., Domenech, T., Ekins, P., Barletta, D., & Lettieri, P. (2016). Life cycle assessment of future electric and hybrid vehicles: A cradle-to-grave systems engineering approach. *Chemical Engineering Research and Design*, 112, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.07.003>
- Verma, S., Dwivedi, G., & Verma, P. (2021). Life cycle assessment of electric vehicles in comparison to combustion engine vehicles: A review. *Materials Today: Proceedings*, 49, 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.666>
- Wu, Zhixin, Wang, M., Zheng, J., Sun, X., Zhao, M., & Wang, X. (2018). Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle. *Journal of Cleaner Production*, 190, 462–470. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.036>
- Wu, Ziyang, Wang, C., Wolfram, P., Zhang, Y., Sun, X., & Hertwich, E. (2019). Assessing electric vehicle policy with region-specific carbon footprints. *Applied Energy*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113923>
- Xia, X., & Li, P. (2022). A review of the life cycle assessment of electric vehicles: Considering the influence of batteries. In *Science of the Total Environment* (Vol. 814, p. 152870). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152870>
- Xu, C., Steubing, B., Hu, M., Harpprecht, C., van der Meide, M., & Tukker, A. (2022). Future greenhouse gas emissions of automotive lithium-ion battery cell production. *Resources, Conservation and Recycling*, 187, 106606. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106606>