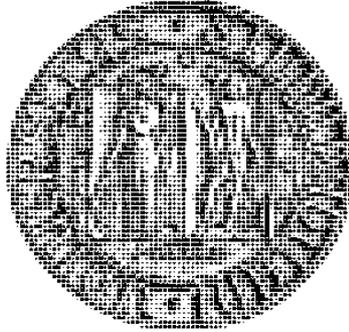


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria



CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE
INDIRIZZO TRASPORTI

Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale

TESI DI LAUREA

**EMISSIONI DI GAS SERRA E CAMBIAMENTI CLIMATICI:
ANALISI DEL CONTRIBUTO DEL SETTORE DEI TRASPORTI
E STRATEGIE DI MITIGAZIONE**

Relatore: Prof. Claudio Meneguzzer

Laureando: Carlo Andrea Pigato

Anno Accademico: 2013-2014

Indice

PARTE I - INQUINAMENTO ATMOSFERICO E CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	4
1.1 INDICI DI IMPATTO AMBIENTALE: GWP E GTP	6
1.2 DALLE EMISSIONI DI GAS SERRA AI CAMBIAMENTI CLIMATICI.....	11
<i>Emissioni antropogeniche</i>	11
<i>Aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera</i>	13
<i>Aumento dell'assorbimento della radiazione solare</i>	14
<i>Aumento della temperatura media globale</i>	15
<i>Aumento dell'evaporazione dagli oceani</i>	18
<i>Cambiamenti climatici</i>	19
1.3 LEGISLAZIONE INTERNAZIONALE PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI	21
PARTE II - IMPATTO AMBIENTALE DEI SISTEMI DI TRASPORTO.....	24
2.1 FONTI DI ENERGIA UTILIZZATE DAI SISTEMI DI TRASPORTO.....	25
2.2 IMPATTO AMBIENTALE DEI TRASPORTI	27
<i>Trasporto stradale</i>	28
<i>Trasporto ferroviario</i>	31
<i>Trasporto Navale</i>	34
<i>Trasporto Aereo</i>	36
<i>Impatti indiretti</i>	38
2.3 CONFRONTO TRA I VARI SISTEMI DI TRASPORTO.	41
PARTE III – STRATEGIE E POLITICHE PER LA RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA.....	44

3.1 APPROCCIO ASIF	46
3.2 STRATEGIE CHE INCIDONO SULL'IMPATTO AMBIENTALE DEL SISTEMA	
CARBURANTE-MOTORE.....	49
<i>Carburanti alternativi: biocarburanti</i>	49
<i>Veicoli elettrici autoalimentati, ibridi, a fuel cell</i>	53
3.3 STRATEGIE PER MIGLIORARE L'EFFICIENZA ENERGETICA DEI VEICOLI	60
<i>Settore stradale: trasporto individuale di persone (automobili)</i>	61
<i>Trasporto terrestre di merci</i>	63
<i>Trasporto collettivo terrestre</i>	66
<i>Trasporto aereo</i>	67
<i>Trasporto navale</i>	69
3.4 POLITICHE PER INCENTIVARE LO SHIFT MODALE	73
<i>Impatto ambientale ed effetti indiretti dell'uso dell'auto in ambito urbano</i>	74
<i>Confronto tra le politiche adottate da Pechino e Shanghai per limitare l'uso</i>	
<i>dell'auto in ambito urbano.</i>	78
<i>Riduzione delle emissioni grazie all'alta velocità ferroviaria in Nord</i>	
<i>Europa: previsione della riduzione degli impatti con la linea ferroviaria</i>	
<i>Europabanan.</i>	88
<i>Incentivare lo shift modale modificando le abitudini di viaggio: TravelSmart</i>	
.....	90
<i>Riduzione degli spostamenti motorizzati tramite lo sviluppo urbanistico:</i>	
<i>Transit Oriented Development, TOD</i>	91
PARTE IV - CONCLUSIONI E SCENARI CLIMATICI FUTURI.....	96
<i>Scenari climatici futuri</i>	98

Parte I - Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici¹

Nel 1979 la Convenzione di Ginevra apre, nel primo articolo, definendo l'inquinamento atmosferico come "introduzione nell'atmosfera da parte dell'uomo, direttamente o indirettamente, di sostanze o di energia che abbiano effetti nocivi che possano mettere in pericolo la salute dell'uomo, danneggiare le risorse biologiche e gli ecosistemi, deteriorare i beni materiali e nuocere ai valori ricreativi e ad altri usi legittimi dell'ambiente"².

Si parla di inquinamento atmosferico *locale*, se gli effetti si ripercuotono in un'area geografica limitata, o *globale* se le conseguenze interessano tutto il pianeta.

Causa del primo sono inquinanti che, per esempio, provocano piogge acide alterando localmente l'ecosistema (NO_x, SO₂) o anche quelli dannosi per la salute dell'uomo, responsabili di tumori e/o malattie respiratorie (PM, HC, CO, NO_x, SO₂).

Sostanze che invece causano l'inquinamento globale sono gas comunemente detti "gas serra", per il fatto che assorbono e trattengono parte della radiazione solare, influenzando sul riscaldamento globale e quindi sui cambiamenti climatici.

La presenza di gas serra nell'atmosfera è stata determinante per lo sviluppo della vita sulla Terra: in mancanza di questi il nostro pianeta avrebbe temperature più basse di alcune decine di gradi. E' da rilevare, peraltro, che l'incremento antropogenico della concentrazione di tali gas sta causando un innalzamento non naturale delle temperature, che altera l'equilibrio naturale del nostro pianeta.

È possibile suddividere questi gas in due gruppi:

1. gas serra normalmente presenti in natura;
2. gas serra di origine esclusivamente antropica.

Alla prima categoria appartengono i gas di origine sia naturale sia antropica. I più importanti sono: vapore acqueo, anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), ozono stratosferico (O₃) e protossido di azoto (N₂O). La quantità di questi nell'atmosfera è sensibilmente maggiore rispetto ai secondi.

¹ La maggior dei dati, delle immagini e dei contenuti presenti in questa parte è tratta da: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013) *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*, Cambridge University Press.

² Convenzione di Ginevra (1979).
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/ALL/?uri=CELEX:31981D0462>

Nel secondo gruppo i più diffusi sono gli alocarburi, quali ad esempio clorofluorocarburi (CFC), idroclorofluorocarburi (HCFC) e idrofluorocarburi (HFC). Molti di questi sono ozono lesivi e, essendo stati abbondantemente utilizzati nei circuiti di refrigerazione, hanno causato il drastico assottigliamento dello strato di ozono (fig. 1.1)³ scoperto da Sherry Rowland nel 1974. Nonostante la loro quantità in atmosfera sia minima, le loro molecole producono un effetto serra notevolmente maggiore rispetto a quelle dei gas serra normalmente presenti in natura.

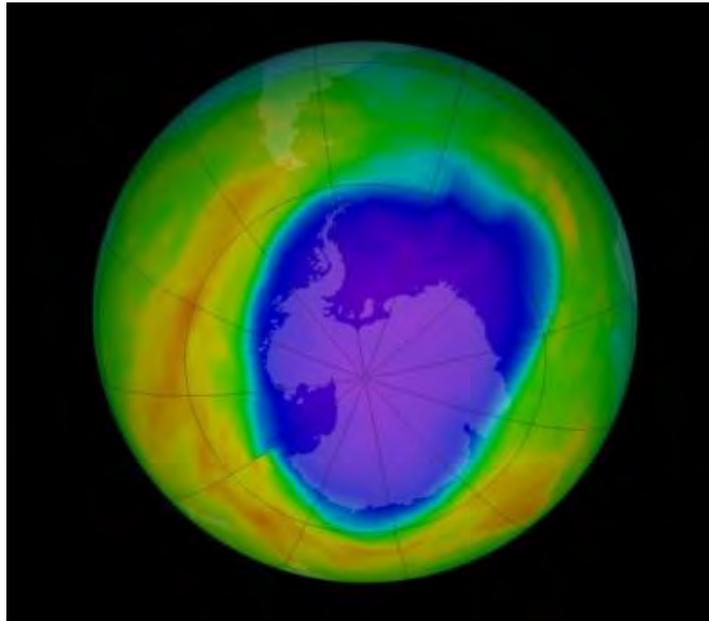


Figura 1.1 - Foto del buco dell'ozono nel 2013.

³ http://www.nasa.gov/vision/earth/environment/ozone_resource_page.html

1.1 Indici di impatto ambientale: GWP e GTP

Esistono centinaia di gas serra ognuno dei quali con un impatto differente nell'atmosfera, sia per modalità che per intensità. Ogni gas, inoltre, non resta nell'atmosfera per sempre, ma è caratterizzato da un proprio ciclo di vita con impatti diversi al variare dell'orizzonte di riferimento.

Con l'intento di confrontare gli effetti e di determinare il contributo di ogni gas all'effetto serra, sono stati elaborati quattro indici di riferimento:

- AGWP, Absolute Global Warming Potential (letteralmente in italiano, potenziale assoluto di riscaldamento globale);
- GWP, Global Warming Potential (letteralmente in italiano, potenziale di riscaldamento globale);
- AGTP, Absolute Global Temperature Potential (letteralmente in italiano, potenziale assoluto della temperatura globale);
- GTP, Global Temperature Potential (letteralmente in italiano, potenziale della temperatura globale).

L' AGWP esprime la quantità di radiazione solare trattenuta dall'immissione di 1 kg di gas in atmosfera durante l'orizzonte di riferimento. L'unità di misura è $[W m^{-2} anno kg^{-1}]$.

Analiticamente si può esprimere l'AGWP del gas X con tempo di riferimento TH come:

$$AGWP_X^{TH} = \int_0^{TH} a_x \cdot [x(t)] dt$$

dove:

TH = il tempo riferimento (*time horizon*);

a_x = l'assorbimento della radiazione solare legata all'immissione nell'atmosfera di 1 kg del gas X (*radiative efficiency*) $[W m^{-2} kg^{-1}]$;

$x(t)$ = la funzione, dipendente dal tempo, del decadimento della concentrazione (*decay in abundance*) in atmosfera del gas x.

Di seguito (tab. 1.1) si riportano, come esempio, i valori di AGWP di alcuni gas serra.

Gas	Formula chimica	AGWP 20 anni	AGWP 100 anni
Anidride carbonica	CO ₂	2.49e-14	9.17e-14
Metano	CH ₄	2.09e-12	2.61e-12
Protossido di azoto	N ₂ O	6.58e-12	2.43e-11
CFC-11 (esempio di clorofluorocarburo)	CCl ₃ F	1.72e-10	4.28e-10
HCFC-22 (esempio di idroclorofluorocarburo)	CHClF ₂	1.32e-10	1.62e-10
HFC-23 (esempio di idrofluorocarburo)	CHF ₃	2.70e-10	1.14e-09

Tabella 1.1 - AGWP di alcuni gas con orizzonte temporale 20 e 100 anni.

Si noti come gli AGWP dei vari gas si differenzino anche di diversi ordini di grandezza e che i valori degli alocarburi siano perlopiù nettamente maggiori rispetto a quelli dei gas di origine naturale. Inoltre è da rilevare come ogni composto ha un'evoluzione temporale diversa: ad esempio, per quanto riguarda la CO₂, l'AGWP continua sensibilmente ad aumentare nel tempo, mentre per il metano, la maggior parte del processo di riscaldamento si conclude all'interno dei 20 anni:

$$AGWP_{CO_2}^{100\text{ anni}} = 3,7 \cdot AGWP_{CO_2}^{20\text{ anni}}$$

$$AGWP_{CH_4}^{100\text{ anni}} = 1,2 AGWP_{CH_4}^{20\text{ anni}}$$

Per confrontare più facilmente l'impatto di gas serra diversi è stato formulato il GWP che è dato dal rapporto tra l'AGWP di un gas serra e l'AGWP di un gas di riferimento (*r*). Universalmente si adotta come gas di riferimento l'anidride carbonica.

$$GWP_X = \frac{AGWP_X}{AGWP_R} = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot [x(t)] dt}{\int_0^{TH} a_r \cdot [r(t)] dt}$$

Tale indice risulta quindi essere un numero adimensionale che esprime quanto maggiore è il riscaldamento causato da un gas rispetto a quello causato da una egual quantità di CO₂.

Di seguito (tab. 1.2) si riportano, come esempio, i valori di GWP di alcuni gas serra.

Gas	Formula chimica	GWP 20 anni	GWP 100 anni
Anidride carbonica	CO ₂	1	1
Metano	CH ₄	84	28
Protossido di azoto	N ₂ O	264	265
CFC-11 (esempio di clorofluorocarburo)	CCl ₃ F	6900	4660
HCFC-22 (esempio di idroclorofluorocarburo)	CHClF ₂	5280	1760
HFC-23 (esempio di idrofluorocarburo)	CHF ₃	10800	12400

Tabella 1.2 - GWP di alcuni gas con orizzonte temporale 20 e 100 anni.

Il GWP, elaborato dall'IPCC nel 1990, è stato largamente utilizzato in quanto consente di stimare l'impatto ambientale di una miscela qualsiasi di gas convertendola in una quantità di anidride carbonica equivalente:

$$kg \text{ di } CO_2 \text{ equivalenti} = kg \text{ di } CO_2 + GWP_1 \cdot kg \text{ gas } 1 + GWP_2 \cdot kg \text{ gas } 2 + \dots$$

Il GWP è stato anche oggetto di critiche (O'Neill, 2000; Fuglestedt et al., 2003) in quanto due emissioni di gas differenti, ma equivalenti alla stessa quantità di CO₂, potrebbero non essere equivalenti in termini di evoluzione temporale della temperatura media della superficie terrestre. Considerando ad esempio un orizzonte temporale di 100 anni, adottato anche nel protocollo di Kyoto, l'effetto di riduzione delle emissioni che contengono una frazione significativa di gas con un'attività di breve durata (ad esempio CH₄) porta a una minor riduzione di temperatura verso la fine dell'orizzonte temporale, rispetto alla riduzione delle emissioni di CO₂. Proprio per questi motivi il GWP risulta essere per certi aspetti inadeguato per una correlazione rigorosa emissione-impatto ambientale.

L' AGTP esprime invece la variazione di temperatura media della superficie terrestre causata dall'immissione di 1 kg di gas serra nell'atmosfera. L'unità di misura è K kg⁻¹.

Di seguito (tab. 1.3) si riportano, come esempio, i valori di AGTP di alcuni gas serra.

Gas	AGTP 20 anni	AGTP 50 anni	AGTP 100 anni
Anidride carbonica	6.84e-16	6.17e-16	5.47e-16
Metano	4.62e-14	8.69e-15	2.34e-15
Protossido di azoto	1.89e-13	1.74e-13	1.28e-13
CFC-11 (esempio di clorofluorocarburo)	4.71e-12	3.01e-12	1.28e-12
HCFC-22 (esempio di idroclorofluorocarburo)	2.87e-12	5.13e-13	1.43e-13
HFC-23 (esempio di idrofluorocarburo)	7.88e-12	7.99e-12	6.95e-12

Tabella 1.3 - AGTP di alcuni gas con orizzonte temporale 20, 50 e 100 anni.

Si noti come considerando l'AGTP, rispetto all'AGWP, l'evoluzione temporale dell'impatto ambientale sia molto più marcata:

$$AGTP_{CO_2}^{20\text{ anni}} = 1,25 \cdot AGTP_{CO_2}^{100\text{ anni}}$$

$$AGTP_{CH_4}^{20\text{ anni}} = 20 \cdot AGTP_{CH_4}^{100\text{ anni}}$$

L'effetto della CO₂ si mantiene stabile nel tempo, mentre quello del metano cala drasticamente cambiando l'orizzonte temporale.

Il quarto indice di riferimento, ossia il GTP, è dato dal rapporto tra l'AGTP di un gas serra e l'AGTP di un gas di riferimento. Anche in questo caso viene universalmente presa l'anidride carbonica come gas di riferimento.

Di seguito (tab. 1.4) si riportano, come esempio, i valori di GTP di alcuni gas serra.

Gas	GTP 20 anni	GTP 50 anni	GTP 100 anni
Anidride carbonica	1	1	1
Metano	67	14	4
Protossido di azoto	277	282	234
CFC-11 (esempio di clorofluorocarburo)	6890	4890	2340
HCFC-22 (esempio di idroclorofluorocarburo)	4200	832	262
HFC-23 (esempio di idrofluorocarburo)	11500	13000	12700

Tabella 1.4 - GTP di alcuni gas con orizzonte temporale 20, 50 e 100 anni.

Il GTP, proposto nel 2005 da *Shine et al.*, fornisce un approccio alternativo correlando direttamente la variazione della temperatura media della superficie terrestre ad un determinato orizzonte temporale con il tipo di gas emesso. Ne deriva un peso minore nella valutazione dell'impatto dei gas con attività di breve durata. Si noti come, per il metano, il GTP sia un settimo del GWP nell'orizzonte temporale di 100 anni (tabb. 1.2 e 1.4).

1.2 Dalle emissioni di gas serra ai cambiamenti climatici

Si presenta di seguito il processo che intercorre tra emissione dei gas serra e cambiamenti climatici (fig. 1.2).

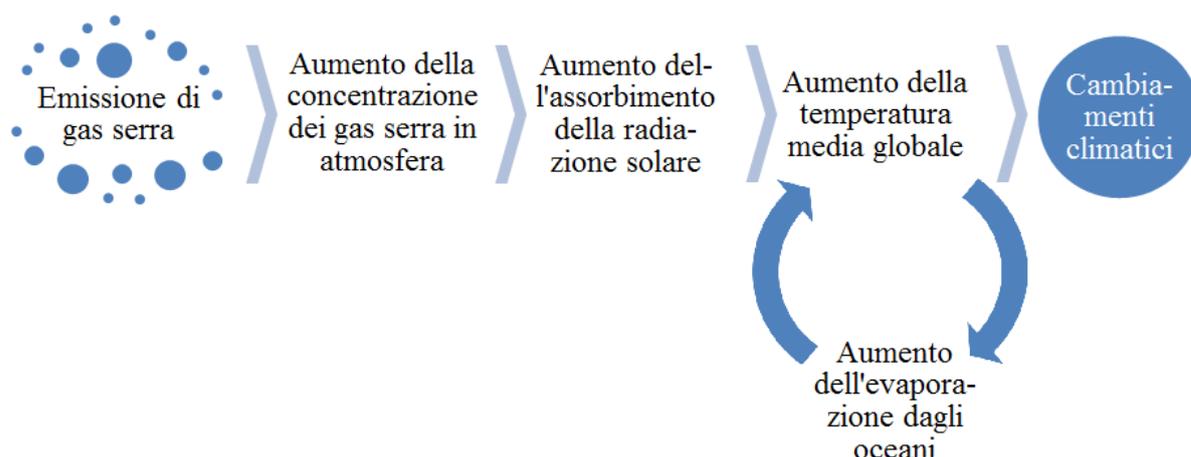


Figura 1.2 - Processo dell'impatto ambientale dei gas serra.

Emissioni antropogeniche

Nella valutazione dell'impatto ambientale delle emissioni antropogeniche, oltre ai gas serra, sono da considerare anche altre sostanze come CO, NO_x, SO₂, *black carbon* (BC) e *organic carbon* (OC) che contribuiscono, in positivo o in negativo, al riscaldamento climatico (fig. 1.3). Da notare che, in orizzonti temporali brevi, l'impatto di alcune sostanze ha ordini di grandezza simili; considerando invece un orizzonte temporale di 100 anni la causa preponderante del riscaldamento globale è l'anidride carbonica, in particolar modo se si considera come indice di impatto il GTP, più rigoroso e corretto.

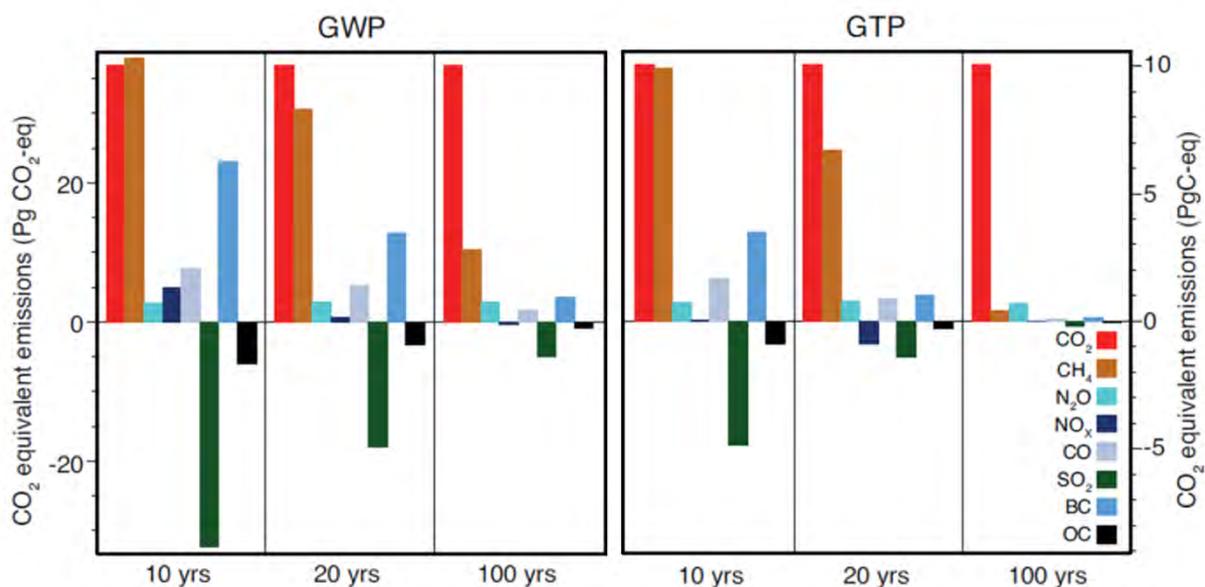


Figura 1.3 - Grafico delle emissioni antropogeniche dell'anno 2008 omogeneizzate in CO₂-eq, al variare dell'orizzonte temporale, 10, 20 e 100 anni, e al variare dell'indice di impatto ambientale, GWP e GTP. (1PgC-eq = 3,66 Peta-grammi di CO₂ equivalente, Peta=10¹⁵).

Nel primo decennio del ventunesimo secolo sono stati immesse in atmosfera mediamente 31 PgCO₂ all'anno. Nel 2011 si sono raggiunte le 35 PgCO₂ annue. La fonte principale di tali emissioni è data dai carburanti fossili, quali carbone, petrolio e gas naturale (fig. 1.4).

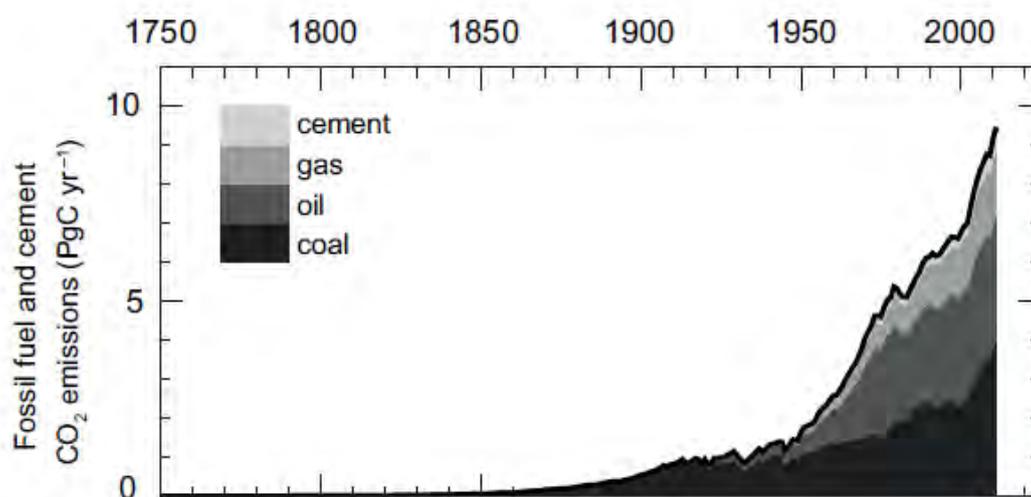


Figura 1.4 - Grafico delle emissioni globali annuali di CO₂ ripartite secondo le fonti di emissione.

Deve essere inoltre considerata la componente indiretta delle emissioni dovuta a cambiamenti di uso del suolo (*land use change*), in particolare alla deforestazione tropicale (fig. 1.5).

Tutta la CO₂ emessa viene poi dispersa in atmosfera o assorbita dagli oceani o dagli ecosistemi terrestri (*land sink*) (fig.1.5).

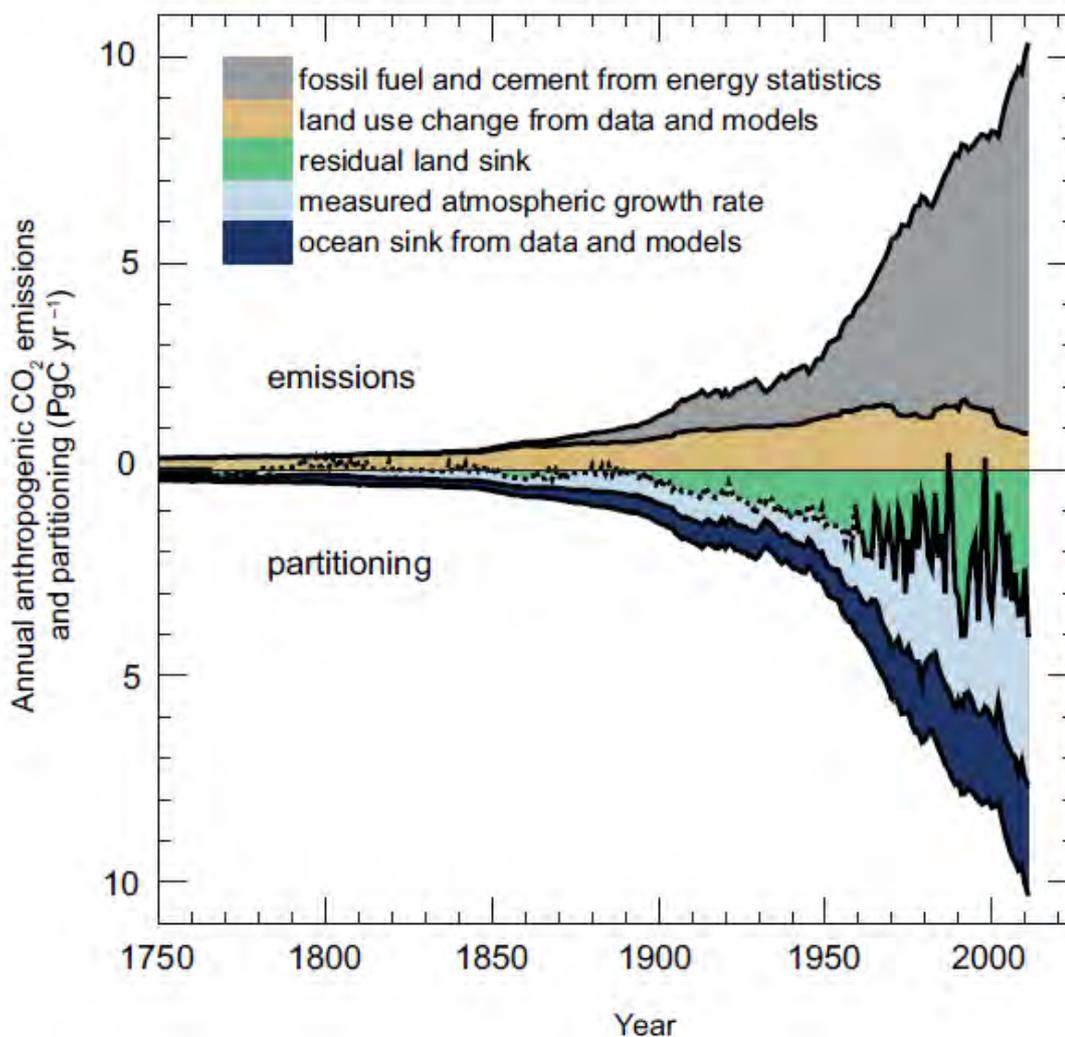


Figura 1.5 - Grafico delle emissioni e dell'assorbimento di CO₂.

Aumento della concentrazione dei gas serra in atmosfera

Grazie all'analisi delle carote di ghiaccio estratte nelle calotte polari è stato possibile stimare la concentrazione di CO₂ negli anni passati (fig. 1.6). Nel 2011 la concentrazione di CO₂ rilevata risulta di 390 ppm, circa il 40% in più rispetto al valore dell'epoca preindustriale, periodo nel quale gli effetti antropogenici erano del tutto trascurabili.

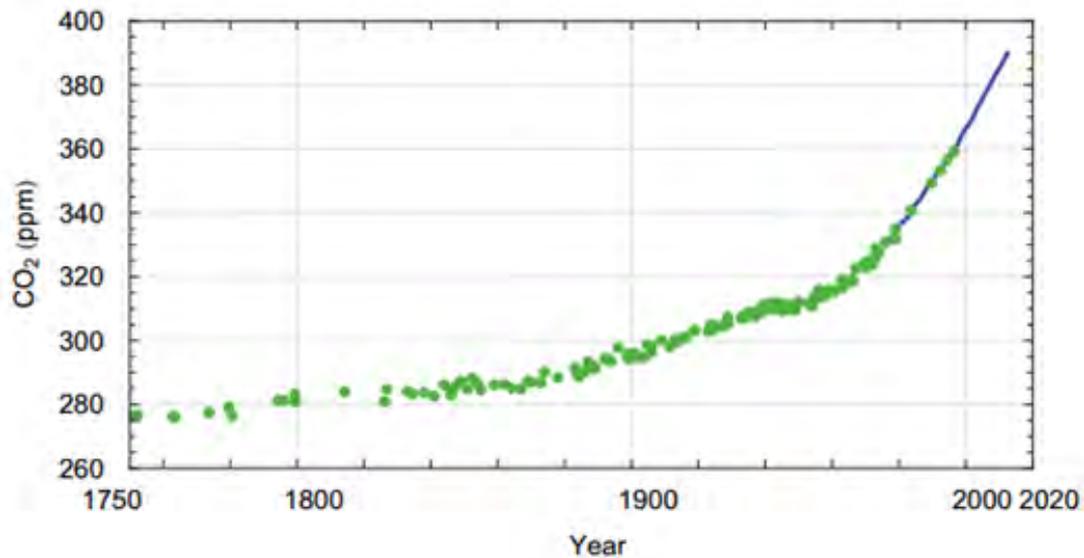


Figura 1.6 - Grafico della concentrazione di CO₂ in atmosfera. I punti verdi sono dati stimati tramite analisi delle carote di ghiaccio, la linea blu sulla destra rappresenta i dati raccolti dall'osservatorio di Cape Grim.

Aumento dell'assorbimento della radiazione solare

L'alterazione del bilancio energetico nel sistema atmosfera-Terra è dovuta a fattori fisico-chimici, definiti *drivers*, che agiscono sul rapporto tra radiazione solare in entrata e radiazione infrarossa in uscita. Le sostanze emesse in atmosfera dalle attività umane possono comportarsi come drivers o trasformarsi in essi; per misurare l'impatto di tali sostanze si fa riferimento al forzante radiativo⁴. Il valore della radiazione solare trattenuta per cause antropogeniche, stimato nel 2011, risulta essere di circa 2,2 Wm⁻² (fig. 1.7). A questo valore concorrono una componente di segno negativo pari a 1,1 Wm⁻² legata principalmente ad aerosol atmosferico, che riflette parte della radiazione solare, e una componente di segno positivo di 3,3 Wm⁻² dovuta principalmente ai gas serra. La radiazione solare trattenuta da questi è per il 52% ad opera dell'anidride carbonica e per il 30% dovuta al metano.

Da rilevare che l'assottigliamento dello strato di ozono da parte degli alocarburi, con effetti dannosi per gli esseri viventi, risulta avere nel bilancio energetico del sistema atmosfera-Terra un effetto "benefico", seppur limitato, in quanto l'ozono nella stratosfera si comporta da gas serra.

⁴ "Grandezza espressa in Wm⁻² che consente di misurare omogeneamente l'effetto dell'azione di ogni driver, o gruppi di drivers climatici, sull'equilibrio radiativo del sistema atmosfera-Terra (RF, Radiative forcing)". Fonte: www.treccani.it/enciclopedia

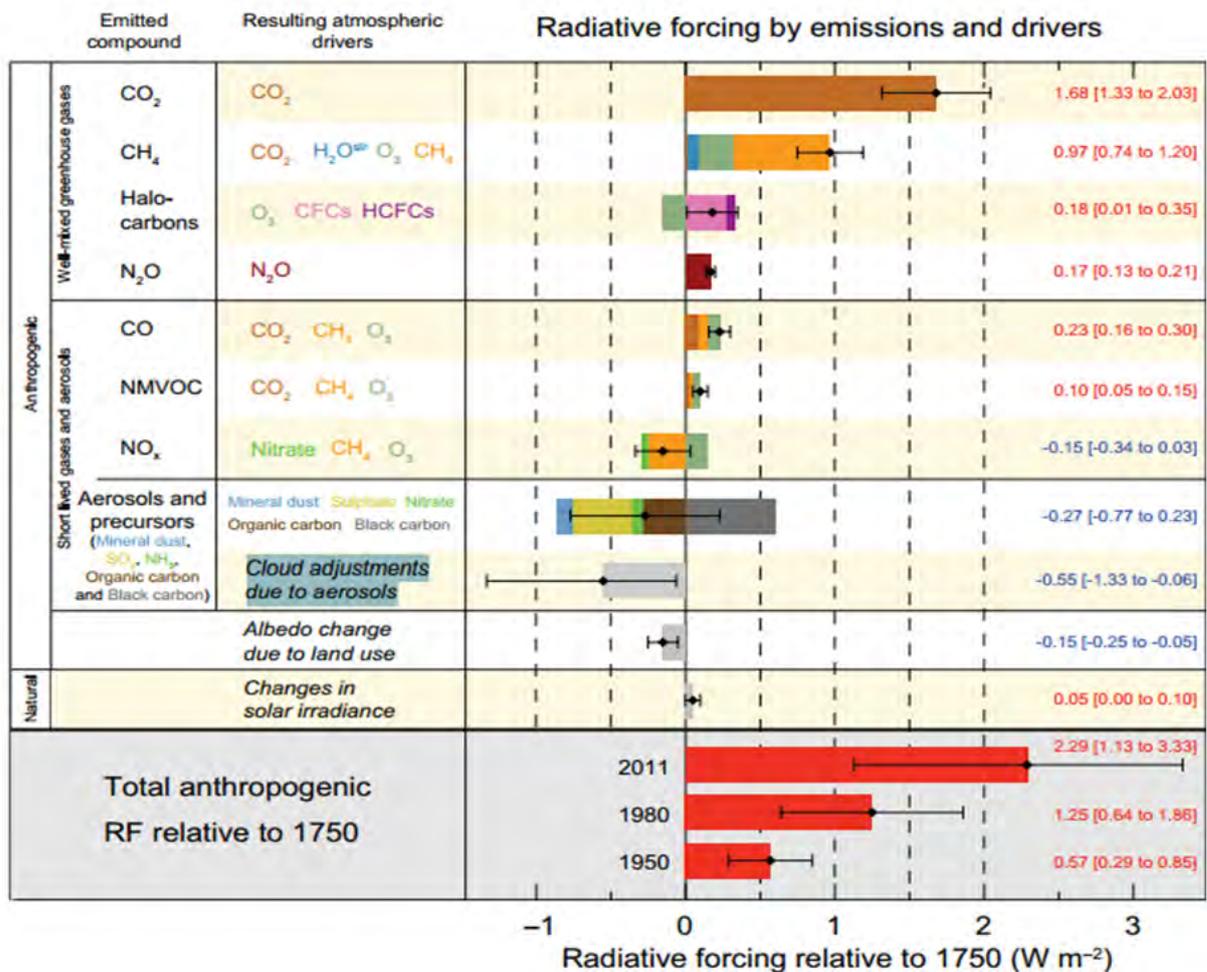


Figura 1.7 - Grafico raffigurante il contributo dei singoli forzanti radiativi (2011).

Aumento della temperatura media globale

Le temperature registrate negli ultimi tre decenni sulla superficie della Terra risultano essere le più elevate mai registrate (fig.1.8) e, in base a stime, anche le più alte degli ultimi 1400 anni. La temperatura della superficie terrestre non è costante nel tempo e presenta delle anomalie, ovvero fluttuazioni dovute a cause diverse.

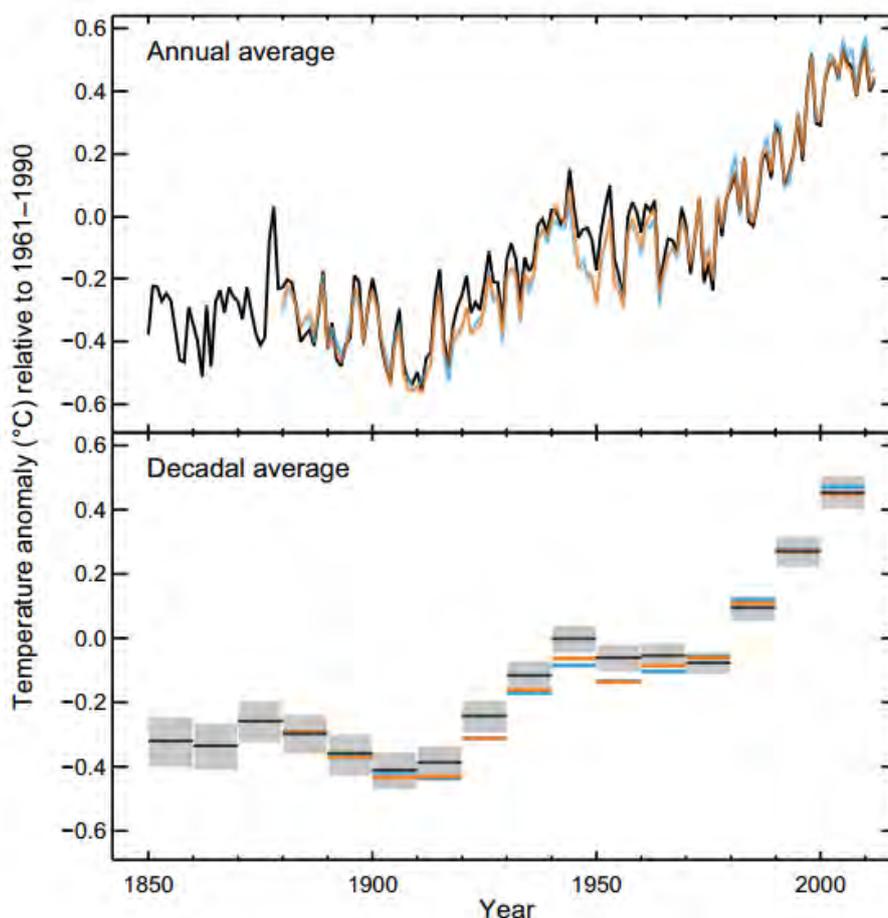


Figura 1.8 - Grafico dell'andamento della temperatura media della superficie terrestre, calcolata, in alto, su base annuale, in basso, su base decennale. Le 3 curve per ogni grafico sono espressione di tre diversi modelli di calcolo.

Le principali fluttuazioni (fig.1.9) sono dovute essenzialmente a:

- *componente solare*, legata alle variazioni della radiazione solare. Il periodo di tali oscillazioni è estremamente variabile: da pochi giorni a milioni di anni. Nell'ultimo secolo, la fluttuazione più significativa è quella con periodo di circa 11 anni, che genera variazioni di circa $0,1^{\circ}\text{C}$;
- *componente vulcanica*. Nonostante le quantità di CO_2 emesse (trascurabili rispetto alle emissioni antropogeniche⁵), l'attività vulcanica ha un effetto di raffreddamento della superficie terrestre, a causa delle emissioni di grandi quantità di aerosol solforici che riflettono i raggi solari. In questo caso le variazioni possono superare lo $0,1^{\circ}\text{C}$, ma risultano più irregolari e rare.

⁵ La quantità di CO_2 annuale emessa dai vulcani è un valore ancora dibattuto; viene stimata $<0,3 \text{ PgCO}_2$, circa un centesimo di quella emessa dall'uomo.

- *variabilità interna*, legata soprattutto a fenomeni climatici locali. Ha un range di variazione che va circa da -0.2°C a $+0.2^{\circ}\text{C}$. Grande rilievo in tale contesto lo ha *El Niño* (fig. 1.10)⁶, fenomeno climatico periodico con andamento caotico che si manifesta tra dicembre e gennaio mediamente ogni 5 anni; determina un riscaldamento della superficie dell'oceano Pacifico centrale che scombussola il clima causando inondazioni e siccità.
- *componente antropica*. Risulta molto difficile da stimare; in più non vi è ancora l'unanimità degli scienziati nel considerare l'attività umana come una delle cause del riscaldamento globale. Di fatto, la stragrande maggioranza dei climatologi (il 97%⁷)

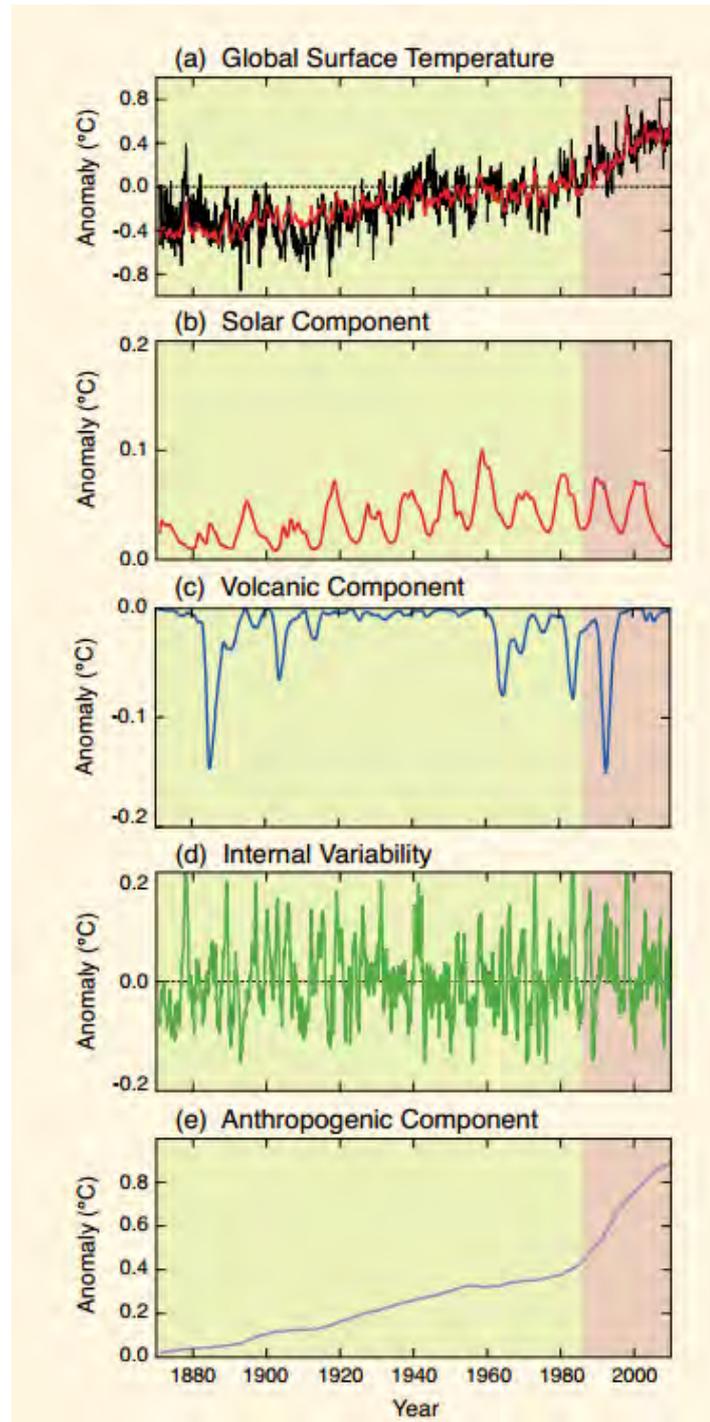


Figura 1.9 - Grafici raffiguranti l'anomalia della temperatura della superficie terrestre globale (a) e delle componenti solare (b), vulcanica (c), per variabilità interna (d), antropogenica (e).

⁶ www.scientificamerican.com

⁷ Anderegg, W., Prall, J., Harold, J. and Schneider, S., *Expert credibility in climate change. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010.

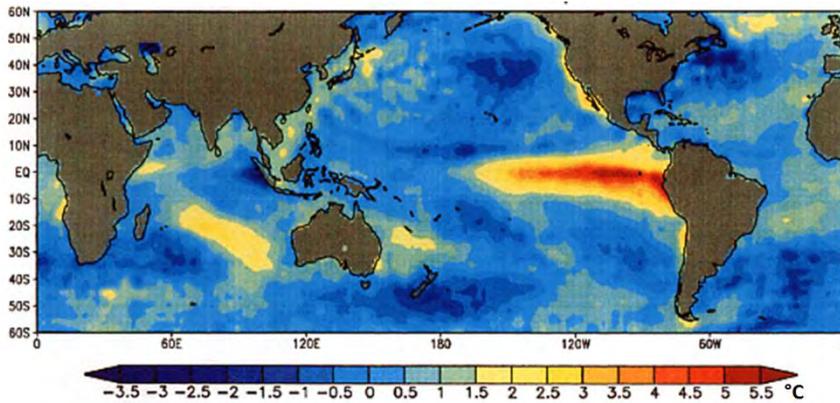


Figura 1.10 –
Rappresentazione delle temperature oceaniche durante El Niño nel 1997, il più forte per intensità degli ultimi anni.

ritiene che l'attività antropica abbia determinato un innalzamento della temperatura media globale. L'IPCC sostiene che l'anomalia della temperatura media del globo, da correlare con l'attività umana, sia di 0,85°C.

L'innalzamento della temperatura media della superficie terrestre ha due importanti conseguenze:

- aumento dell'evaporazione dell'acqua dagli oceani;
- variazione dell'equilibrio naturale del clima.

Aumento dell'evaporazione dagli oceani

L'aumento dell'evaporazione comporta un incremento della concentrazione di vapore acqueo e quindi, essendo questo la principale causa naturale dell'effetto serra⁸, un aumento della temperatura. Quanto possa incidere questo fenomeno di feed-back è tuttora oggetto di ricerca e di numerosi dibattiti. Non è ancora chiaro se il segno complessivo di questo feed-back sia positivo (porti ad un aumento delle temperature) o negativo, legato alla formazione di aerosol; la maggioranza degli studiosi ritiene, comunque, che non solo abbia segno positivo, ma anche una grandissima incidenza nel processo di riscaldamento globale. I modelli usati dall'IPCC hanno dato valori con intervalli di confidenza alquanto estesi, essendo il ciclo idrologico molto complesso. Semplificando il fenomeno e considerando valori medi, si può affermare che, se il raddoppio della concentrazione di CO₂ causa

⁸ Kiehl, J.T.; Kevin E. Trenberth, *Earth's annual global mean energy budget*, 1997

l'aumento di un grado, il meccanismo di feed-back, legato all'evaporazione dell'acqua, porta un incremento totale di tre gradi centigradi⁹.

Cambiamenti climatici

L'innalzamento delle temperatura ha varie conseguenze nel delicato equilibrio naturale del clima; le principali (supportate da dati e modelli) sono le seguenti:

- nelle zone artiche l'incremento di temperatura arriva al doppio dell'incremento medio, nelle zone antartiche l'aumento è meno marcato. Si ha quindi una sensibile riduzione delle calotte polari ed un aumento del livello degli oceani, circa 3 cm negli ultimi 30 anni (fig. 1.11). Ancora più critica risulta essere la situazione dei ghiacciai, che, per una questione di minor inerzia termica e un equilibrio termico più delicato, risultano essere i primi a risentire in modo significativo del riscaldamento climatico.

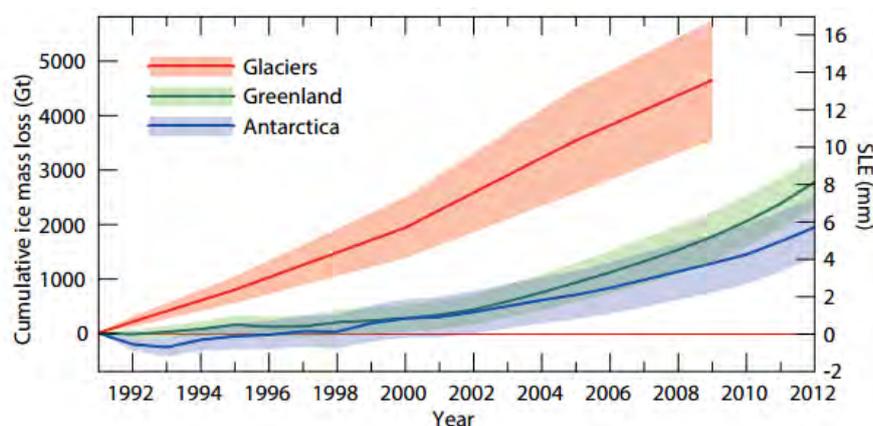


Figura 1.11 - Contributo dei ghiacciai e dello strato di ghiaccio (*ice sheets*) della Groenlandia e dell'Antartide all'innalzamento del livello degli oceani (SLE, *sea level equivalent*).

- Aumento di acidità dell'acqua negli oceani, legato a un incremento della quantità di CO₂ disciolta.
- Aumento di probabilità di eventi climatici rari. Si è riscontrato un aumento della varianza delle temperature massime e minime giornaliere, oltre, ovviamente, ad un aumento della media, (fig. 1.12). Per quanto riguarda le precipitazioni, è stato rilevato e

⁹ Seminario: *I Cambiamenti Climatici: il contributo astronomico e il contributo antropico*, tenuto da Nicola Scafetta nel 23/07/2014, Padova.

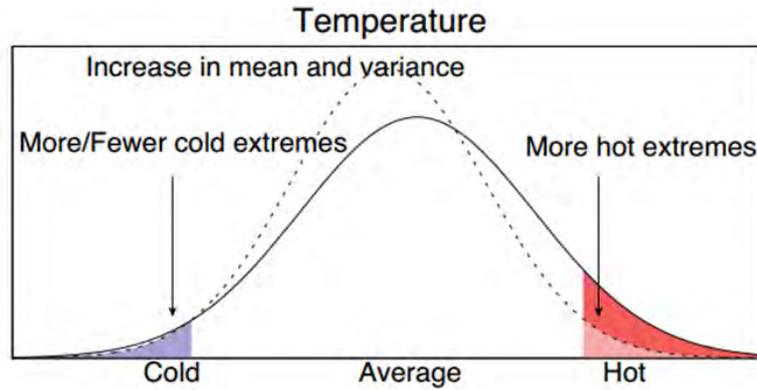


Figura 1.12 - Rappresentazione della variazione della distribuzione delle temperature massime e minime giornaliere.

confermato dai modelli, un aumento di probabilità di eventi estremi a seguito di un aumento della temperatura della superficie terrestre.

In fig. 1.13 è possibile notare come, anche da un punto di vista idrologico, gli equilibri climatici possano essere scombussolati. A sinistra viene mostrato l'incremento, in termini percentuali, dell'intensità di pioggia giornaliera avente tempo di ritorno di 20 anni, in seguito ad un aumento della temperatura media della superficie terrestre. L'immagine di destra mostra la variazione del tempo di ritorno di una pioggia di pari di intensità, sempre a seguito di un aumento unitario della temperatura media della superficie terrestre. Si fa ancora riferimento a una pioggia giornaliera con tempo di ritorno di 20 anni.

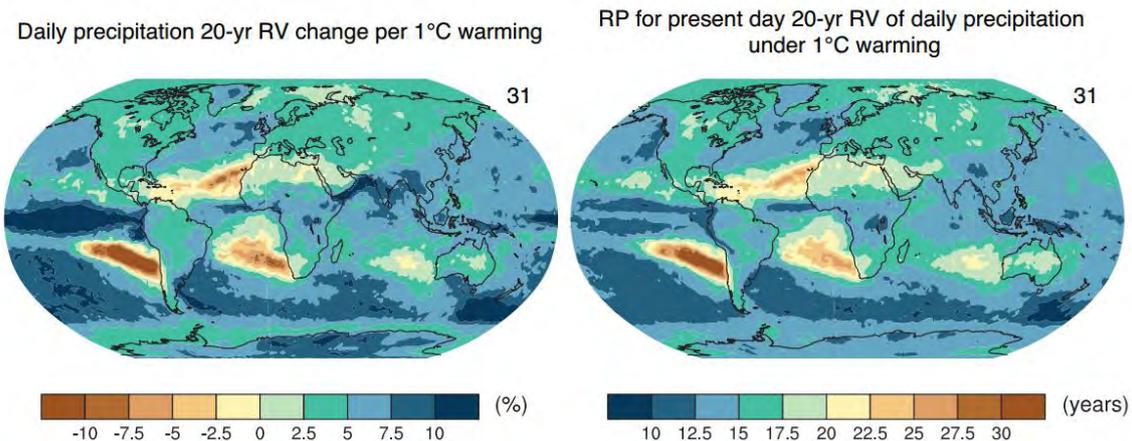


Figura 1.13 - A sinistra, variazione percentuale dell'intensità di una pioggia (a parità di tempo di ritorno) . A destra, variazione del tempo di ritorno di una pioggia (a parità di intensità).

1.3 Legislazione internazionale per la riduzione delle emissioni

Il primo accordo internazionale sul tema dell'inquinamento atmosferico è stata la Convenzione di Ginevra che, nel 1979, ha posto l'obiettivo di limitare le emissioni di inquinanti correlate al fenomeno delle piogge acide.

Per quanto riguarda invece le emissioni di gas ad impatto globale, a Montreal nel 1987, a seguito della scoperta del buco dell'ozono in Antartide, è stato firmato un protocollo d'intesa che limita l'uso delle sostanze ozono-lesive: clorofluorocarburi (CFC) e idroclorofluorocarburi (HCFC). Tale atto ha preso il nome di "Protocollo di Montreal"¹⁰.

Nel 1992, dopo il primo rapporto dell'IPCC (1990), che ha messo in evidenza una probabile correlazione tra le emissioni di gas serra di origine antropica e il cambiamento climatico, i delegati di 150 paesi hanno approvato la Convenzione quadro sui cambiamenti climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change*, UNFCCC), entrata poi in vigore nel 1994. Essa pone l'obiettivo di stabilizzare le concentrazioni di gas serra per la protezione e l'equilibrio del sistema climatico, promuove interventi a livello nazionale e internazionale, ma non prevede impegni vincolanti per la riduzione delle emissioni di gas serra.

Un passo importante nella politica contro i gas serra si è avuto l'11 dicembre 1997 con l'approvazione del protocollo di Kyoto, entrato poi in vigore nel 2005. Tale atto è stato ratificato da tutti i paesi ad eccezione degli Stati Uniti. Il Protocollo¹¹ prevede che i Paesi industrializzati riducano gradualmente le emissioni di:

- anidride carbonica (CO₂),
- metano (CH₄),
- protossido di azoto (N₂O),
- idrofluorocarburi (HFC),
- perfluorocarburi (PFC),
- esafluoruro di zolfo (SF₆).

Tali emissioni devono essere omogeneizzate in anidride carbonica equivalente usando come coefficiente di conversione il GWP.

¹⁰ www.minambiente.it/

¹¹ unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf

Questo protocollo prevedeva che nel primo periodo, ovvero dal 2008 al 2012, le emissioni dei gas serra venissero ridotte del 5% a livello mondiale rispetto all'anno base 1990. I livelli di riduzione sono diversi da paese a paese. A titolo di esempio la riduzione delle emissioni dei paesi dell'Unione Europea, nel loro insieme, doveva essere dell'8%, quella degli Stati Uniti del 7%, per il Giappone del 6% mentre per la Russia l'impegno era di non aumentare le quantità di emissioni. Nessun tipo di limitazione alle emissioni di gas-serra veniva previsto per i paesi in via di sviluppo in quanto non hanno contribuito in maniera significativa all'aumento della concentrazione di CO₂ in atmosfera. La figura sottostante (fig. 1.14)¹² confronta le emissioni di CO₂ totali di alcuni paesi con riferimento agli anni 1990, 2000 e 2011.

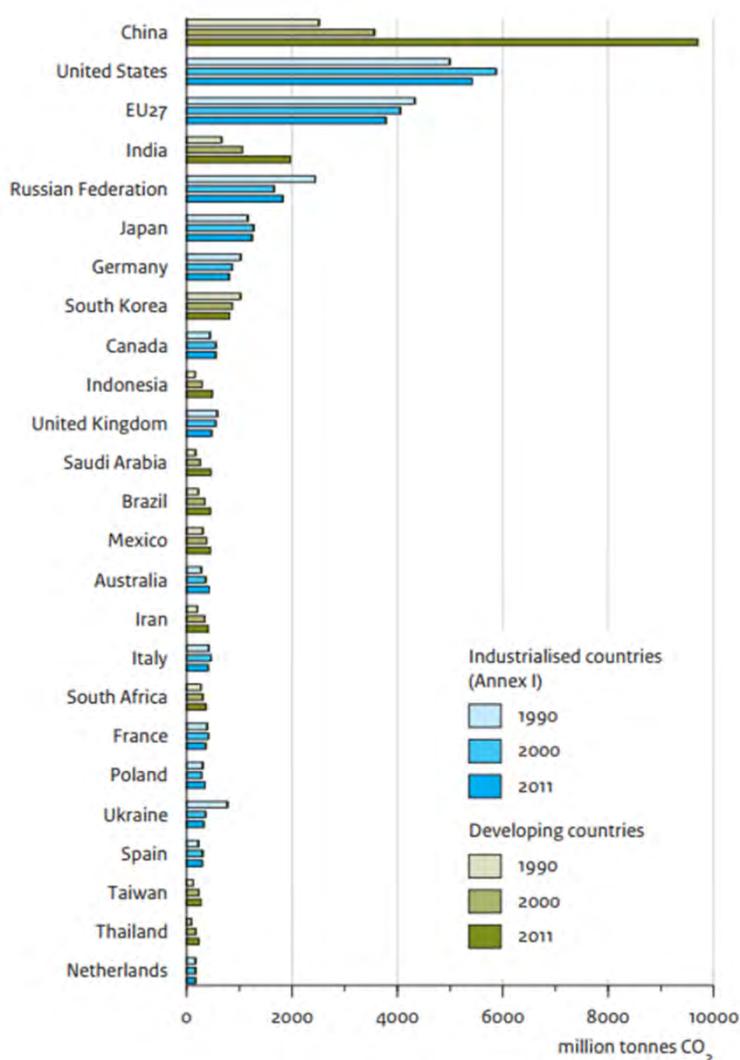


Fig. 1.14 - Confronto tra le emissioni di CO₂ totali di alcuni paesi con riferimento agli anni 1990, 2000 e 2011.

¹² European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability, (2012): *Trends in global CO₂ emissions 2012 report*.

Da notare il rilevante aumento delle emissioni di alcuni paesi in via di sviluppo, in particolare Cina e India. Questi, non essendo tenuti a ridurre gli impatti ambientali, non hanno adottato alcun provvedimento significativo, contrariamente a molti paesi industrializzati che hanno, invece, applicato politiche per la mitigazione delle emissioni, in particolare gli stati appartenenti all'Unione Europea tra il 2000 e il 2011. Tuttavia, anche la crisi economica degli ultimi anni ha determinato minori consumi e, quindi, un minor impatto ambientale.

Il 12 novembre 2014 il presidente degli Stati Uniti, Obama, e il presidente della Repubblica Popolare Cinese, Xi, hanno deciso di adottare provvedimenti concreti per la limitazione delle emissioni di gas serra. Obama ha dichiarato che gli Stati Uniti ridurranno le proprie emissioni del 26-28% entro il 2025, mentre Xi ha affermato che le emissioni della Cina inizieranno a diminuire entro il 2030 e che, entro tale data, il 20% dell'energia elettrica verrà prodotta con fonti rinnovabili¹³. Tali dichiarazioni rappresentano un importante traguardo, in quanto per la prima volta i leader politici delle due nazioni con le maggiori emissioni di gas serra nel mondo esprimono un preciso intento di mitigare tali emissioni, dichiarando obiettivi concreti e con riferimento a ben definiti termini temporali.

¹³ Articolo de La Stampa del giorno 12/11/2014 disponibile sul sito internet: <http://www.lastampa.it/2014/11/12/esteri/stati-unicina-raggiunto-laccordo-sull-emissione-di-gas-serra-Ch4Jqw3HLpeoNBCUV9777O/pagina.html>

Parte II - Impatto ambientale dei sistemi di trasporto

Nel 2000 il trasporto annuale di persone nel mondo è stato stimato intorno a $30 \cdot 10^{12}$ passeggeri·km, mentre il trasporto di merci è stato valutato pari a $56 \cdot 10^{12}$ tonnellate·km. Nella tab.2.1¹ viene mostrata la ripartizione dei volumi di domanda in relazione al modo di trasporto.

	Volume trasportato [10^{12} p·km / t·km]
Trasporto passeggeri	30,1
Macchina	15,4
Bus	6,2
2 ruote	1,9
Aereo	4,7
Treno	2,0
Nave	n.a.
Trasporto merci	56,4
Furgoni	0,63
Camion	6,4
Nave	42,6
Aereo	0,14
Treno	6,6

Tab. 2.1 - Volumi di domanda globale del trasporto di merci e persone ripartiti secondo i principali modi di trasporto.

Per quanto riguarda il trasporto di persone, il mezzo usato per più della metà del volume di passeggeri·km è l'automobile. Invece per il trasporto merci il mezzo maggiormente utilizzato è la nave, che copre più dei 3 quarti del totale delle tonnellate·km.

I volumi di domanda sono ripartiti in maniera molto disomogenea tra i vari paesi, tanto che l'80% del totale dei passeggeri·km motorizzati è effettuato da solo il 10% della popolazione mondiale².

¹ J. Borken-Kleefeld, T. Berntsen, Jan Fuglestedt, (2010) *Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport*, Environmental Science & Technology.

² IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

I carburanti fossili, in particolare i derivati dal petrolio, costituiscono la principale fonte di energia nei trasporti. Ne viene che volumi tanto grandi di domanda non possano non avere impatti considerevoli sull'ambiente e sul clima.

2.1 Fonti di energia utilizzate dai sistemi di trasporto

Nel 2010 oltre il 53% del consumo mondiale di petrolio è stato usato per coprire il 94% del totale di energia richiesta dal settore dei trasporti (fig. 2.1³). Il restante 6% di energia viene da biocarburanti (2%), elettricità (1%), gas naturale e altri carburanti (3%).

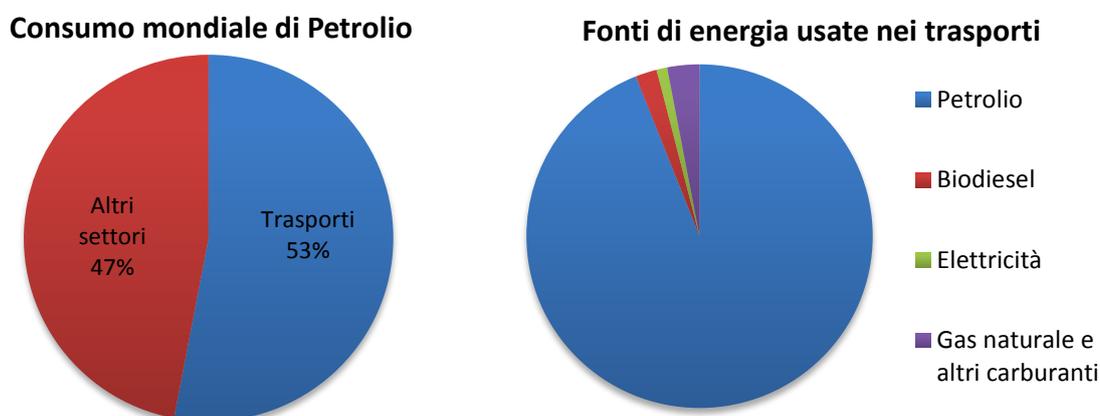


Fig. 2.1 - A sinistra, l'incidenza del settore dei trasporti nel consumo mondiale di petrolio; a destra ripartizione delle fonti di energia utilizzate nei trasporti.

Il 57% di energia consumata nel settore dei trasporti è legata al trasporto di persone, il restante 43% al trasporto di merci (fig. 2.2⁴). Inoltre, solo un terzo dell'energia consumata risulta effettivamente trasformata in energia meccanica, i restanti due terzi di energia sono persi.

³ Dati tratti da: IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

⁴ IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

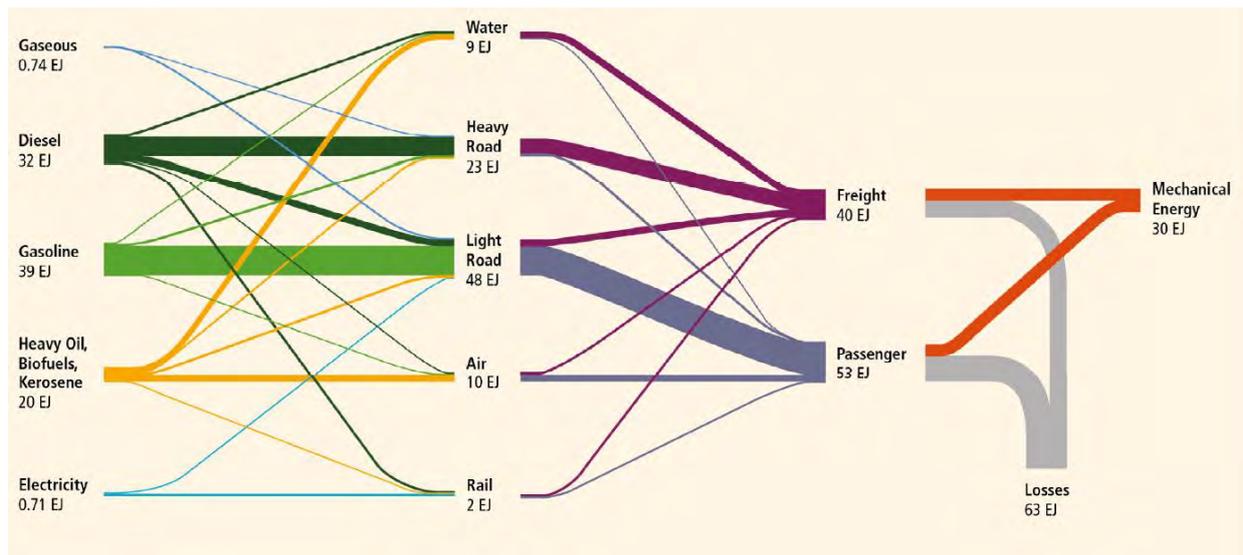


Fig. 2.2 - Ripartizione dell'energia consumata nel settore dei trasporti secondo fonte, modo, oggetto del trasporto e rendimento (E, Exa= 10^{18}).

2.2 Impatto ambientale dei trasporti

Il settore dei trasporti incide per il 20÷23% nelle emissioni globali di CO₂.

Nel 2010 le emissioni hanno raggiunto le 6,7 GtCO₂ (7,0 GtCO₂eq considerando anche altri gas). L'incidenza delle emissioni dei trasporti varia considerevolmente da paese a paese; in quelli sviluppati l'aliquota di emissioni legata ai trasporti è di circa il 30%, mentre per i paesi sottosviluppati è anche inferiore al 3%.

Le emissioni globali in questo settore risultano essere in costante crescita, nonostante si siano prodotti veicoli più efficienti e siano state adottate politiche per limitare le emissioni. Rispetto al 1970 le emissioni nel settore dei trasporti sono aumentate di quasi il 150% (fig. 2.3)⁵.

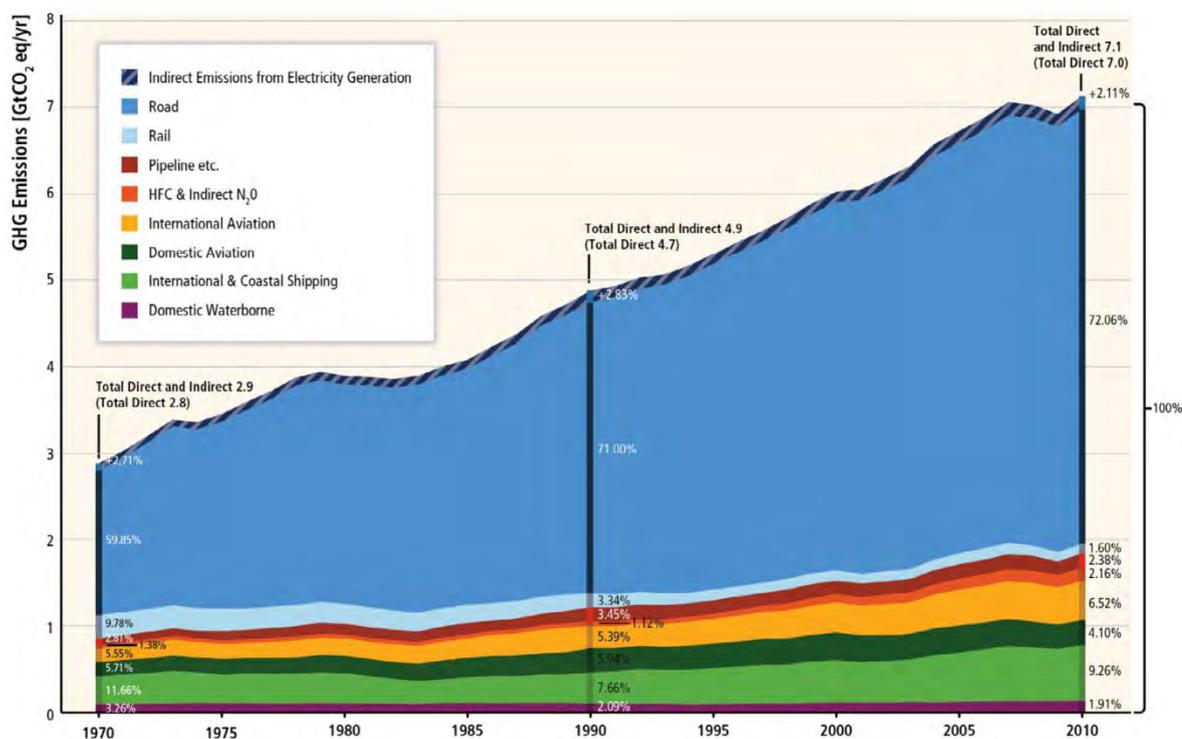


Fig. 2.3 - Valori delle emissioni di gas serra globali del settore dei trasporti ripartite secondo modo di trasporto, dal 1970 al 2010.

Come si è visto nel primo capitolo, l'impatto delle emissioni dipende molto dall'orizzonte temporale. Per analizzare la situazione attuale dell'effetto serra conviene fare

⁵ IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

riferimento al forzante radiativo, in quanto rappresenta direttamente l'energia assorbita in più dall'atmosfera a causa delle emissioni antropogeniche. Per orizzonti temporali maggiori conviene, per semplicità, fare riferimento direttamente alla quantità di CO₂ emessa, in quanto, come si è visto in fig. 1.3, in prima approssimazione può essere considerata come unica causa del riscaldamento globale antropogenico (l'errore decresce all'aumentare dell'orizzonte temporale di riferimento).

Si premette che i valori delle emissioni di gas serra del settore dei trasporti risultano fortemente dispersi essendo funzione di numerosi fattori. A livello disaggregato le principali variabili sono: tipologia di veicolo, di motore, di carburante, di percorso, coefficiente di occupazione e caratteristiche comportamentali di guida. Mentre a livello aggregato sono: realtà socio-economica e politica, anno, scala degli spostamenti, tipologie di veicoli considerate nell'aggregazione dei dati.

Di seguito si analizzano, per ogni modo di trasporto, il forzante radiativo totale e i valori di emissioni medi per passeggero·km o tonnellata·km

Trasporto stradale

Il trasporto stradale è il settore dei trasporti che incide maggiormente nel riscaldamento globale, essendo causa del 72% delle emissioni di CO₂-eq. I veicoli leggeri (*Light Duty Vehicles*) consumano circa metà del petrolio usato nel settore dei trasporti⁶, corrispondente a circa un quarto del consumo mondiale. Inoltre, l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) afferma che il numero mondiale dei possessori di un veicolo leggero raddoppierà in pochi decenni⁷.

La forzante radiativa (RF) legata al trasporto stradale nel 2000 ha raggiunto il valore di 0,177 Wm⁻². I contributi maggiori sono dovuti alle emissioni di CO₂ e di ozono troposferico, causato dalle emissioni di NO_x (fig. 2.4⁸). Una componente non trascurabile di RF è dovuta alle emissioni di clorofluocarburi usati nei sistemi di condizionamento mobili.

⁶ IEA (International Energy Agency), (2012) *Mobility Model database - Input data for the Energy Technology Perspectives*.

⁷ IEA (International Energy Agency), (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability*.

⁸ Elmar Uhereka, Tomas Halenkab, Jens Borken-Kleefeldc, Yves Balkanskid, Terje Berntsene, Carlos Borregof, Michael Gaussg, Peter Hoorah, Katarzyna Juda-Rezlerh, Jos Lelieveldi, Dimitrios Melasi, Kristin Rypdale, Stephan Schmidj, (2010) *Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport, Atmospheric Environment*.

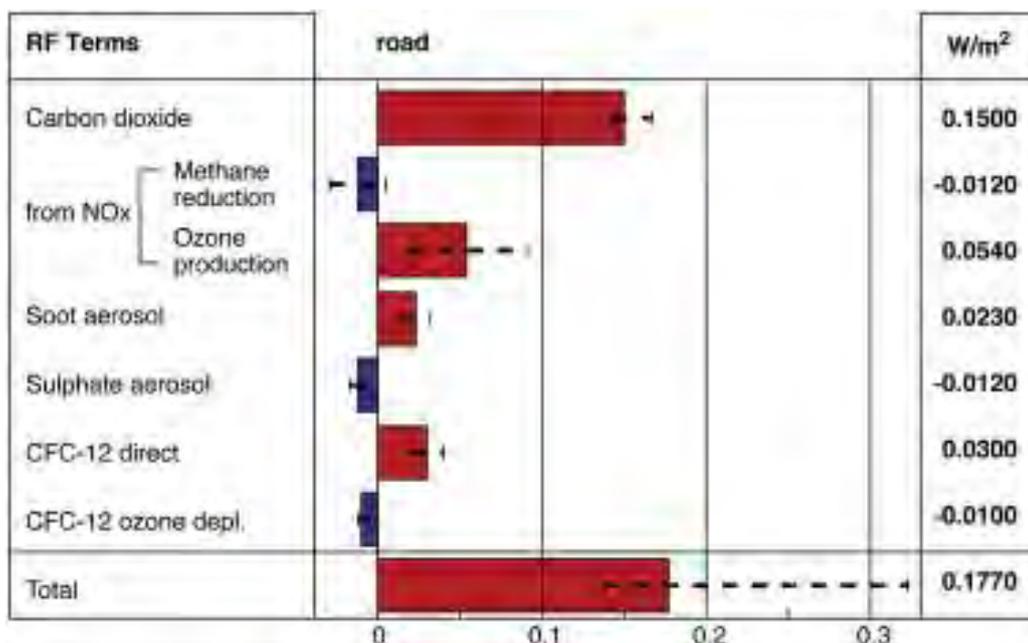


Fig. 2.4 - Forzante radiativo globale causato dal trasporto stradale nel 2000.

Nel 2002 il 30% dell'impatto dei gas usati nei sistemi di refrigerazione era legato a sistemi di condizionamento mobili (fig. 2.5)⁹, installati principalmente su veicoli stradali. Tale aliquota corrisponde a circa 0,7 GtCO₂-eq.

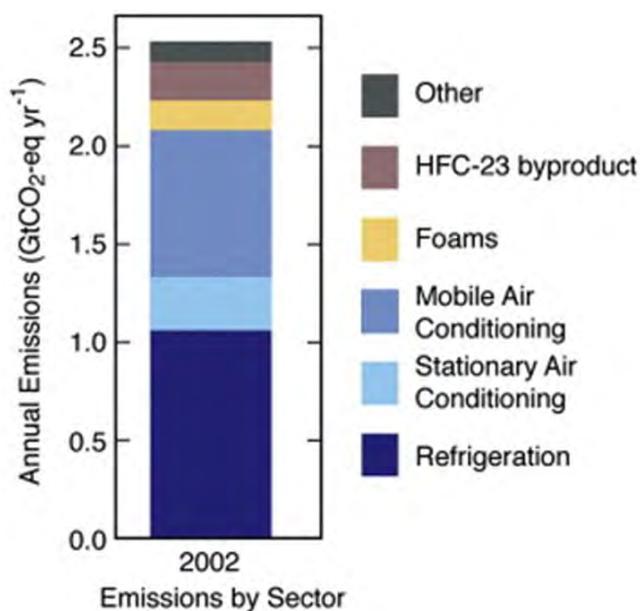


Fig. 2.5 - Emissioni di alocarburi nel settore della refrigerazione ripartiti in base al settore di utilizzo.

⁹ Elmar Uhreka et al. (2010) *Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport*, Atmospheric Environment.

Come si può vedere in fig. 2.6¹⁰, tali emissioni assumono un'importanza sostanziale se si considerano il GTP come indice di impatto e orizzonti temporali lunghi, ad esempio 100 anni. Si noti che l'unica emissione il cui impatto non è trascurabile rispetto alla CO₂ è il CFC. Tuttavia tale gas è stato completamente vietato dal protocollo di Montreal dal primo gennaio 2010¹¹.

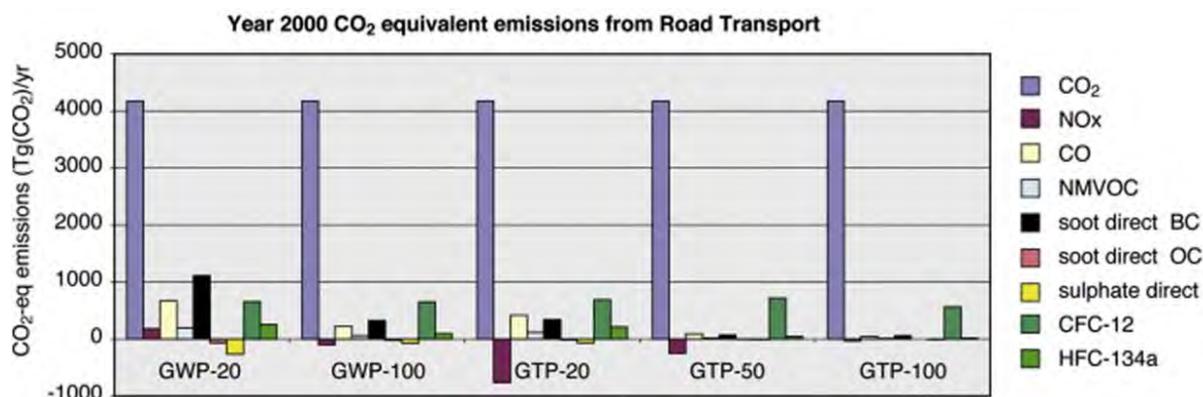


Fig. 2.6 - Emissioni equivalenti di CO₂ dei gas serra emessi nel settore dei trasporti nel 2000.

In fig. 2.7¹² vengono mostrate le emissioni di CO₂ suddivise per sottocategorie espresse in gCO₂/km per passeggero, per il trasporto di persone, e per tonnellata, per il trasporto di merci. Si può notare che le emissioni del trasporto collettivo risultano circa la metà di quello individuale e l'impatto per il trasporto merci decresce all'aumentare delle capacità di carico del mezzo.

¹⁰ Elmar Uhreka et al. (2010) *Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport*, Atmospheric Environment.

¹¹ http://www.minambiente.it/sites/default/files/archivio/allegati/Ozono/world_ods_production_consumption_1986_2004.pdf

¹² IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

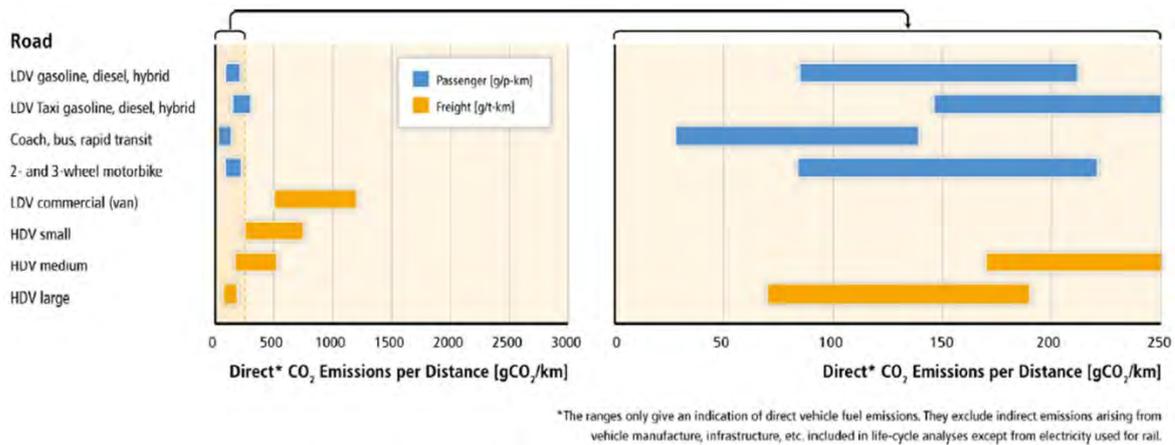


Fig. 2.7 - Emissioni di CO₂ del settore stradale nel trasporto di merci, normalizzate in gCO₂/tkm, e di persone, espresse in gCO₂/pkm.

Trasporto ferroviario

L'impatto del settore ferroviario è fortemente correlato alle modalità di produzione di energia elettrica in quanto, nella maggior parte dei casi, il trasporto avviene su mezzi a propulsione elettrica. In fig. 2.8¹³ sono riportati i valori delle emissioni di CO₂ per unità di energia elettrica prodotta in vari paesi e continenti o anche in base alle materie prime usate. Nei primi due casi i dati sono ottenuti dividendo l'impatto totale generato dal sistema produzione-distribuzione della corrente elettrica per il totale di energia consumata; nel calcolo vengono anche considerati gli impatti indiretti. I valori di emissione in funzione della materia prima usata esprimono invece solo gli impatti diretti.

¹³ Tabella dell'IPCC (disponibile al: <https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/Tables/t0305.pdf>) ricavata a partire da alcuni elaborati dell'IEA:

IEA, (2002) Energy Statistics of Non-OECD Countries: 1999-2000, IEA, Paris, France.

IEA, (2002) CO₂ Emissions from Fuel Combustion: 1971-2000, IEA, Paris, France.

IEA, (2003) Energy Statistics of OECD Countries: 1999-2000, IEA, Paris, France.

Carbon Dioxide Intensity Of Electricity kg CO ₂ kWh ⁻¹		Carbon Dioxide Intensity Of Electricity kg CO ₂ kWh ⁻¹	
Region		Country	
Africa	0.705	Argentina	0.319
Asia	0.772	Australia	0.885
EU	0.362	Austria	0.187
Europe (OECD)	0.391	Belgium	0.310
Europe (non-OECD)	0.584	Brazil	0.087
Latin America	0.189	Canada	0.225
Middle East	0.672	China	1.049
N America	0.567	Denmark	0.385
Pacific	0.465	Finland	0.222
Former USSR	0.367	France	0.078
		Germany	0.512
		Greece	0.876
Carbon Dioxide Intensities Of Fuels Used In The Calculations	g CO₂ MJ⁻¹	India	1.003
Fuel		Indonesia	0.715
Natural gas	56.1	Ireland	0.722
Gasoline	69.3	Italy	0.527
Kerosene	71.5	Japan	0.389
Diesel Oil	74.1	Malaysia	0.465
Liquefied Petroleum Gas	63.1	Mexico	0.689
Residual Fuel Oil	77.4	Netherlands	0.487
Anthracite	98.3	New Zealand	0.167
Bituminous Coal	94.6	Norway	0.003
Sub-bituminous coal	96.1	Pakistan	0.524
Lignite	101.2	Philippines	0.534
Oil Shale	106.7	Portugal	0.508
Peat	106.0	Russia	0.347
		S Africa	0.941
		Saudi Arabia	0.545
		Singapore	0.816
		Spain	0.455
		Sweden	0.041
		Switzerland	0.007
		UK	0.507
		USA	0.610

Fig. 2.8 - Valori di emissioni di anidride carbonica per unità di energia elettrica prodotta in vari paesi, continenti (impatti diretti e indiretti) o in base alle materie prime usate (solo impatti diretti): $1 \text{ kgCO}_2/\text{kWh} \cong 27,78 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$

Per quanto riguarda il contributo all'effetto serra globale, il forzante radiativo totale è meno di un decimo di quello causato dal settore stradale (fig. 2.9¹⁴).

¹⁴ Elmar Uhereka et al. (2010) *Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport*, Atmospheric Environment.

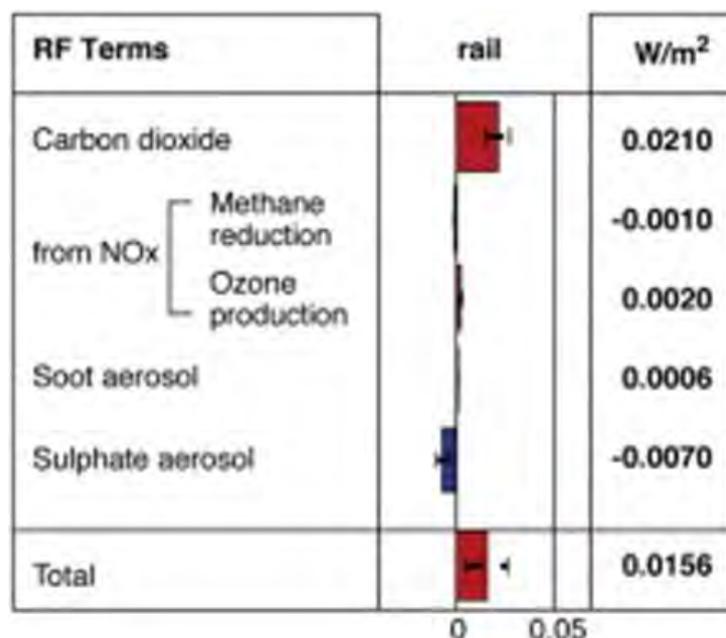


Fig. 2.9 - Forzante radiativo globale causato dal trasporto ferroviario nel 2000.

In fig. 2.10¹⁵ vengono mostrate le emissioni di CO₂ suddivise per sottocategorie espresse in gCO₂/km per passeggero, per il trasporto di persone, e per tonnellata, per il trasporto di merci. Confrontando tale grafico con quello del trasporto stradale, si può notare che la differenza tra le emissioni di bus/pullman e treno passeggeri non è così marcata; è opportuno precisare che per i trasporti collettivi molto dipende dal coefficiente di occupazione medio considerato. La differenza risulta notevole, invece, nel caso di trasporto di merci.

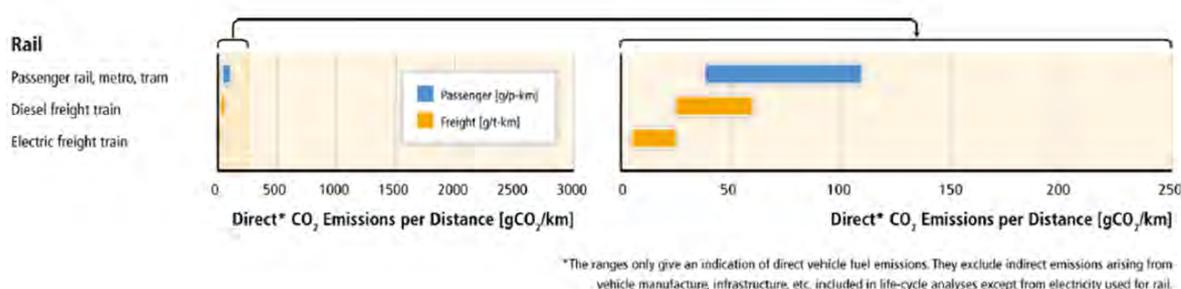


Fig. 2.10 - Emissioni di CO₂ del settore ferroviario nel trasporto di merci, normalizzate in gCO₂/tkm, e di persone, espresse in gCO₂/pkm.

¹⁵ IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

Trasporto Navale

Il trasporto navale è il settore che contribuisce meno al riscaldamento globale e che ha le minori emissioni di anidride carbonica per il trasporto di merci. Grazie alle lunghe distanze percorse e alle grandi capacità di carico, il settore navale si afferma come il settore a minor impatto ambientale.

Alla stima del forzante radiativo del trasporto navale concorrono due componenti: una legata agli effetti diretti, con valore mediamente nullo, e una dovuta agli effetti indiretti, ovvero alla formazione indiretta di aerosol. Il valore della seconda componente, tuttora molto dibattuto per le grandi difficoltà di stima, varia circa tra 0 e $-0,8 \text{ W m}^{-2}$ (fig. 2.11¹⁶). E' comunque possibile affermare che, con un livello di confidenza del 99%, la forzante totale del trasporto navale è negativa.¹⁷

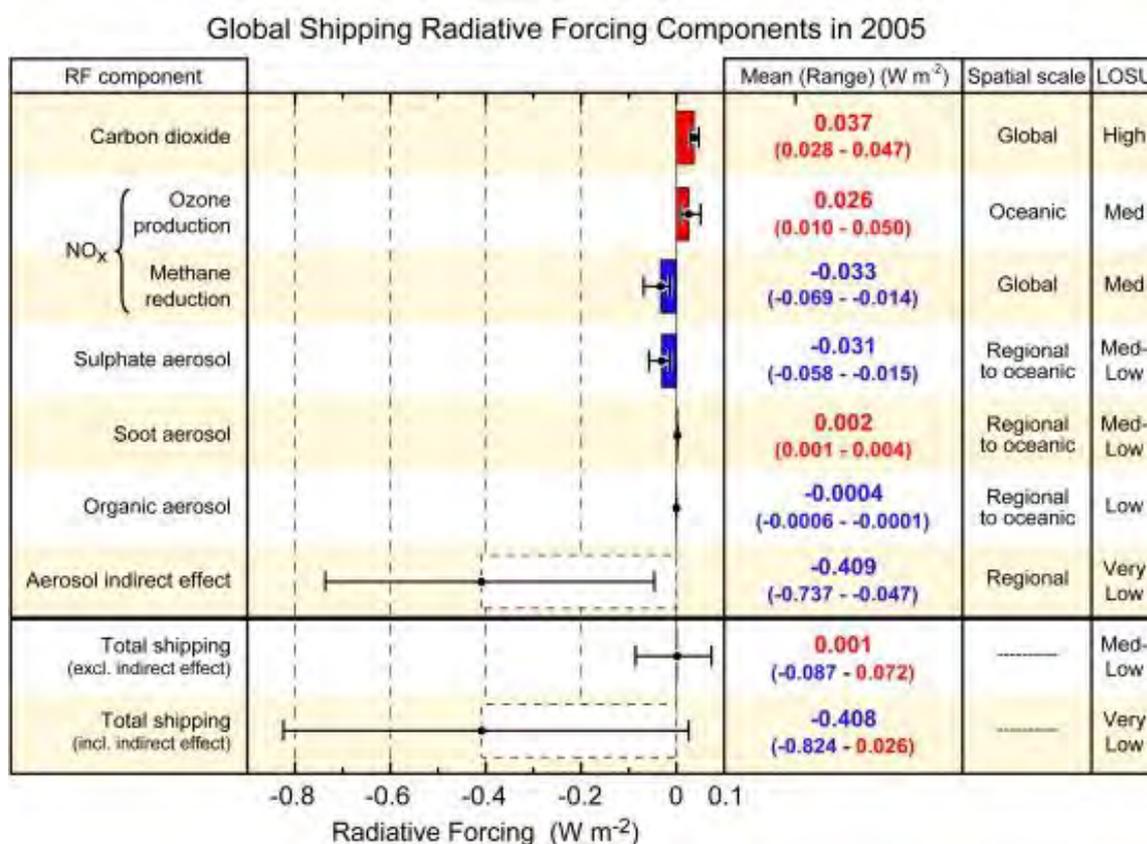


Fig. 2.11 - Forzante radiativo globale causato dal trasporto navale nel 2005.

¹⁶ Veronika Eytinga, Ivar S.A. Isaksenb, Terje Berntsenc, William J. Collinsd, James J. Corbette, Oyvind Endresenf, Roy G. Graingerg, Jana Moldanovah, Hans Schlagera, David S. Stevensoni, (2010) *Transport impacts on atmosphere and climate: Shipping*, Atmospheric Environment.

¹⁷ Jan Fuglestedt, Terje Berntsen, Gunnar Myhre, Kristin Rypdal, Ragnhild Bieltvedt Skeie, (2007) *Climate forcing from the transport sectors*, Proceedings of the National Academy of Sciences.

In fig. 2.12¹⁸ vengono mostrate le emissioni di CO₂ suddivise per sottocategorie espresse in gCO₂/km per passeggero, per il trasporto di persone, e per tonnellata, per il trasporto di merci.

Come precedentemente accennato, i valori delle emissioni del settore navale sono molto contenute, soprattutto se si considera il trasporto di merci su tratte oceaniche. Per tratte di lunghezza inferiore, il treno a trazione elettrica è caratterizzato da valori di emissione minori. Per quanto riguarda invece il trasporto di persone, i dati risultano molto dispersi per la presenza di diverse tipologie di battelli, differenti per dimensioni, capacità di carico e, quindi, emissioni.

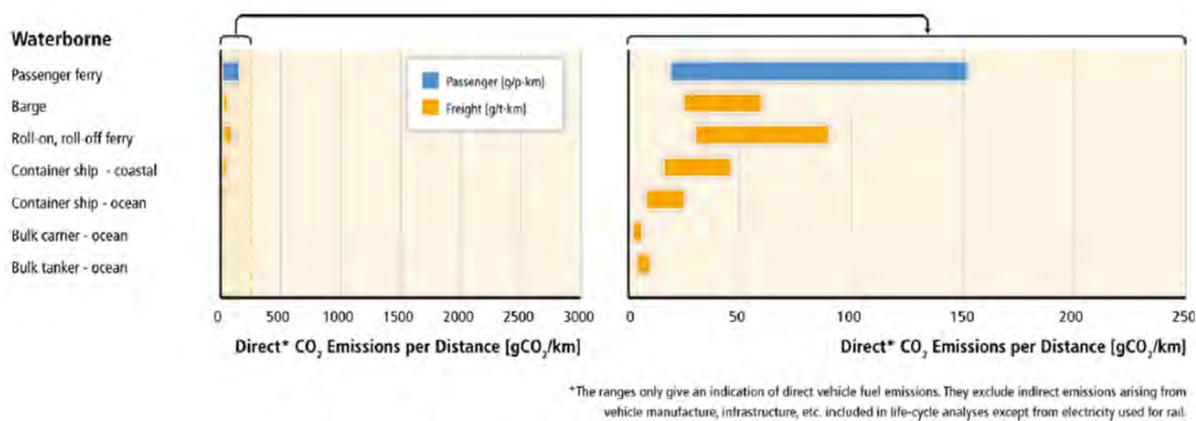


Fig. 2.12 - Emissioni di CO₂ del settore navale nel trasporto di merci, normalizzate in gCO₂/tkm, e di persone, espresse in gCO₂/pkm.

¹⁸ IPCC Working Group III, (2014) Climate Change 2014: Mitigation of climate change, Cambridge University Press.

Trasporto Aereo

L'aereo è il mezzo di trasporto con il più alto valore di emissioni di CO₂ per passeggero-km. Inoltre, il settore aereo è fortemente in espansione: tra il 2000 e il 2007 il numero di passeggeri trasportati è cresciuto con un ritmo di +5,3% all'anno per un totale di +38%. D'altra parte, il consumo medio di carburante è passato da una media di 8 a 5L per 100 passeggeri-km negli ultimi 20 anni¹⁹.

Per quanto riguarda la valutazione del contributo all'effetto serra, ci sono incertezze nella stima del forzante radiativo, legate alle difficoltà di valutazione dell'impatto degli aerosol, delle scie di condensa e dei "cirri indotti" (*induced cirrus*). Mediamente si attesta sullo 0,078 Wm⁻² (fig. 2.13²⁰).

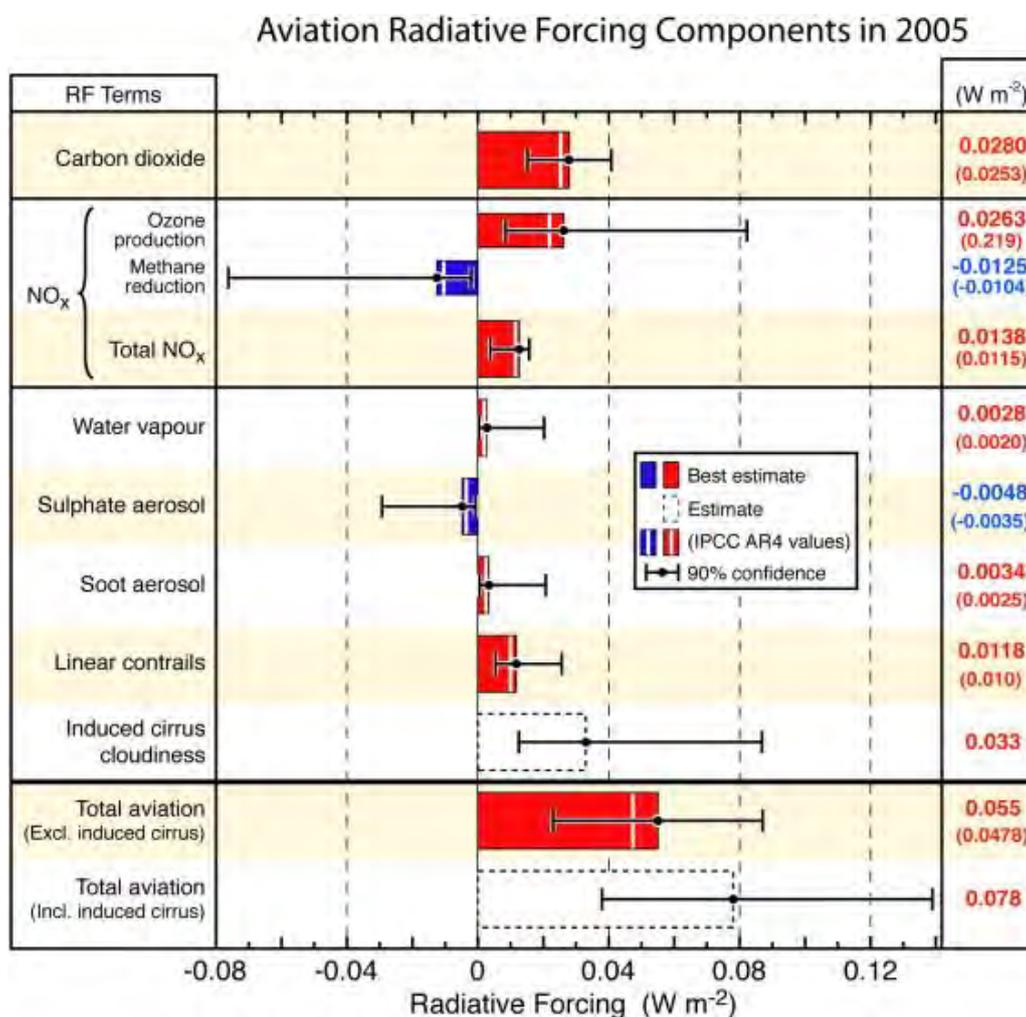


Fig. 2.13 - Forzante radiativo globale causato dal trasporto aereo nel 2005.

¹⁹ Anming Zhang et al., *Air transport, global warming and the environment*, Transportation Research Part D, 2010

²⁰ David S. Lee et al., *Aviation and global climate change in the 21st century*, Atmospheric Environment, 2009

In fig. 2.14²¹ vengono mostrate le emissioni di CO₂ suddivise per sottocategorie espresse in gCO₂/km per passeggero, per il trasporto di persone, e per tonnellata, per il trasporto di merci. Si noti come in questo settore le emissioni siano maggiori e, nel caso di trasporto merci, anche di un paio di ordini di grandezza rispetto ai precedenti modi di trasporto.

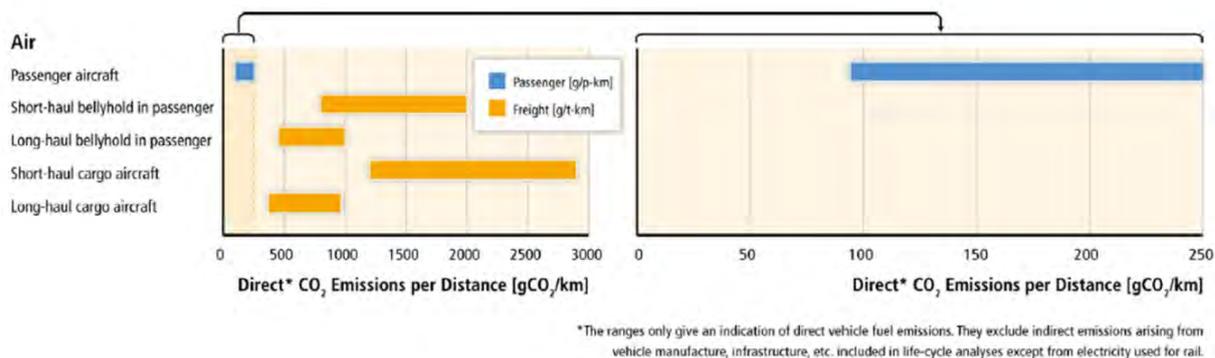


Fig. 2.14 - Emissioni di CO₂ del settore aereo nel trasporto di merci, normalizzate in gCO₂/tkm, e di persone, espresse in gCO₂/pkm

²¹ IPCC Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of climate change*, Cambridge University Press.

Impatti indiretti

Per impatti indiretti si considerano le emissioni prodotte durante il ciclo di vita (*life cycle analysis*) di tutte le componenti materiali e i servizi necessari per la produzione del servizio di trasporto. Le principali sono:

- Costruzione e manutenzione delle infrastrutture;
- Produzione, manutenzione e smaltimento dei veicoli;
- Produzione del carburante;
- Assicurazione dei veicoli e delle infrastrutture;
- Spostamenti fuori servizio (*vehicle inactive operation*), solo per trasporto collettivo;
- Incidenti.

La valutazione degli impatti indiretti dei trasporti risulta molto complessa per la quantità di variabili presenti. Inoltre non sempre risulta semplice determinare quali fattori debbano essere considerati e in quale misura.

Come mostrato in fig. 2.3, l'IPCC stima gli impatti indiretti di costruzione di infrastrutture e di produzione di veicoli e carburante pari a 0,1 GtCO₂-eq su un totale di 7,1 GtCO₂-eq.

In fig. 2.15²² sono mostrate le emissioni dirette e indirette, a livello disaggregato, di alcuni mezzi di trasporto negli Stati Uniti, normalizzate in gCO₂/pkm. Per auto e aerei si fa riferimento a veicoli particolarmente diffusi nel mercato americano (Toyota Camry, Chevrolet Trailblazer, Ford F-150, Embraer 145, Boeing 737 e 747); per il trasporto ferroviario si sono considerati i valori riportati in 3 casi di studio differenti effettuati in San Francisco e Boston. Per il bus urbano, invece, si fa riferimento alle emissioni rilevate durante il periodo di picco giornaliero, con 60 persone a bordo, e nei momenti di minor domanda, con 5 persone a bordo.

²² Mikhail V Chester and Arpad Horvath, (2008) *Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chain*, Environmental Research Letters.

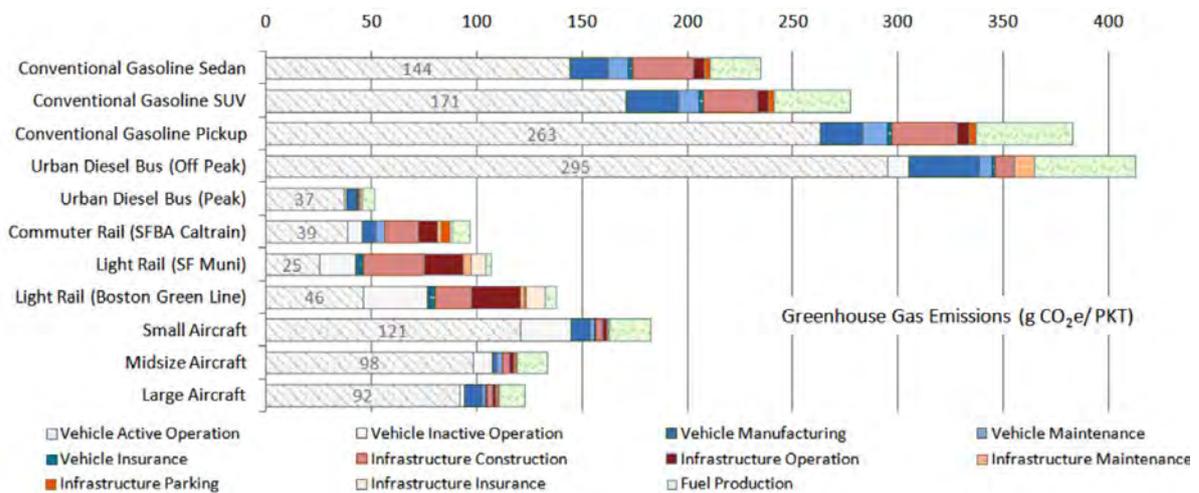


Fig. 2.15 - Grafico raffigurante le emissioni dirette ed indirette di alcuni veicoli appartenenti a diversi modi di trasporto.

Considerando l'analisi del ciclo di vita, si hanno delle emissioni addizionali pari al 63% per il trasporto stradale, 155% per quello ferroviario e 31% per quello aereo²³.

La differenza tra i dati presenti in questo grafico e quelli dei grafici precedenti è dovuta alla intrinseca dispersione dei dati in tale ambito e al diverso contesto a cui si fa riferimento. I valori delle emissioni del settore dei trasporti degli Stati Uniti non possono essere rappresentativi di quelli su scala mondiale a causa della particolare realtà socio-economica-politica di tale stato. A titolo d'esempio, le auto prese in considerazione (ad es. Chevrolet Trailblazer e Ford F-150) hanno degli impatti nettamente superiori ai valori medi globali, quindi non confrontabili.

Valutare l'impatto ambientale degli incidenti in sé risulterebbe complesso a causa delle numerose dinamiche possibili per ogni modo di trasporto e risulterebbe, per certi aspetti, poco significativo (per ogni incidente servirebbe una curva di probabilità di accadimento opportunamente tarata). Tuttavia, nel caso del trasporto stradale, settore in cui si hanno i volumi maggiori di emissioni e le percentuali maggiori di incidenti, è possibile stimare facilmente una componente di tali emissioni, ovvero quella causata dalla congestione dovuta all'incidente. Essa si basa dati più robusti e dipende essenzialmente dalle caratteristiche spazio-temporali delle code che si formano come conseguenza dell'incidente. In uno studio

²³ Mikhail V Chester and Arpad Horvath, (2008) *Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chain*, Environmental Research Letters.

effettuato²⁴ su 2171 incidenti avvenuti in California in ambito autostradale è risultato che l'impatto della congestione stradale conseguente a tali incidenti è mediamente di 398 kgCO₂. Rappresentando in un grafico la distribuzione di frequenza delle quantità di CO₂ emesse in seguito ad incidenti, si ottiene una distribuzione simile a una esponenziale negativa (fig. 2.16²⁵).

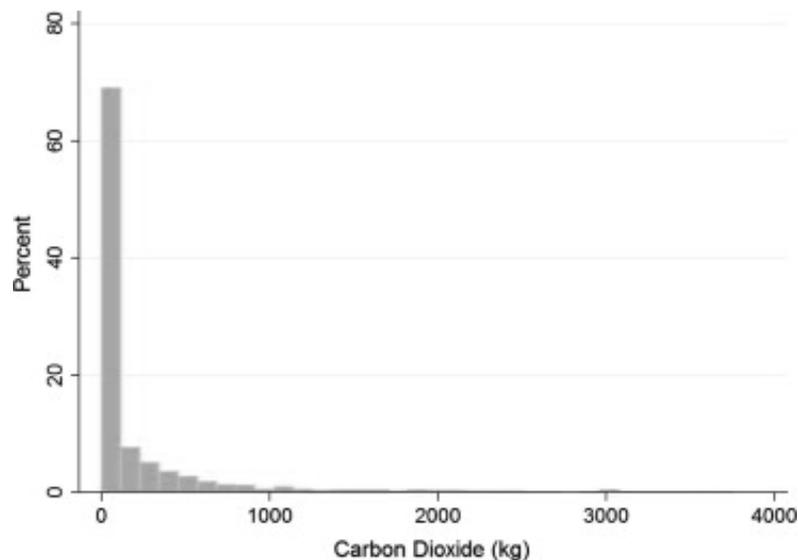


Fig. 2.16 - Distribuzione di frequenza delle quantità di CO₂ emesse in seguito ad incidenti.

Gli impatti della bicicletta, valutabili tramite analisi del ciclo di vita, essendo soprattutto di carattere indiretto, vengono stimati attorno a 4÷5 gCO₂/p·km²⁶.

²⁴ Younshik Chung, Hanseon Cho, Keechoo Choi (2013), *Impacts of freeway accidents on CO2 emissions: A case study for Orange County, California, US*, Transportation Research Part D.

²⁵ Ibidem.

²⁶ Christopher R. Cherry, Jonathan X. Weinert, Yang Xinmiao, (2009) *Comparative environmental impacts of electric bikes in China*, Transportation Research Part D.

2.3 Confronto tra i vari sistemi di trasporto.

Oltre ai valori delle emissioni precedentemente discussi, ovvero quelli stimati dall'IPCC, si presentano anche quelli stimati dall'IEA, l'Agenzia Internazionale dell'Energia (fig. 2.17²⁷).

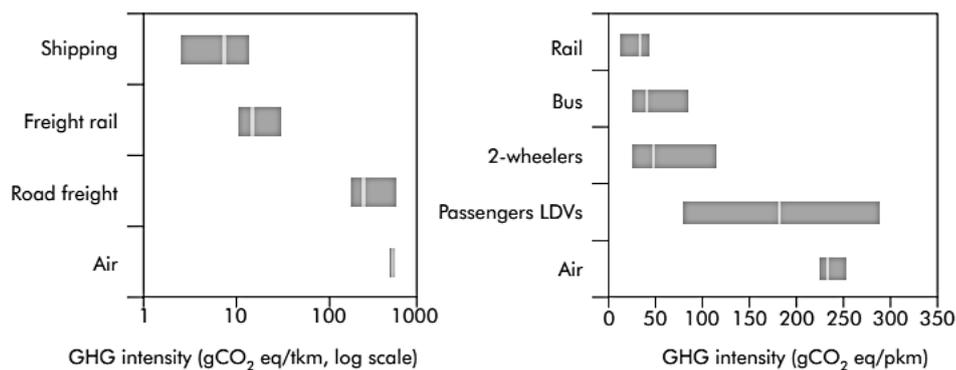


Fig. 2.17 - Stima delle emissioni di CO₂ per trasporto merci, a sinistra, e di persone, a destra, suddivise per modo di trasporto.

Tuttavia, per un confronto più significativo degli impatti dei vari settori di trasporto, conviene considerare direttamente quanto essi incidono sulla variazione di temperatura della superficie terrestre. In fig. 2.18²⁸ si presentano gli impatti globali, espressi in variazione di temperatura, dei vari modi di trasporto. Da notare la dipendenza dall'orizzonte temporale dell'impatto del settore navale: in un primo momento l'effetto preponderante è quello di raffreddamento del globo causato dalla produzione di aerosol, caratterizzati da un ciclo di vita breve, successivamente diventa invece prevalente l'effetto dei gas serra, ossia di riscaldamento.

Come si è visto in precedenza, le emissioni indirette (*Rail I*) del trasporto ferroviario hanno un impatto di intensità paragonabile a quelle dirette (*Rail D*); vengono pertanto prese entrambe in considerazione nel confronto dei modi di trasporto.

²⁷ IEA (International Energy Agency), (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability*.

²⁸ Terje Berntsen and Jan Fuglestvedt, (2008) *Global temperature responses to current emissions from the transport sectors*, Proceedings of the National Academy of Sciences.

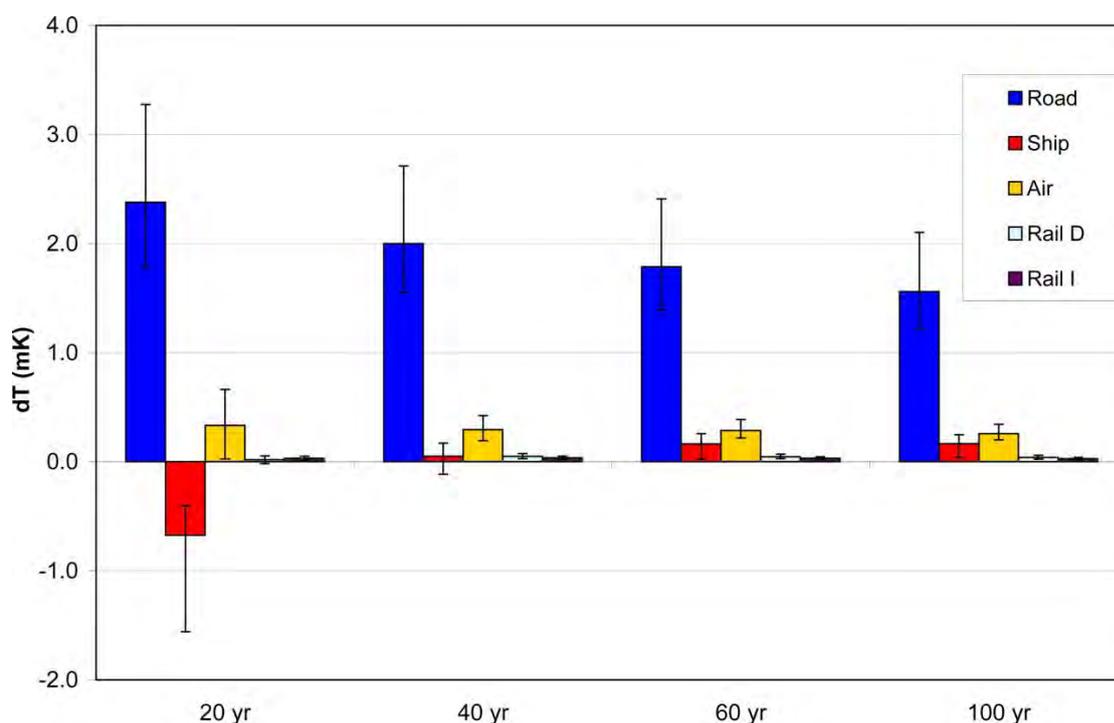


Fig. 2.18 - Variazione della temperatura media della superficie terrestre, causata dalle emissioni globali annuali (anno 2000) dei diversi sistemi di trasporto .

In fig. 2.19²⁹, infine, è mostrata la stima dell'andamento temporale della variazione di temperatura della superficie terrestre, causata dal settore dei trasporti, considerando emissioni, costanti nel tempo, equivalenti a quelle prodotte nell'anno 2000.

²⁹ Terje Berntsen and Jan Fuglestedt, (2008) *Global temperature responses to current emissions from the transport sectors*, Proceedings of the National Academy of Sciences.

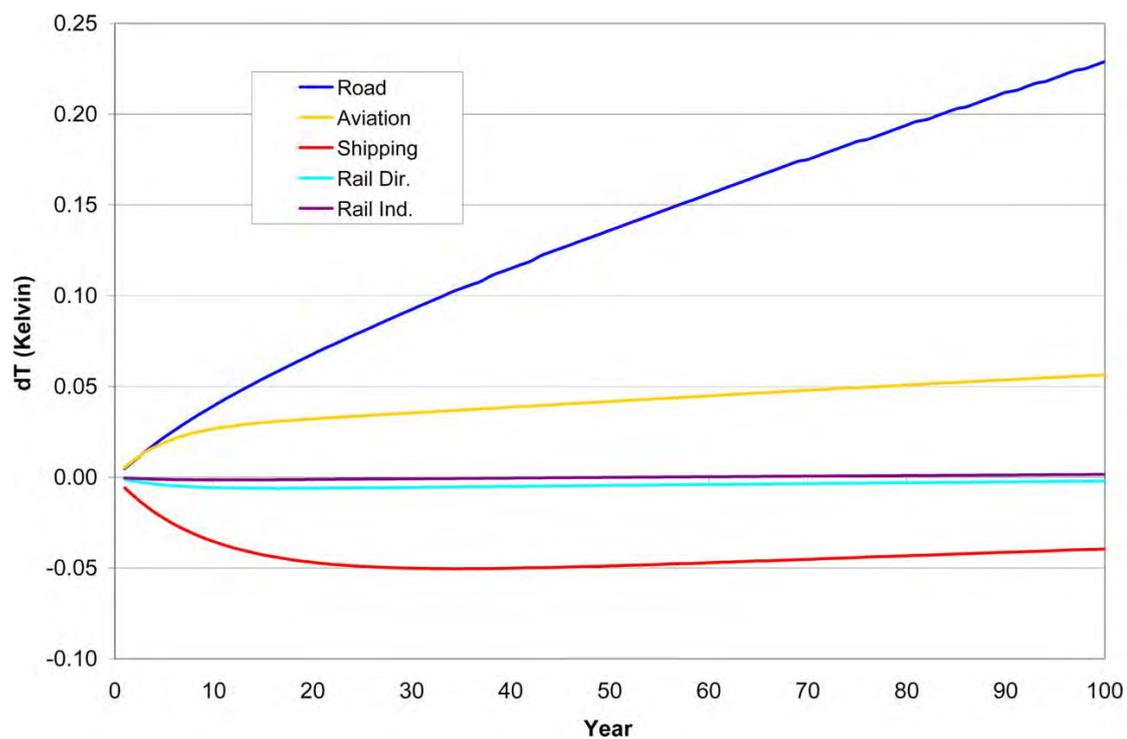


Fig. 2.19 - Andamento temporale della variazione di temperatura della superficie terrestre, causata dal settore dei trasporti, considerando emissioni, costanti nel tempo, equivalenti a quelle prodotte nell'anno 2000.

Parte III – Strategie e politiche per la riduzione delle emissioni di gas serra

Nello studio delle politiche per la riduzione delle emissioni di gas serra, assume particolare rilievo l'analisi dei costi, al fine di individuare in quale settore convenga investire.

Da un'analisi costi-benefici sulla politica statale di riduzione delle emissioni di gas serra, effettuata dalla Germania tra il 1999 e il 2004, emerge che il settore in cui si ha, non solo il minor costo totale ma addirittura un guadagno, è quello dei trasporti (tab. 3.1)³⁰.

Settore	<i>Built environment</i>	Agricoltura	Trasporti	Industria / Produzione di energia elettrica
Costo effettivo [€/tCO ₂ -eq]	20 - 70	2 - 20	-30 - -25	90 - 170

Tab 3.1 - Costo in euro per la riduzione di emissione di una tonnellata di CO₂ differenziato tra i principali settori dell'economia. Analisi effettuata in Germania in riferimento a dati dell'anno 2004.

Bisogna però precisare che in Germania il gas per il riscaldamento domestico e il carburante sono fortemente tassati; per il consumatore finale il risparmio stimato, che rientra nell'analisi costi-benefici (fig. 3.1)³¹, è dato dalla somma di una componente dovuta alla fornitura e una alle tasse. La mancata entrata fiscale, non viene invece considerata come spesa tra i costi del governo. Da ciò deriva un'analisi costi-benefici che sottostima il costo effettivo per la riduzione delle emissioni (tab. 3.1) sia nel settore dei trasporti che nel *built environment*.

³⁰CE Delft (2005), *Evaluation of cost-effectiveness of Dutch domestic climate policy*. Disponibile a https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCIQFjAA&url=http%3A%2F%2Fce.nl%2F%3Fgo%3Dhome.downloadPub%26id%3D362%26file%3D7922_Executive.pdf&ei=ZvYvVMz9AsfiavW3gdAH&usg=AFQjCNEICJUW0p0_POkvIHicNZTkixq83w&sig2=7lZQSmHtu6Upolhck4VSQ&cad=rja

³¹ Ibidem.

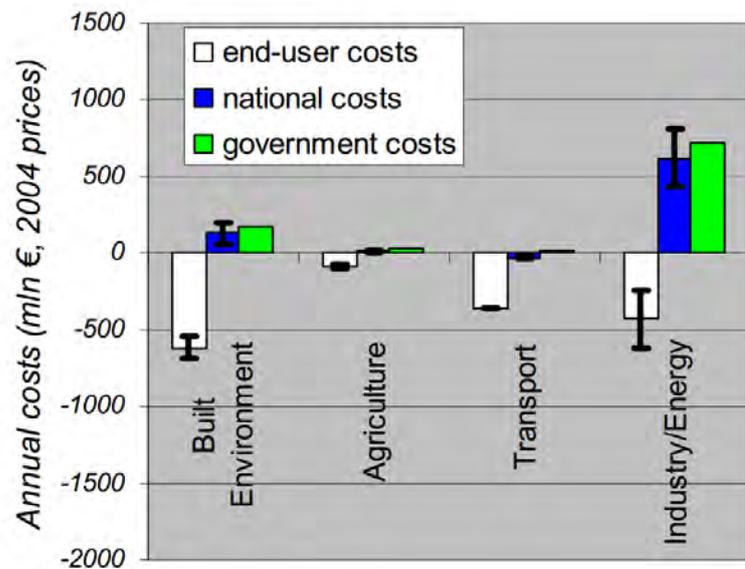


Fig. 3.1 - Analisi costi-benefici della politica della limitazione delle emissioni di gas serra della Germania nel 2004.

Pertanto sembra che, almeno sulla base dei risultati dello studio sopra citato, nelle politiche per la mitigazione delle emissioni di gas serra, risulti fondamentale, se non addirittura conveniente, investire nel settore dei trasporti. Come si vedrà in seguito, ogni strategia in questo ambito sottende dei co-benefici e/o dei risvolti negativi in campo economico, sociale ed ambientale e dovrà, quindi, essere valutata con particolare attenzione.

3.1 Approccio ASIF

L'approccio ASIF, ideato da Shipper e Marie-Lilliu nel 1999, è una schematizzazione del processo di produzione delle emissioni del settore dei trasporti in funzione di quattro variabili:

1. *Total Activity (A)*, attività totale dei trasporti: volume totale degli spostamenti;
2. *Modal Structure (S)*, struttura modale: frazione dell'attività totale effettuata con il modo di trasporto m ;
3. *Modal energy Intensity (I)*, efficienza energetica dei veicoli: quantità di energia necessaria per il trasporto di una persona, o una tonnellata di merce, per 1 km, con il tipo di veicolo v ;
4. *Carbon content of Fuels (F)*, impatto ambientale del carburante: quantità di CO₂ emessa per ottenere 1 MJ di energia dal carburante di tipo c .

Tali componenti, dal punto di vista analitico, risultano essere 4 fattori il cui prodotto fornisce il totale delle emissioni di gas serra causato dal settore dei trasporti:

$$\text{Emissioni totali di CO}_2 \text{ del settore dei trasporti} = \sum_{m,v,c} A \cdot S_m \cdot I_{mv} \cdot F_{mvc}$$

Dal punto di vista dimensionale si hanno le seguenti relazioni.

Per il trasporto di persone:

$$tCO_2eq = \sum_{m,v,c} pkm_{totali} \cdot \frac{pkm_m}{pkm_{totali}} \cdot \frac{MJ_{mv}}{pkm_m} \cdot \frac{tCO_2eq_{mvc}}{MJ_{mv}}$$

Per il trasporto merci:

$$tCO_2eq = \sum_{m,v,c} tkm_{totali} \cdot \frac{tkm_m}{tkm_{totali}} \cdot \frac{MJ_{mv}}{tkm_m} \cdot \frac{tCO_2eq_{mvc}}{MJ_{mv}}$$

L'approccio ASIF risulta anche un valido riferimento nella classificazione delle strategie per la riduzione delle emissioni di gas serra (fig. 3.2³²)

³² IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

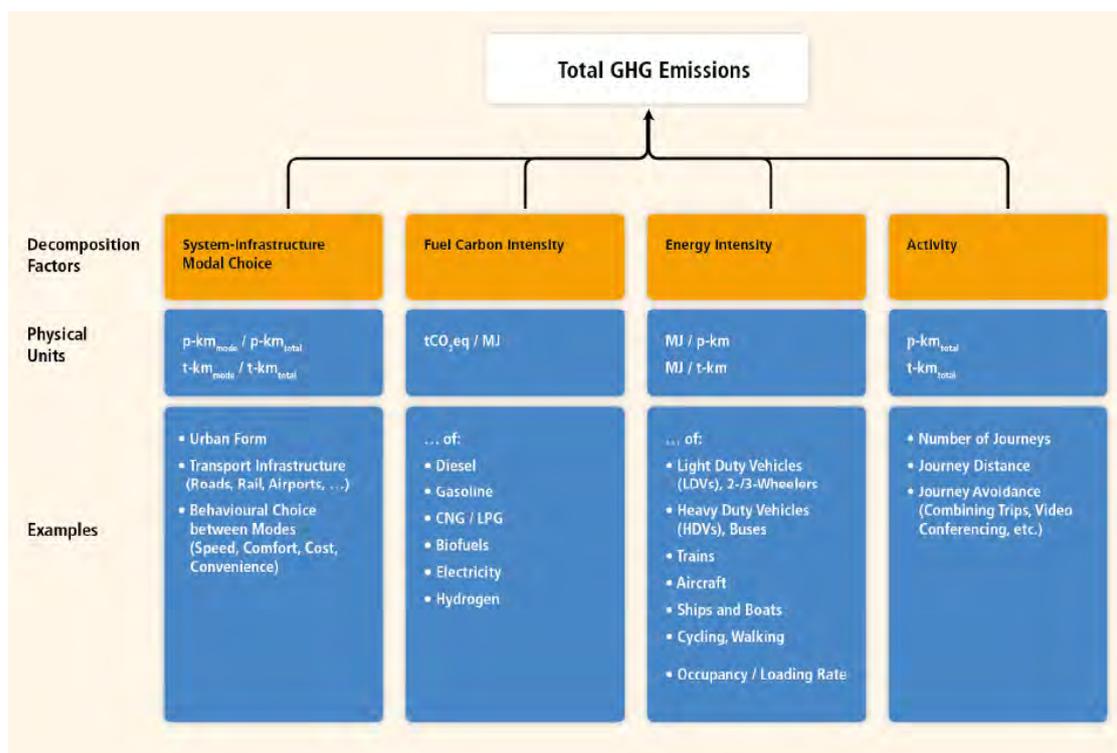


Fig. 3.2 - Approccio ASIF per la schematizzazione del processo delle emissioni del settore dei trasporti.

Nei paragrafi seguenti vengono analizzate le strategie per la mitigazione delle emissioni nei trasporti per ogni fattore ASIF, cercando di valutare gli effetti a breve e a lungo termine, i vincoli (comportamentali, economici, ecc.), i risvolti negativi e positivi in altri settori, la fattibilità economica; ove possibile si descriveranno esempi concreti di politiche adottate.

Si precisa che la linea di separazione tra i fattori sopracitati non è sempre ben definita: spesso, sono presenti forti correlazioni tra i vari ambiti, in particolare tra i primi due, ad esempio per le seguenti considerazioni:

- promuovere uno *shift* modale incentivando (o disincentivando) un modo di trasporto, significa ridurre (o aumentare) i costi generalizzati percepiti dall'utente. Dal punto di vista economico equivale a una traslazione verso il basso (o l'alto) della curva dell'offerta, da cui deriva un nuovo punto di equilibrio con un maggiore (o minore) volume totale di utenti;
- in genere, non si cerca una riduzione dell'attività totale per tutti i modi di trasporto, ma solo per quelli motorizzati o più inquinanti. In pratica, l'obiettivo di ridurre l'attività totale si configura come un *shift* modale verso i mezzi non motorizzati o

meno inquinanti. Fa eccezione il caso in cui lo spostamento venga sostituito da una telecomunicazione.

Di conseguenza è preferibile considerare congiuntamente questi due ambiti.

Si precisa che, in questa trattazione, quando si parla di soluzioni a “breve termine” o “lungo termine” non ci si riferisce a intervalli temporali ben determinati. La decisione di attuare strategie volte a ridurre le emissioni di gas serra è una questione politica, quindi i tempi per la loro realizzazione dipendono anche da una moltitudine di fattori di carattere non esclusivamente tecnico.

Semplicemente, per strategie a breve termine si intendono soluzioni realizzabili in un futuro prossimo, che portano ad una leggera limitazione delle emissioni, fino al 20-25%, e caratterizzate da costi (€/tCO₂ non emesse) contenuti. Soluzioni a lungo termine sono invece quelle che portano a una mitigazione delle emissioni molto spinta, oltre il 70-75%, in genere caratterizzate da costi molto alti o vincoli di altro genere (tecnologici, economici, comportamentali, urbanistici, ecc.) e per questo concretizzabili solo in tempi lunghi.

Come detto, ove possibile, si accennerà alla fattibilità economica; tuttavia l'analisi non entrerà troppo nel dettaglio con riferimento a questo aspetto in quanto, trattandosi di tecnologie emergenti, i costi non sono facilmente stimabili e possono variare in tempi brevi. Inoltre, nella valutazione della convenienza economica di strategie che, direttamente o indirettamente, portano a una riduzione del consumo del petrolio, incide necessariamente il prezzo del petrolio stesso.

Si tralascia l'analisi della tassazione del carburante come strategia per ridurre le emissioni di CO₂, in quanto il servizio di trasporto è storicamente caratterizzato da una forte inelasticità rispetto al prezzo del carburante. Tra il 2008 e il 2012, il valore dell'elasticità della domanda di benzina rispetto al prezzo è stato stimato tra -0.052³³. Stante un valore così basso di elasticità (in valore assoluto) si deduce che un intervento tariffario sulla benzina aumenterebbe gli introiti fiscali piuttosto che ridurre le emissioni di CO₂.

³³ Cynthia Lin, Lea Prince, (2013): *Gasoline Price Volatility and the Elasticity of Demand for Gasoline*, Energy Economics.

3.2 Strategie che incidono sull'impatto ambientale del sistema carburante-motore

Nello studio dell'impatto ambientale di un carburante (*fuel carbon intensity*) è fondamentale considerare le emissioni prodotte durante tutto il suo ciclo di vita (*life cycle analysis*, LCA). Ad esempio, l'idrogeno, che durante la combustione non produce CO₂, nell'intero ciclo di vita può causare emissioni anche 8 volte maggiori di quelle di un motore diesel ibrido alimentato esclusivamente da carburanti fossili³⁴.

Nel settore dei trasporti si fa riferimento ad una particolare *life cycle analysis* chiamata *well-to-wheel*, letteralmente “dal pozzo alla ruota”. Essa esprime gli impatti, o i costi sostenuti, totali (es. litri di carburante, energia consumata o gCO₂ emessi) in funzione dei benefici ottenuti (es. energia meccanica sviluppata, km percorsi) o viceversa. Tale LCA può essere scomposta in due componenti: *well-to-tank*, letteralmente dal “pozzo alla tanica”, relativo a costi o impatti della produzione del carburante, e *tank-to-wheel*, letteralmente dalla “tanica alla ruota”, relativo ai costi o impatti del veicolo. Le analisi *well-to-wheel* più diffuse sono: il rapporto emissioni di CO₂ per km percorso, nel contesto di analisi di tipo ambientale, e il rapporto tra energia meccanica prodotta e quella complessivamente consumata, nel contesto di analisi di tipo energetico. Per tale motivo risulta spesso più conveniente analizzare il sistema carburante-motore nel suo complesso, piuttosto che carburante e veicolo indipendentemente come proposto dall'approccio ASIF.

Si presentano di seguito alcune strategie adottabili per migliorare l'impatto ambientale dei carburanti e dei sistemi di propulsione dei veicoli.

Carburanti alternativi: biocarburanti

I biocarburanti sono combustibili ottenuti dalle biomasse e possono essere utilizzati in alternativa a benzina, gasolio e gas naturale; le loro emissioni, considerando tutto il ciclo di vita, sono molte basse in quanto corrispondono, in parte, all'anidride carbonica assorbita dalle biomasse durante il loro ciclo vitale. Il loro utilizzo non trova ancora applicazione in quanto i costi di produzione risultano più onerosi rispetto all'estrazione dei carburanti fossili.

³⁴ Robert Salter, Subash Dhar, Peter Newman (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

Esiste comunque una nicchia di mercato, in crescita esponenziale (fig. 3.3³⁵), che corrisponde a circa il 3% della produzione mondiale di carburanti liquidi.

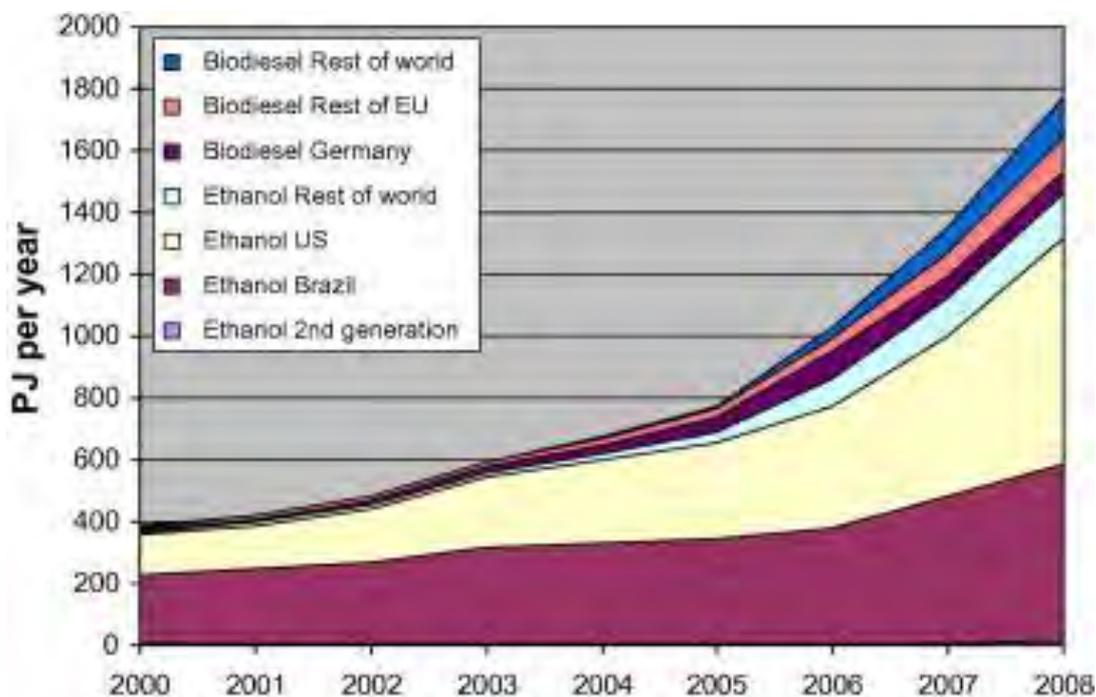


Fig. 3.3 - Andamento della produzione mondiale di biocarburante tra l'anno 2000 e l'anno 2008.

Da sottolineare che mentre il prezzo del petrolio tenderà in futuro ad aumentare, trattandosi di un carburante fossile e quindi destinato all'esaurimento, i biocarburanti diventeranno sempre più competitivi sul mercato, grazie all'interesse mondiale verso questi combustibili e, quindi, alla ricerca. L'interesse nasce da una duplice considerazione: l'uso dei biocarburanti comporta, oltre a una riduzione delle emissioni di CO₂, una minor dipendenza dal petrolio, obiettivo strategico per molti paesi. In più i biocarburanti trovano un utilizzo possibile in tutti i settori dei trasporti e, nel lungo termine, in particolare e soprattutto nel settore aereo³⁶.

I biocarburanti più diffusi sono:

- Etanolo: biocarburante alternativo alla benzina. Si afferma come il biocombustibile più prodotto. Aggiunto alla benzina di origine fossile prende il nome di E20, E85, ecc. (in base alla percentuale di etanolo: 20%, 85%, ecc.);

³⁵ Ralph E.H. Simsa, Warren Mabee, Jack N. Saddler, Michael Taylor (2010), *An overview of second generation biofuel technologies*, Bioresource Technology.

³⁶ IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

- Biodiesel: biocarburante alternativo al gasolio. Aggiunto al gasolio di origine fossile prende il nome di B20, B50, ecc. (in base alla percentuale di biodiesel: 20%, 50%, ecc.);
- Biogas: formato principalmente da metano;
- Etere dimetilico (DME): biocarburante alternativo al GPL;
- Metanolo: biocarburante alternativo, in alcuni casi, alla benzina.

I meccanismi di produzione attuali dei biocarburanti si possono ricondurre a due distinte generazioni (fig. 3.4³⁷): la prima basata su prodotti usati anche nel campo alimentare, come canna da zucchero, grano e oli vegetali, la seconda basata su prodotti contenenti cellulosa, emicellulosa e lignina, quindi legname, scarti di segheria o di cartiera come la liscivia nera (*black liquor*), paglia, bagassa, ecc.

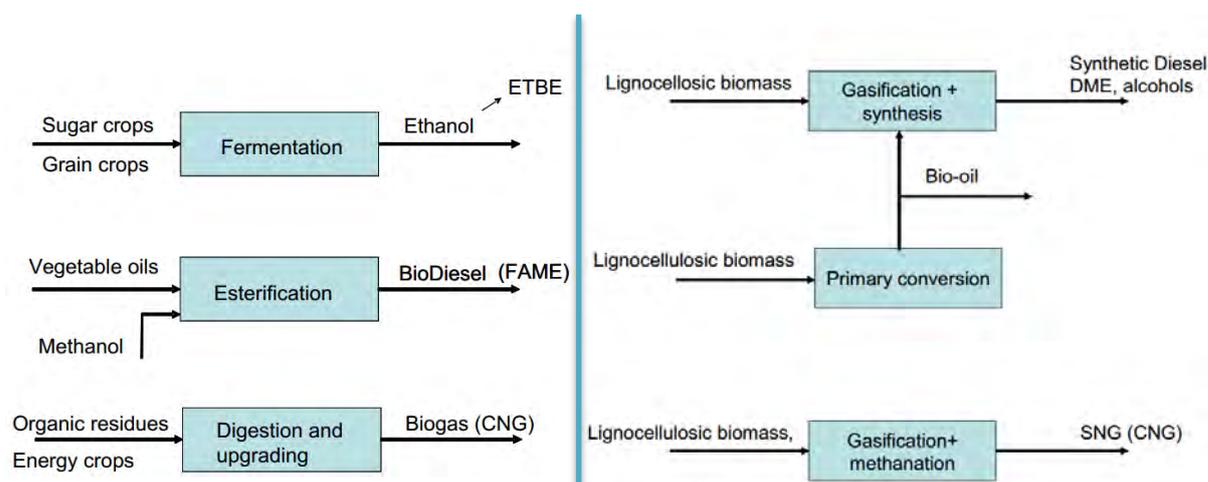


Fig. 3.4 - Meccanismi di produzione di biocarburanti, di prima (a sinistra) e seconda (a destra) generazione.

La produzione di seconda generazione, sviluppata di recente e in via di applicazione, offre due grandi vantaggi. Il primo consta in una maggiore riduzione delle emissioni di CO₂ durante il ciclo di vita *well-to-wheel*: si arriva a valori tra il 60 e il 120%³⁸ in meno rispetto all'uso di gasolio e benzina, come da fig. 3.5³⁹;

³⁷ Biofuels Research Advisory Council (2006) *Biofuels in the European Union: a Vision for 2030 and Beyond*, disponibile sul sito http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/draft_vision_report_en.pdf

³⁸ Valori maggiori del 100% potrebbero essere giustificati ipotizzando che, nei 60 studi considerati nel grafico, non siano state usate le medesime modalità di analisi.

³⁹ Anselm Eisentraut (2010), *Sustainable Production of Second-Generation Biofuels: Potential and perspectives in major economies and developing countries*, International Energy Agency (IEA)

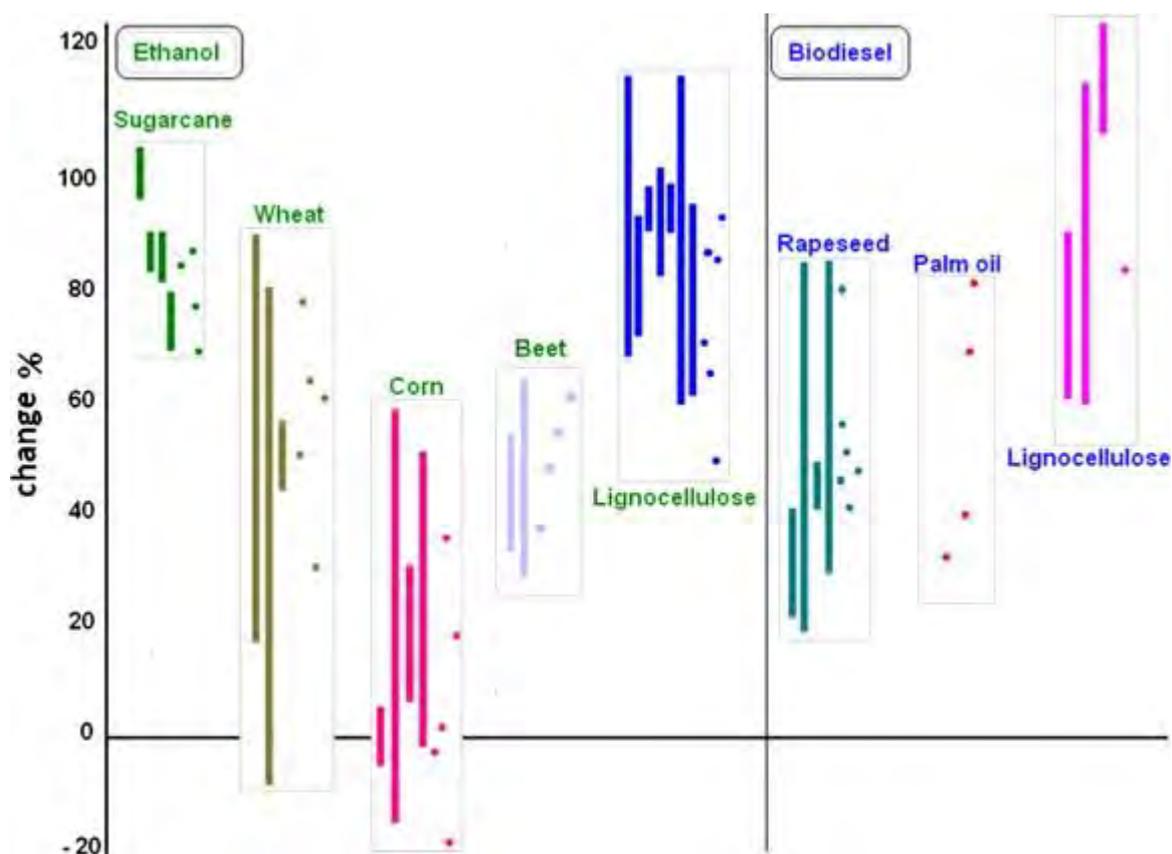


Fig. 3.5 - Grafico che riporta in ordinata la percentuale di riduzione delle emissioni di CO₂ durante il ciclo di vita *well-to-wheel* di etanolo e biodiesel, in base alle materie prime utilizzate, rispetto all'impatto di gasolio o benzina (in ascissa non è presente nessuna variabile; i punti e le linee sono i dati e gli intervalli di confidenza dei valori ottenuti da oltre 60 studi in questo ambito).

Il secondo vantaggio è di carattere sociale: la produzione di seconda generazione, non essendo basata su prodotti alimentari, non incide sul prezzo del cibo nel mercato globale, con indubbi benefici per le popolazioni degli stati del terzo mondo.

La terza generazione di biocombustibili sarà, secondo alcuni studi, legata allo sfruttamento di micro-alghe. Queste, oltre ad essere gli organismi più efficienti della Terra nel processo della fotosintesi, producono grandi quantità di lipidi. In alcune specie la percentuale di grassi può raggiungere il 60% del peso corporeo⁴⁰. Inoltre, esse hanno mostrato grande capacità di adattamento e di crescita: riescono a vivere anche in habitat inquinati e sono in grado di raddoppiare la loro massa in meno di 24 ore⁴¹. A parità di area

⁴⁰ Christi, Y. (2007), *Biodiesel from Microalgae*, Biotechnology Advances, Vol. 25.

⁴¹ Ibidem.

utilizzata, le alghe producono una quantità di energia 30-100 volte maggiore⁴² rispetto alle piante terrestri. Con queste caratteristiche si potrebbe avere un biocarburante, e quindi una fonte di energia, rinnovabile, eco-sostenibile e che non comporta uso di suolo terrestre.

Veicoli elettrici autoalimentati, ibridi, a fuel cell

Di seguito si presentano le caratteristiche di veicoli elettrici autoalimentati, ibridi ed a *fuel cell*, con particolare riferimento ai veicoli stradali, nonostante esistano applicazioni anche in ambito ferroviario e navale.

Veicoli elettrici: dal punto di vista ambientale offrono l'indubbio vantaggio di non emettere CO₂ durante il funzionamento. Ovviamente nella centrale la produzione di energia elettrica comporta emissioni di anidride carbonica, ma in misura ridotta rispetto ad un motore termico, essendo il processo ottimizzato a livello energetico. Inoltre, spostare il problema delle emissioni dal veicolo alla centrale elettrica permette soluzioni altrimenti non realizzabili, quali l'utilizzo di energia nucleare, eolica, idroelettrica e solare o anche prodotta da centrali termoelettriche con sistema di captazione della CO₂ e successivo stoccaggio nel sottosuolo o in fondo al mare (fig. 3.6)⁴³.

⁴² Ayhan Demirbas, (2010) *Use of algae as biofuel sources*, Energy Conversion and Management.

⁴³ Howard Herzog, Baldur Eliasson and Olav Kaarstad, (2000) *Capturing Greenhouse Gases*, Scientific American.

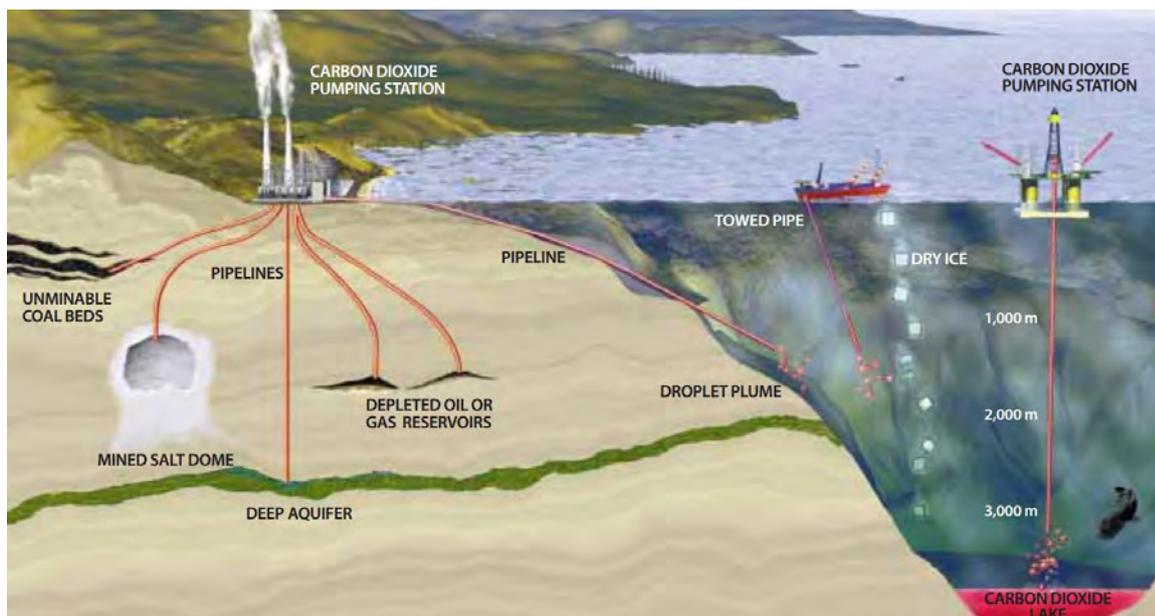


Fig. 3.6 - Esempi di stoccaggio nel sottosuolo di CO₂ ad alta pressione o allo stato liquido in fondo al mare.

I vantaggi del veicolo elettrico sono la possibilità di recuperare energia in frenata, l'assenza di marce e frizione e le elevate prestazioni a basse velocità. D'altro lato, l'autonomia esigua, i tempi di ricarica molto lunghi e la velocità massima ridotta limitano l'uso di questo sistema di propulsione esclusivamente all'ambito urbano.

Veicoli ibridi: rappresentano un'ottima alternativa ai veicoli stradali tradizionali in quanto i consumi e le emissioni risultano notevolmente ridotti. Sono dotati di 2 motori, uno elettrico e uno a combustione interna. L'accoppiamento dei due motori può essere in serie, in parallelo (fig. 3.7)⁴⁴ o in configurazione mista (serie-parallelo).

⁴⁴ Antti Lajunen (2013), *Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies.

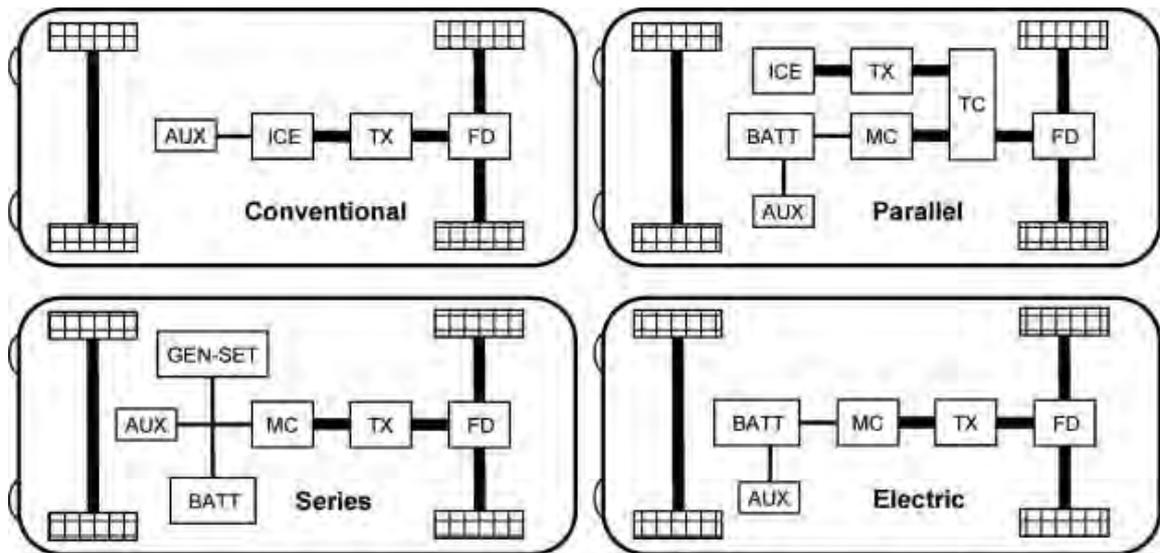


Fig. 3.7 - Rappresentazione dei veicoli: convenzionale, ibrido in parallelo, ibrido in serie ed elettrico. Legenda: ICE, motore a combustione interna; TX, trasmissione; FD, avantreno; AUX, dispositivo di accumulo/serbatoio; TC, differenziale; MC, motore elettrico; BATT, batteria; GEN-SET, generatore.

Nei veicoli ibridi in serie, di limitata applicazione, il motore a combustione interna non è collegato alle ruote e ha l'esclusiva funzione di generatore di energia elettrica; può così lavorare a regimi ottimali con rendimento massimo. Tale tecnologia non è adatta all'ambito extra-urbano in quanto, se il veicolo deve percorrere lunghe tratte ad alta velocità (es. in autostrada), molta energia viene persa nella doppia trasformazione meccanica-elettrica-meccanica.

I veicoli ibridi in parallelo, hanno entrambi i motori collegati alle ruote. In base all'uso viene utilizzato il motore più idoneo alla marcia. Nei percorsi con caratteristiche urbane (molti *stop-and-go* e velocità ridotte) è impiegato prevalentemente il motore elettrico; quando invece si percorrono lunghi tratti a velocità sostenute viene usato principalmente il motore termico. Inoltre, durante la marcia, il motore elettrico "assiste" il motore termico, fornendo potenza quando richiesta o, se in eccesso, ricaricando le batterie⁴⁵. Il costo di questa tipologia è contenuto in quanto il motore elettrico viene dimensionato solo per potenze ridotte.

Esistono diverse tipologie di ibridazione serie-parallelo, spesso caratterizzate da una struttura complessa e, a volte, coperta da brevetto. Tale configurazione è quella più diffusa

⁴⁵ Federico Fabian (Silverio Bolognani), *Studio e Sperimentazione di Convertitori e Controlli per Azionamenti di Veicoli Ibridi*, Tesi di laurea, Anno Accademico 2009-2010, Laurea Specialistica in Ingegneria Elettronica, Università degli Studi di Padova.

sul mercato, un esempio ne è il *Toyota Hybrid System* (THS), implementato nella Toyota Prius.

Un particolare tipo di veicolo ibrido, non supportato da motore elettrico, è il *Hydraulic Hybrid Vehicle* (HHV, in italiano “veicolo ibrido idraulico”). Il veicolo (fig. 3.8) è dotato di un motore a combustione interna e di due serbatoi contenenti acqua e azoto, usati come accumulatori di energia, collegati tramite una pompa motore idraulica (*hydraulic pump/motor*). Grazie a questi, è in grado di immagazzinare energia durante la frenata, sotto forma di pressione in uno dei due serbatoi, e di usarla successivamente durante l’accelerazione. Questa tipologia è in grado di avere un’efficienza *wheel-to-wheel*, letteralmente “dalla ruota alla ruota” (parametro che stima la capacità di immagazzinare e riutilizzare energia meccanica) anche oltre il 70%⁴⁶, contro circa il 40% dei motori ibridi convenzionali.

Il vantaggio di immagazzinare energia in tale modo è duplice: l’incremento di costo dell’ibridazione idraulica è minore rispetto al sistema ibrido elettrico, inoltre la quantità di energia immagazzinabile per unità di peso è maggiore di qualsiasi altro sistema ibrido.

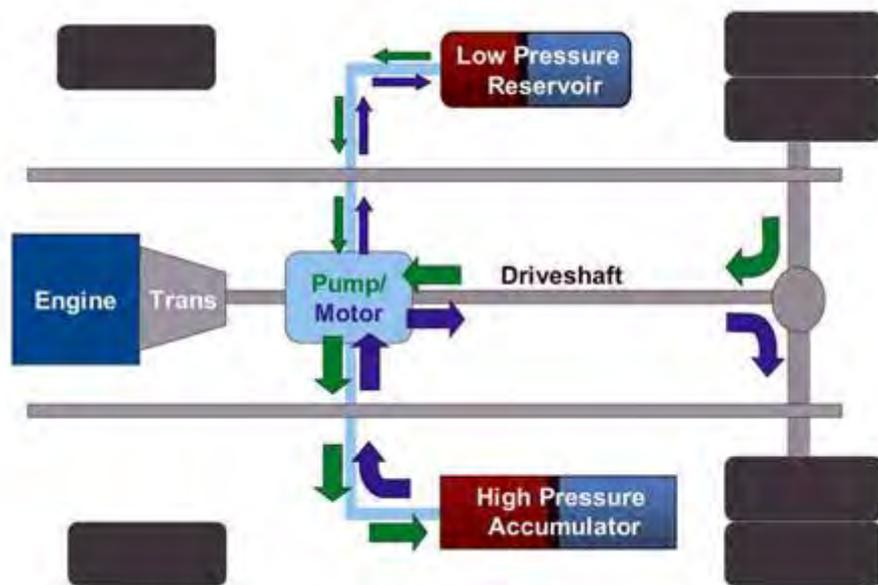


Fig. 3.8 - Schema di funzionamento di un *Hydraulic Hybrid Vehicle*.

⁴⁶ Amin Mohaghegh Motlagh, Mohammad Abuhaiba, Mohammad H. Elahinia, and Walter W. Olson (2008), *Hydraulic Hybrid Vehicles*, Environmentally Conscious Transportation.

Veicoli a fuel cell FCEV (*fuel cell electric vehicle*): sono dotati di una “cella a combustibile”, schematizzata in fig. 3.9⁴⁷, grazie alla quale è possibile produrre direttamente energia elettrica tramite l’ossidazione del carburante, in genere idrogeno, senza passare attraverso la conversione intermedia in energia meccanica. È possibile l’impiego di altri carburanti purché abbiano un alto contenuto di idrogeno, come, ad esempio, il metanolo. L’impatto di questa tecnologia è unicamente legato ai modi di produzione del carburante (processo chimico, elettrolisi o termolisi) e di stoccaggio (liquido o compresso).

Dotando un veicolo a *fuel cell* di accumulatore di energia elettrica si ottiene il veicolo ibrido a *fuel cell*, HFCV (*hybrid fuel electric vehicle*) con un’ulteriore riduzione dei consumi e massimizzazione dell’efficienza.

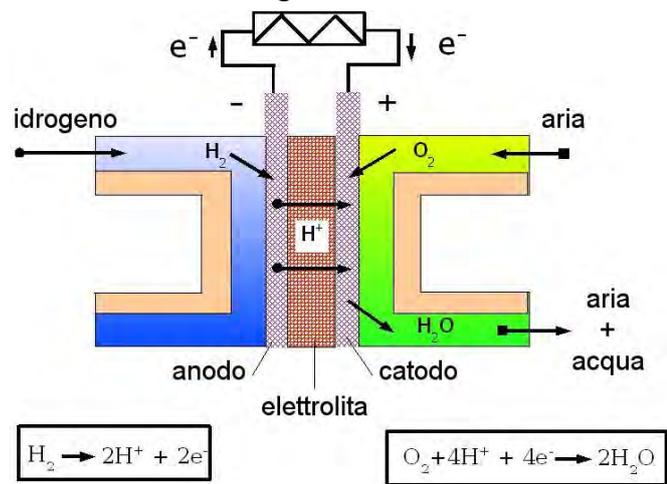


Fig. 3.9 - Schema di funzionamento di una *fuel cell*.

⁴⁷ www.wikipedia.it

In fig. 3.10⁴⁸ si mostra l’impatto ambientale, nel ciclo di vita *well-to-wheel*, di vari sistemi di propulsione, in termini relativi rispetto alle emissioni causate da un veicolo tradizionale a benzina.

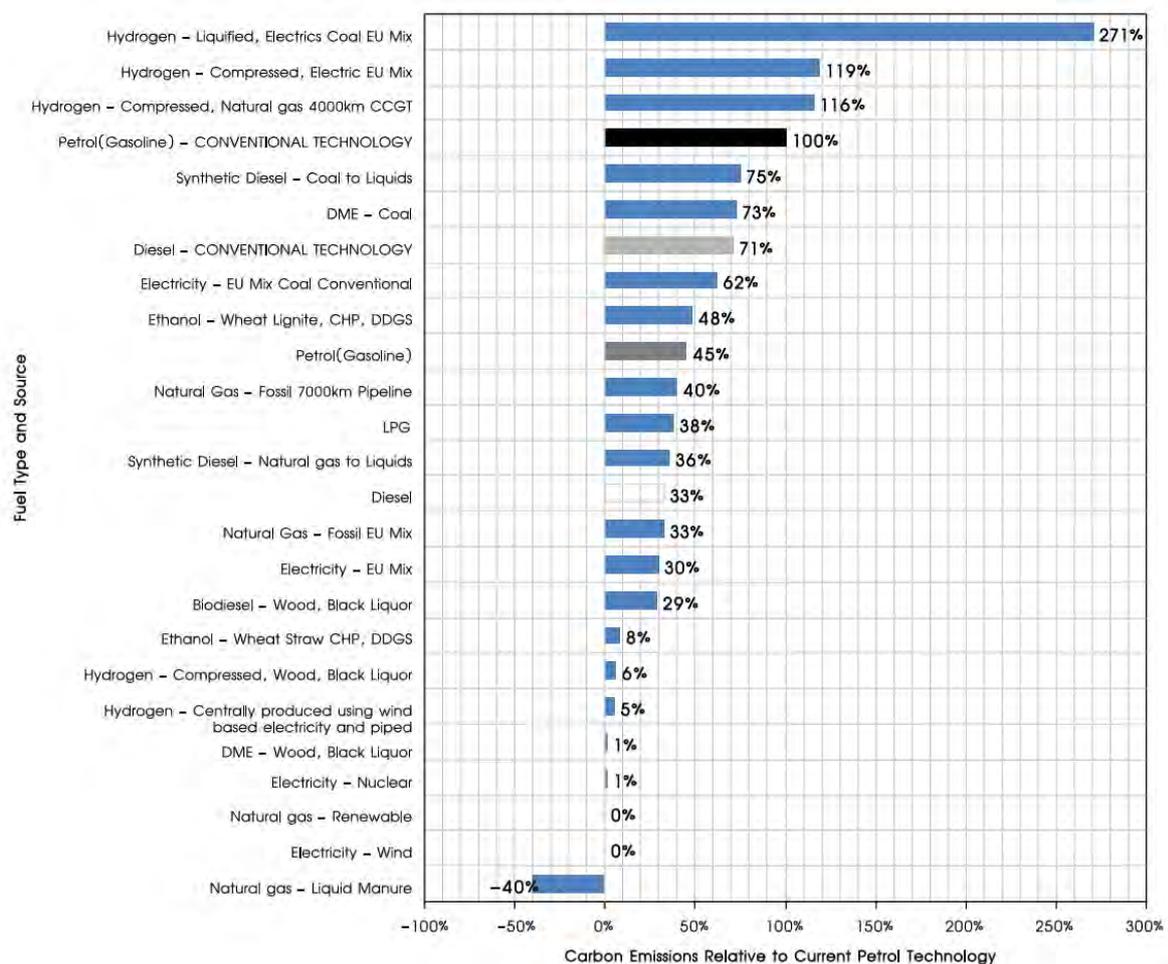


Fig. 3.10 - Impatto ambientale *well-to-wheel* di vari sistemi di propulsione, in termini relativi rispetto alle emissioni causate da un veicolo tradizionale a benzina; (“*Diesel*” e “*Petrol*” si riferiscono a sistemi ibridi, “*EU mix*” in riferimento alla situazione attuale in UE, “*CCGT*” a turbine a gas a ciclo combinato, “*CHP,DDGS*” a processi energetici per l’ottimizzazione degli stessi).

Si noti che l’impatto di un veicolo tradizionale a benzina rispetto a uno ibrido diesel è tre volte maggiore. Quest’ultimo ha impatti simili ad un veicolo a metano o ad un veicolo elettrico (nella situazione energetica attuale in UE).

⁴⁸ Robert Salter, Subash Dhar, Peter Newman (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

Da rilevare inoltre che i dati relativi ai biodiesel di seconda generazione riportati nel grafico in fig. 3.10 non sono aggiornati alla situazione odierna.

L'impatto, minore di zero, del gas naturale estratto da liquami di origine animale è giustificabile in quanto il metano, emesso dalla decomposizione/macerazione dei liquami, impatta più dell'anidride carbonica emessa in seguito alla combustione dello stesso.

La differenza di impatto dipende dall'orizzonte temporale; tuttavia, anche valutando un orizzonte temporale di 100 anni, si ha un $GTP_{CH_4}^{100\text{ anni}} = 4$, per cui si ottiene:

$$1 \text{ mole di } CH_4 \approx 16 \text{ g di } CH_4 \rightarrow 64 \text{ gCO}_2\text{eq}$$

$$1 \text{ mole di } CH_4 \rightarrow \text{combustione} \rightarrow 1 \text{ mole } CO_2 \approx 44 \text{ g di } CO_2 \rightarrow 44 \text{ gCO}_2\text{eq}$$

In tale orizzonte temporale l'impatto è di circa il 31% in meno. Tuttavia per gli alti costi e i bassi rendimenti lo sfruttamento di liquami risulta di difficile applicazione.

I motori ibridi possono essere considerati una buona soluzione nel medio termine, in quanto non richiedono interventi infrastrutturali, quali impianti di distribuzione capillare di elettricità e carburante, necessari invece, per veicoli elettrici o a *fuel cell*. Inoltre, una parte dell'investimento iniziale viene recuperato grazie a una riduzione dei consumi.

Importanti vincoli tecnologici sono invece presenti nelle alimentazioni a idrogeno o puramente elettriche, in particolare

per lo stoccaggio del carburante. La pesantezza (tab. 3.2⁴⁹) e il costo delle batterie così come la pericolosità e l'ingombro dell'idrogeno, insieme alla mancanza di una rete capillare di distribuzione, fanno sì che l'affermazione di queste tecnologie possa avvenire solo nel lungo termine.

Carburante	Contenuto relativo di energia per unità di peso (benzina=1)
Diesel	1,20
Benzina	1,00
GPL	0,73
Metano	0,38
Idrogeno compresso	0,09
Energia elettrica	0,02

Tab. 3.2 - Contenuto relativo di energia per unità di peso di alcuni carburanti, tenendo conto del peso del serbatoio.

⁴⁹ Ibidem

3.3 Strategie per migliorare l'efficienza energetica dei veicoli

Le strategie che promettono i maggior risultati nella mitigazione delle emissioni entro il 2050 sono quelle volte a migliorare l'efficienza energetica dei veicoli⁵⁰. Questo obiettivo, perseguito già da anni con l'intento di minimizzare i costi di trasporto, trova, oggi, una seconda finalità: limitare le emissioni di CO₂.

Si precisa che una riduzione dei consumi in un veicolo potrebbe non corrispondere ad una egual riduzione delle emissioni di CO₂. Tuttavia tale parametro risulta essere un ottimo indicatore: approssima con buona precisione la riduzione delle emissioni, è frequentemente utilizzato visto l'alto interesse economico correlato ed è semplice da misurare. A titolo di esempio, si mostrano in fig. 3.11⁵¹ i valori empirici di emissioni di CO₂ per km in relazione all'efficienza energetica, espressa in km/l, di cinque veicoli in diverse tipologie di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale, ecc.). Tali dati sono ottenuti da uno studio per la validazione di un modello implementato in un software. Si noti, al di là dell'interpolazione parabolica effettuata dal modello, la proporzionalità inversa tra efficienza energetica ed emissioni di CO₂.

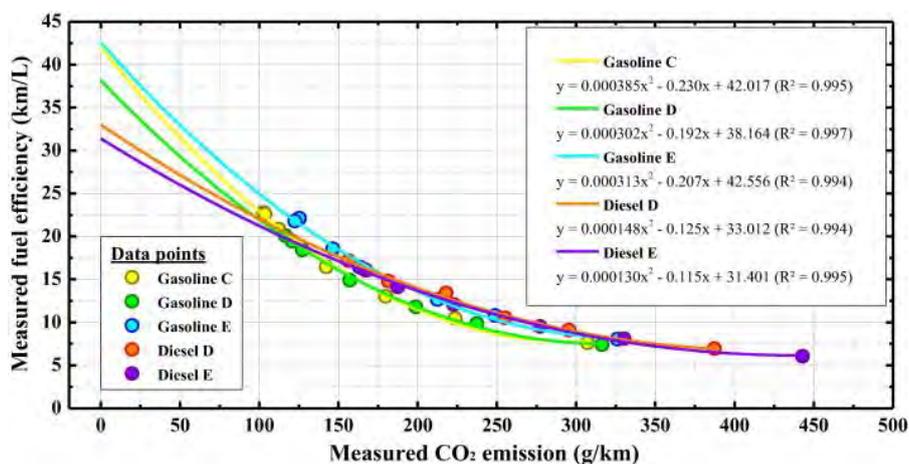


Fig. 3.11 - Relazione empirica tra emissioni di CO₂ e efficienza energetica di 5 veicoli, in diverse tipologie di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale, ecc.)

⁵⁰ IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

⁵¹ Yunjung Oh, Junhong Park, Jongtae Lee, Myung Do Eom, Sungwook Park, (2014) *Modeling effects of vehicle specifications on fuel economy based on engine fuel consumption map and vehicle dynamics*, Transportation Research Part D: Transport and Environment.

Si presentano di seguito alcune strategie per migliorare l'efficienza energetica dei veicoli nei principali modi di trasporto.

Settore stradale: trasporto individuale di persone (automobili)

Come si può vedere in fig. 3.12⁵², le emissioni medie di CO₂/km delle auto vendute in tutti i paesi considerati sono calate in modo pressoché continuo, trend che proseguirà anche nei prossimi anni, sia per le politiche ambientali adottate sia per le scelte industriali delle case automobilistiche.

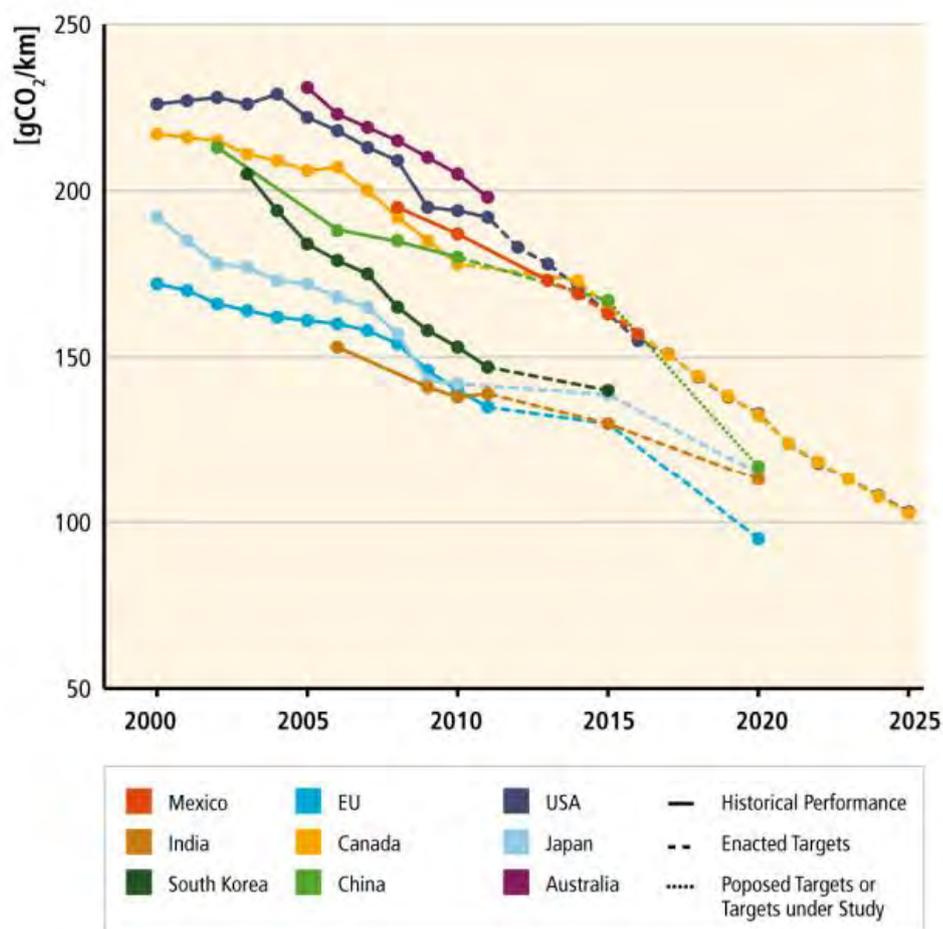


Fig. 3.12 - Serie storiche e previsioni delle emissioni medie delle auto vendute, in alcuni paesi.

⁵² IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, Cambridge University Press.

Nel caso dell'automobile, alcune delle principali soluzioni⁵³ per aumentarne l'efficienza sono analizzate nei punti seguenti:

- L'utilizzo di pneumatici a bassa resistenza di rotolamento (*low-rolling resistance*, LRR) e di sistemi di controllo della pressione porterebbe a un incremento dell'efficienza globale attorno al 5%; il costo stimato per queste tecnologie è attorno ai 40-70 \$ per auto.
- La diminuzione del 25% del peso di un'auto porterebbe a un risparmio di carburante di circa il 15% (10% nel caso di un veicolo ibrido). Raggiungere quest'obiettivo utilizzando l'alluminio avrebbe un costo di circa 1200-1500\$ per auto.
- La riduzione del 15% del coefficiente aerodinamico di un'auto può migliorarne l'efficienza del 3%. Mediamente tale coefficiente si attesta attorno allo 0,30-0,35.
- Un aumento dell'isolamento termico dell'auto e l'adozione di sistemi di condizionamento più efficienti possono aumentare l'efficienza totale del 3-4%; tale incremento dipende comunque dalle condizioni climatiche. In veicoli piccoli ed efficienti l'uso del climatizzatore può raddoppiare i consumi⁵⁴; tale problema è presente in particolare nelle auto elettriche, dove l'uso del climatizzatore riduce sensibilmente l'autonomia, peraltro già esigua.

In conclusione si può ottenere un miglioramento dell'efficienza del veicolo pari a circa il 25%, ricorrendo a soluzioni esistenti e dal costo relativamente contenuto.

Le strategie atte a migliorare l'efficienza energetica delle automobili si pongono quindi come soluzioni per il breve termine;

Secondo l'approccio ASIF, in questo ambito rientrano anche le strategie indirizzate all'aumento del coefficiente medio di occupazione come carpooling, corsie HOV, ecc., dove l'efficienza energetica è espressa in MJ/p·km.

La soluzione che promette migliori risultati nel breve termine è il carpooling dinamico. L'azienda *Carpooling.com* dichiara che tra il 2008 e il 2011 sono state evitate emissioni pari

⁵³ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.

⁵⁴ C. Malvicino and R. Saccardin (2009), B-COOL Project-Ford Ka and Fiat Panda R-744 MAC Systems, Centro Ricerche Fiat S.C.p.A.

a 630'000 tCO₂⁵⁵ grazie al *ride sharing* promosso dall'azienda stessa. La società *Blablacar* afferma di aver reso possibile la condivisione di circa 2 miliardi di passeggeri-km determinando un risparmio di 700'000 tCO₂⁵⁶. Tali valori, per quanto non del tutto attendibili⁵⁷, richiamano comunque l'attenzione su un modo di spostamento che permette una riduzione delle emissioni di gas serra con costi molto contenuti, riducendo anche traffico e consumi.

Trasporto terrestre di merci

Come si è visto anche nelle figure 2.7 e 2.17, il trasporto merci su gomma è caratterizzato da emissioni, espresse in gCO₂/t-km, molto elevate, in particolare se confrontate con quelle su ferro. La fig. 3.13 evidenzia tale differenza dal punto di vista energetico, in MJ/t-km, in vari paesi o continenti.

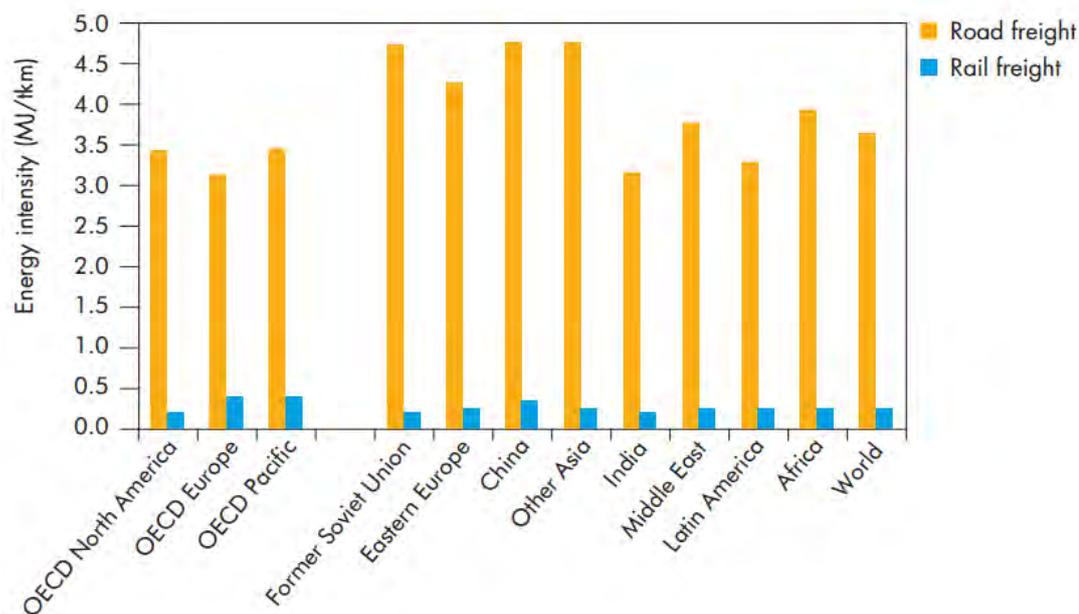


Fig. 3.13 - Grafico raffigurante l'efficienza energetica del trasporto merci stradale e ferroviario in vari paesi o continenti.

⁵⁵ http://www.carpooling.co.uk/press_news/view/408

⁵⁶ <http://www.blablacar.com/blog/blablacar-about>

⁵⁷ Due miliardi di p-km che viaggiano nel settore stradale producono mediamente poco meno di 300'000 tCO₂, 350'000 se viaggiano da soli in auto (175g/km mediamente per un'auto venduta nel 2000 in UE). Considerando che spesso il carpooling dinamico si pone come alternativa al trasporto pubblico, le emissioni risultano attorno alle 150'000 tCO₂. Inoltre, in assenza di carpooling, una frazione di questi spostamenti non avrebbe luogo in quanto qualsiasi alternativa comporterebbe un maggior costo; si può quindi facilmente dedurre che, per quanto il dato di 2 miliardi di p-km possa essere vero, il valore di 700'000 tCO₂ risulterebbe sovrastimato.

È necessario analizzare le strategie di aumento dell'efficienza energetica dei veicoli stradali pesanti e dei furgoni in quanto rappresentano, in alcune situazioni, veicoli insostituibili per la loro flessibilità e capacità di penetrazione nel territorio. Le principali soluzioni⁵⁸ sono analizzate nei punti seguenti:

- Utilizzare veicoli ibridi offre vantaggi soprattutto per i furgoni che si spostano in ambito urbano, in quanto l'efficienza aumenterebbe del 25-30%. I veicoli pesanti ibridi permettono un risparmio dei consumi, al più, del 5-7%. Sono possibili maggiori margini di miglioramento per i veicoli usati nelle aree in cui ci sono brevi spostamenti di grandi quantità di merci, ovvero dove lo spostamento è caratterizzato da molti *stop-and-go*, per esempio nei porti. Un sostanziale aumento dell'efficienza nel settore stradale del trasporto merci, su scala urbana, si potrebbe avere con veicoli ibridi idraulici (HHV). L'azienda UPS tra il 2009 e il 2010 ha dotato la sua flotta commerciale di 7 HHV e, dopo un periodo di valutazione di 18 mesi, ha dichiarato un miglioramento nell'efficienza del 45-50% rispetto ad un veicolo di tipologia convenzionale.
- Sensibili miglioramenti sono possibili anche intervenendo sull'aerodinamicità dei veicoli. Ricorrere a profili a goccia (*teardrop trailer*, fig.3.14⁵⁹) o applicare "boat tails" dietro al rimorchio (fig. 3.15⁶⁰) può aumentare l'efficienza energetica del 10% in ognuna delle due situazioni. Nonostante il costo davvero contenuto, tali soluzioni non vengono applicate per i limiti di sagoma del veicolo imposti dalle normative vigenti e comunque per non perdere volume di carico.



Fig. 3.14 - Profilo a goccia, *teardrop trailer*.

⁵⁸ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.

⁵⁹ Sunzu.com

⁶⁰ <http://cantruck.ca/>



Fig. 3.15 - Esempio di “boat tails”.

- Utilizzare pneumatici a bassa resistenza di rotolamento e sistemi di controllo della pressione aumenterebbe l'efficienza del 4-8%.
- Corsi di formazione per una guida più attenta ai consumi (*eco-driving*) incidono positivamente sull'efficienza energetica. Tredici aziende di trasporti che hanno partecipato al *Eco-driving Management System*, programma giapponese che mira ad una minimizzazione dei consumi attraverso la formazione del personale e, secondariamente, con l'installazione di dispositivi di supporto all'*eco-driving*, hanno rilevato una riduzione media delle emissioni di CO₂ dell'8% con un massimo del 20%⁶¹.
- Per ridurre le emissioni totali del trasporto merci su gomma, occorre limitare quanto più possibile gli spostamenti senza carico, che, a livello europeo, coprono mediamente il 25% dei chilometri percorsi.

Si tralascia l'analisi di strategie volte al miglioramento dell'efficienza del trasporto su ferro in quanto il treno rappresenta già il mezzo di trasporto terrestre con il minor impatto ambientale. L'elevato rendimento dei motori elettrici, la ridotta resistenza aerea e al rotolamento non consentono significativi margini di miglioramento nell'efficienza energetica.

⁶¹ Takao Onoda and Thomas Gueret, (2007) *Fuel Efficient Road Vehicle Non-Engine Components: Potential Savings and Policy Recommendations*, International Energy Agency.

Trasporto collettivo terrestre

Da un'analisi condotta in 84 città di tutto il mondo (tab. 3.3⁶²) risulta che il trasporto su ferro consuma (MJ/p·km) mediamente circa la metà del trasporto collettivo su gomma e addirittura meno di un quarto rispetto all'automobile.

Mode	Energy Efficiency (MJ per pass.km)
Car	2.45
Bus	1.05
Metro	0.46
Suburban Rail	0.61
Light Rail	0.56
Tram	0.52

Tab. 3.3 - Efficienza energetica media di vari modi di trasporto, sulla base di dati rilevati in 84 città di tutto il mondo.

Il fattore che *in primis* determina la quantità di energia consumata per passeggero-chilometro nel trasporto collettivo è il coefficiente di utilizzazione del mezzo, che dipende in maggior parte dalla realtà socio-economica. Per esempio, il sistema metropolitano di alcune città cinesi consuma circa 0,05 MJ/p·km. Negli Stati Uniti la metro consuma mediamente 33 volte di più⁶³, ossia 1,65 MJ/p·km. L'elevata efficienza delle metropolitane cinesi è principalmente dovuta all'eccezionale livello di occupazione. Risulta quindi evidente che i margini di miglioramento dell'efficienza non risiedono tanto nelle caratteristiche del veicolo, quanto nel coefficiente di occupazione medio.

Per aumentare il coefficiente di occupazione medio nel trasporto pubblico, nella maggior parte dei casi, si fa riferimento a strategie atte a incentivare lo *shift* modale, analizzate nel capitolo seguente.

L'efficienza energetica dei bus può essere migliorata incidendo soprattutto sul sistema di propulsione. Sistemi ibridi diesel-elettrico o idraulici HHV e una riduzione del peso complessivo del mezzo, offrono buone possibilità di aumento dell'efficienza in percorsi urbani. Profili aerodinamici a goccia ridurrebbero ulteriormente i consumi in particolare per i pullman usati su tratte extraurbane.

⁶² Robert Salter, Subash Dhar, Peter Newman (2011), Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector, TNA Guidebook Series.

⁶³ Ibidem.

Per quanto attiene al trasporto su ferro vedasi quanto già espresso nel caso di trasporto terrestre di merci.

Trasporto aereo

Per le particolari condizioni in cui gli aerei viaggiano, ad esempio di pressione e di temperatura, e per le esigenze di leggerezza e di sicurezza, necessarie in questo settore, sistemi alternativi di propulsione (es. motori elettrici o a idrogeno) difficilmente trovano applicazione. Per tali motivi, nel trasporto aereo, una diminuzione delle emissioni equivale a miglior efficienza energetica, realizzabile con una ottimizzazione del sistema di propulsione e riducendo le resistenze al moto. Un aereo costruito oggi è mediamente più efficiente del 70% di un aereo costruito 50 anni fa⁶⁴; ciononostante i margini di miglioramento sono ancora consistenti, secondo la IEA anche del 40% entro il 2050⁶⁵.

Un maggiore rendimento si ottiene utilizzando motori a rotore aperto (*open rotor engine*, fig. 3.16⁶⁶): il progetto, sviluppato circa 25 anni fa, non ha trovato applicazione commerciale perché economicamente poco interessante, dato il basso costo del carburante in quel periodo. L'efficienza meccanica di questi motori può superare il 90%⁶⁷, contro il 75-80% degli attuali *turbofan*. D'altra parte, l'alto coefficiente di drag ed il peso considerevole restringono l'applicabilità di questa tecnologia agli aerei che effettuano tratte di breve-media lunghezza; in aggiunta l'inquinamento acustico dei motori a rotore aperto è sensibilmente maggiore.

⁶⁴ IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Working Group III, (2007) *Climate Change 2007: Mitigation*, Cambridge University Press and New York, IPCC paper.

⁶⁵ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.

⁶⁶ <http://cafefoundation.org/>

⁶⁷ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.



Fig. 3.16 - Esempio di motore a rotore aperto.

Un aumento dell'efficienza aerodinamica (rapporto tra portanza e resistenza) si potrebbe ottenere ricorrendo ad aerei *Blended Wing Body*, BWB (letteralmente “a fusoliera e ali mescolate”), tipologia di aereo in cui non esiste una marcata differenza tra fusoliera ed ali e dove tutta la struttura contribuisce alla portanza. Ne è un esempio il Northrop-Grumman B-2 Spirit, utilizzato in campo militare. In fig. 3.17⁶⁸ è mostrato un modello di aereo BWB nato dalla collaborazione tra NASA e Boeing. Quest'ultima dichiara una riduzione dei consumi di circa il 20-25% rispetto al consumo medio degli aerei attualmente sul mercato, grazie alla tecnologia BWB.

⁶⁸ www.nasa.gov



Fig. 3.17 - Modello di aereo *Blended Wing Body* frutto della cooperazione Boeing-NASA.

Una riduzione delle emissioni si otterrebbe anche grazie a un alleggerimento dell'aereo. Utilizzando delle plastiche rinforzate al carbonio, anziché alluminio, si avrebbe un incremento del 20% dell'efficienza energetica. Un ulteriore passo avanti si potrebbe ottenere utilizzando dei laminati di fibre metalliche (*Fibre Metal Laminate*, FML), che comporterebbero un'ulteriore riduzione di peso del 20%⁶⁹.

Trasporto navale

Nel settore navale esistono diverse soluzioni innovative per ridurre il consumo di carburante e quindi le emissioni di CO₂. Due di queste si basano sullo sfruttamento del vento come contributo al sistema di propulsione. Una soluzione, chiamata *SkySails System*, propone l'uso di "aquiloni-paracadute", regolati da computer per ottimizzarne le prestazioni. Un esperimento è già stato realizzato nel 2007 dalla azienda *Beluga Group*, che ha installato in una nave mercantile un aquilone di 320m² (fig. 3.18). La nave ha avuto un risparmio nei consumi di circa 2,5t di carburante al giorno⁷⁰: la trazione dell'aquilone, in buone condizioni

⁶⁹ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.

⁷⁰ <http://www.skysails.info>

di vento, equivaleva a una propulsione di 2000 kW⁷¹ e ha permesso una riduzione dei consumi compresa tra il 10-35%, a seconda delle condizioni di vento.



Fig. 3.18 - Esempio di applicazione *SkySails System*

Un'altra tecnologia sfrutta l'effetto Magnus, ovvero il principio secondo cui un corpo in rotazione immerso in un flusso è soggetto a una forza perpendicolare alla direzione del fluido (fig. 3.19). Le prime applicazioni di questa tecnologia risalgono al 1924, quando l'ingegner Flettner realizzò un'imbarcazione dotata di due rotori cilindrici come mezzo di propulsione (tecnologia detta poi "rotori Flettner"). Nel 2010 la *Enercon*, un'azienda tedesca produttrice di turbine eoliche, ha realizzato una nave mercantile (fig. 3.20) dotata di questo sistema di

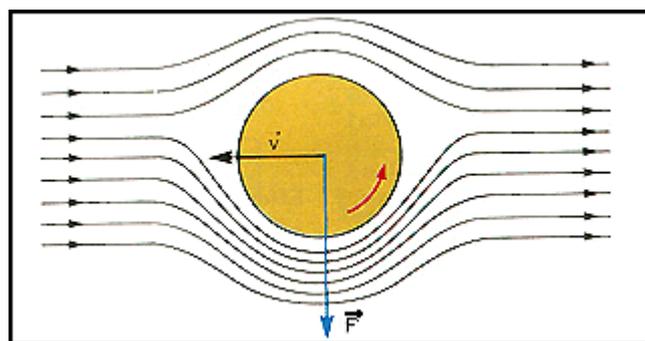


Fig. 3.19 - Rappresentazione dell'effetto Magnus.

⁷¹http://www.skysails.info/fileadmin/user_upload/Presselounge/Dokumente/englisch/EN_SkySails_Press_Kit.pdf

propulsione e, dopo 3 anni di impiego, ha affermato di aver ottenuto una riduzione dei consumi del 25%⁷².



Fig. 3.20 - *E-Ship*, nave dotata di rotori Flettner come ausilio alla propulsione.

Un'altra soluzione sarebbe quella di dotare di un sistema di propulsione ibrido, diesel-elettrico, le imbarcazioni che effettuano percorsi caratterizzati da frequenti cambi di marcia o direzione, come traghetti, battelli e rifornitori; per tali categorie si stima una riduzione del 5-30% delle emissioni⁷³.

Comunque la miglior strategia per ridurre le emissioni, ovvero quella con minori costi e maggior robustezza nelle previsioni, consiste nella riduzione della velocità delle navi. In fig.3.21⁷⁴ è mostrata una stima della diminuzione delle emissioni di CO₂ in funzione della riduzione della velocità operativa di un portacontainer a parità di merce oraria trasportata.

⁷² <http://www.enercon.de/>

⁷³ IEA, International Energy Agency, (2009) *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward a Sustainability*.

⁷⁴ James J. Corbetta, Haifeng Wangb, James J. Winebrakec (2009), *The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping*, Transportation Research Part D: Transport and Environment.

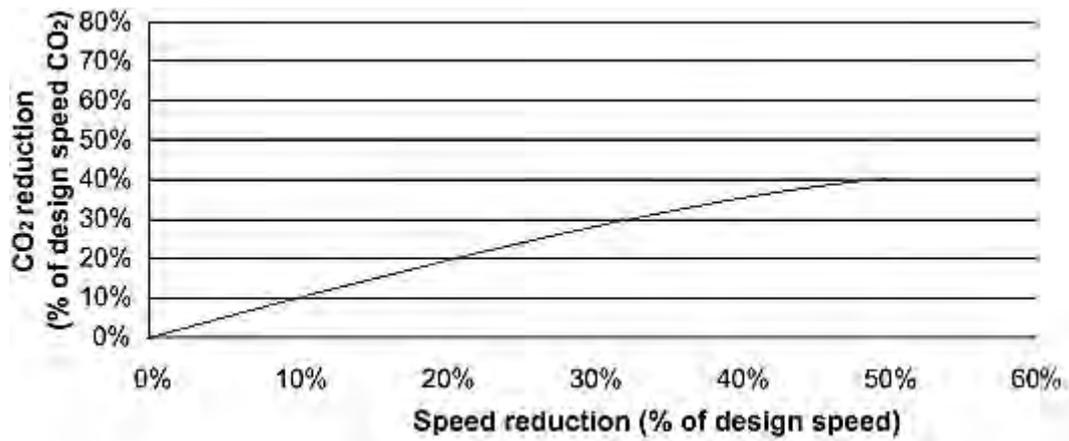


Fig. 3.21 - Grafico raffigurante la riduzione delle emissioni di CO₂ al variare della riduzione della velocità di un portacontainer, a parità di volume di merci trasportate.

In conclusione, la ricerca propone per questo settore, già caratterizzato da emissioni di gas serra molto contenute, diverse soluzioni a breve-medio termine al fine di ridurre i consumi e quindi le emissioni di CO₂.

3.4 Politiche per incentivare lo shift modale

Per uno sviluppo razionale del settore dei trasporti, disincentivare i modi di trasporto che causano esternalità negative e/o incentivare quelli più sostenibili risulta un'ottima strategia e, talvolta, una necessità. Molti sono gli studi in merito, date le molteplici finalità raggiungibili (riduzione della congestione, dell'inquinamento, dell'incidentalità, ecc.), per cui si opta per porre l'attenzione più su politiche attuate, che non su strategie possibili, analizzandone poi l'incidenza sulle emissioni di gas serra.

Tra i possibili *shift* modali, quelli che maggiormente permettono una riduzione delle emissioni sono riassunti in tab. 3.4.

	Scala urbana	Scala extra-urbana
Trasporto di persone	Dall'auto a bici, bus, tram o metro	Dall'auto e dall'aereo al treno
Trasporto merci	-	Dal camion al treno o nave

Tab. 3.4 - *Shift* modali per ridurre le emissioni di gas serra.

In ambito urbano, incentivare lo *shift* dall'auto a un mezzo di trasporto collettivo è un'ottima soluzione per ridurre le emissioni di CO₂, purché sia presente una domanda di trasporto tale da assicurare un adeguato livello di occupazione. Per il trasporto di merci, invece, furgoni e camion, data la loro flessibilità operativa, risultano difficilmente sostituibili. Tuttavia il volume di merci trasportato in ambito urbano non è consistente; dal punto di vista energetico esistono, comunque, diverse tecnologie in grado di ridurre le emissioni nel breve e medio termine, come già visto nel capitolo precedente.

Su scala extra-urbana, il treno ad alta velocità rappresenta per l'utente un'ottima alternativa all'aereo, in genere per tratte inferiori ai 400-600 km⁷⁵; risulta, infatti, conveniente sia per il prezzo del biglietto, sia, talvolta, per la riduzione dei tempi di percorrenza, se si considera il centro città come origine e destinazione dello spostamento. Un esempio italiano di questo *shift* modale è il caso della tratta Roma-Milano (distanti 476 km): nel 2008, prima dell'entrata in esercizio dell'alta velocità, la quota di spostamenti con

⁷⁵ Concepción Román, Juan Carlos Martín, (2014) *Integration of HSR and air transport: Understanding passengers' preferences*, Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review

il treno era il 36% contro il 51% dell'aereo⁷⁶; nel 2013 il treno ha raggiunto l'aliquota del 65%, mentre quella dell'aereo è scesa al 24%⁷⁷.

Spesso lo *shift* modale camion-treno risulta un obiettivo difficile da raggiungere. In uno studio sulle conseguenze dell'aumento del prezzo del petrolio in Europa è emerso che, se il barile di petrolio raggiungesse il prezzo di €150, rispetto a un valore di riferimento di €70, l'aumento del volume di merci trasportate con il treno aumenterebbe solamente del 2%⁷⁸.

Prima di esaminare le politiche attuate, o in fase progettuale, che mirano ad incentivare lo *shift* modale, è opportuno analizzare la sostenibilità ambientale dell'auto in ambito urbano.

Impatto ambientale ed effetti indiretti dell'uso dell'auto in ambito urbano

Su scala urbana, l'auto è il mezzo caratterizzato dai più alti valori di emissioni, che dipendono dalla velocità media con cui il veicolo si muove, in particolare per le velocità comprese tra i 0 e 50 km/h, ovvero quelle tipiche della circolazione urbana. La fig. 3.22⁷⁹ riporta, a titolo indicativo, la correlazione tra la velocità media di un'auto e le emissioni di CO₂, su cui però incidono sensibilmente anche numerose altre variabili (tipologia di percorso, caratteristiche comportamentali del conducente, tipo di veicolo, carburante, ecc.).

⁷⁶ Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., *Rapporto annuale di bilancio 2008*. Disponibile al: http://www.fsitaliane.it/cms-file/allegati/fsitaliane/Rapporto_annuale_di_bilancio_ferrovie_dello_stato_2008.pdf

⁷⁷ Ferrovie dello Stato Italiane S.p.A., *Piano Industriale 2014 – 2017*. Disponibile al: http://www.fsitaliane.it/cms-file/allegati/fsitaliane/25_03_2014_Piano_industriale.pdf

⁷⁸ Schade W., Fiorello D., Beckmann R., Fermi F., Köhler J., Martino A., Schade B., Walz R., Wiesenthal T., (2008) *High Oil Prices: Quantification of direct and indirect impacts for the EU*. Deliverable 3 of HOP! (Macro-economic impact of high oil price in Europe). Funded by European Commission 6th RTD Programme. Milan, Italy.

⁷⁹ Barth Matthew and Boriboonsomsin Kanok, (2010) *Real-World Carbon Dioxide Impacts of Traffic Congestion*, The magazine of UC Transportation Centre.

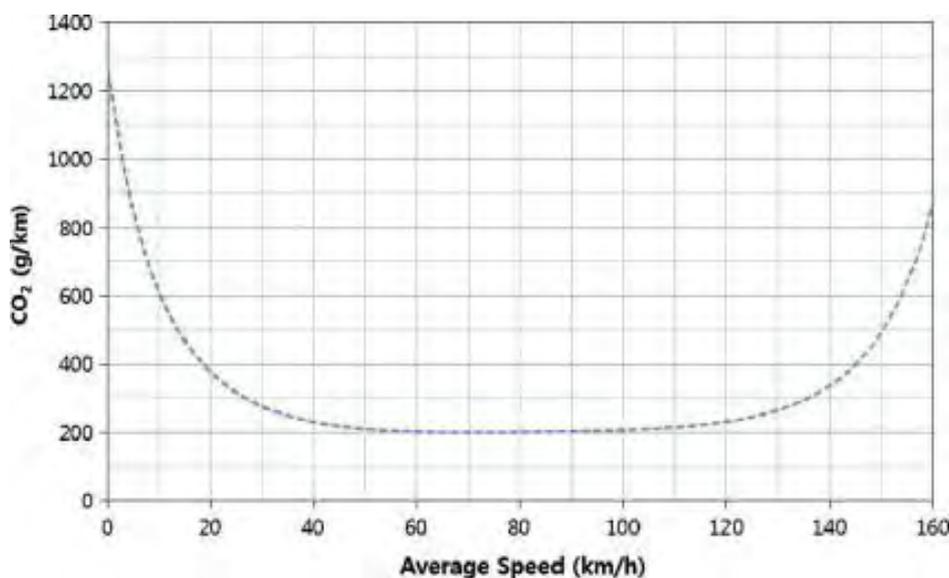


Fig. 3.22 - Grafico raffigurante l'andamento delle emissioni di CO₂ in funzione della velocità media.

In prima analisi, per limitare le emissioni in ambito urbano potrebbe sembrare conveniente cercare di realizzare condizioni di *free-flow* nella viabilità (fig. 3.23)⁸⁰.

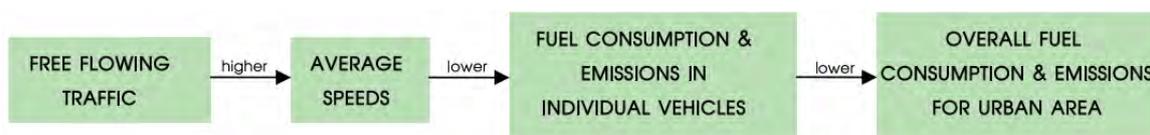


Fig. 3.23 - Schematizzazione del processo di produzione delle emissioni in ambito urbano (solo effetti diretti)

Tuttavia, analizzando il fenomeno complessivamente, sono da considerare nel tempo anche gli effetti indiretti e le retroazioni conseguenti ad un miglioramento della viabilità stradale urbana. In particolare si rilevano:

- l'*urban sprawl*, indotto dall'allungamento delle distanze percorribili, conseguenza della diminuzione dei tempi di percorrenza;
- l'aumento dell'uso dell'auto, dovuto a una miglior offerta del servizio viario;
- la riduzione dell'uso del trasporto pubblico e dei mezzi non motorizzati. La fig. 3.24⁸¹ mostra come, all'aumentare dell'uso dell'auto, meno persone scelgano il trasporto pubblico, in un'analisi condotta su città di tutto il mondo.

⁸⁰ Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

⁸¹ Newman P., Kenworthy J., and Glazebrook G., (2008) *How to create exponential decline in car use in Australian cities*, AdeptNet Policy Forum.

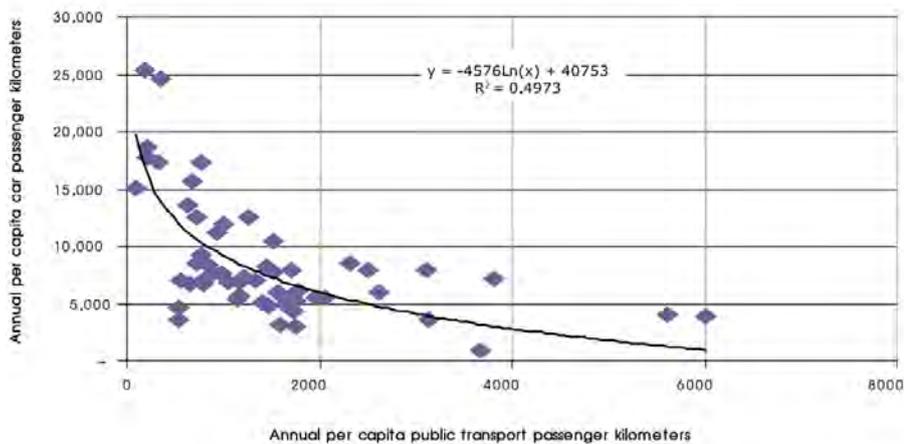


Fig. 3.24 - Relazione tra utilizzo medio annuale dell'auto e del trasporto pubblico, espresso in persone·km; analisi condotta in città di tutto il mondo.

Inoltre, tali conseguenze non sono tra loro indipendenti, ma caratterizzate da un feedback positivo da cui deriva, nel tempo, un incremento delle stesse (fig. 3.25).

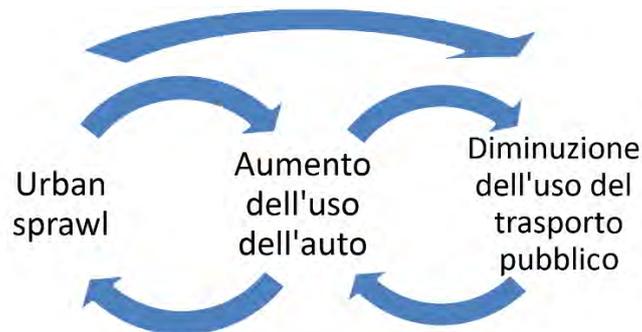


Fig. 3.25 - Retroazioni tra gli effetti indiretti conseguenti un miglioramento del servizio viario.

Da tali considerazioni risulta che lo schema logico del processo di produzione delle emissioni risulta più complesso di quello presentato inizialmente; una schematizzazione più precisa viene presentata in fig. 3.26⁸², in relazione a una realtà urbana con viabilità *free-flow* (a) o congestionata (b)

⁸² Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

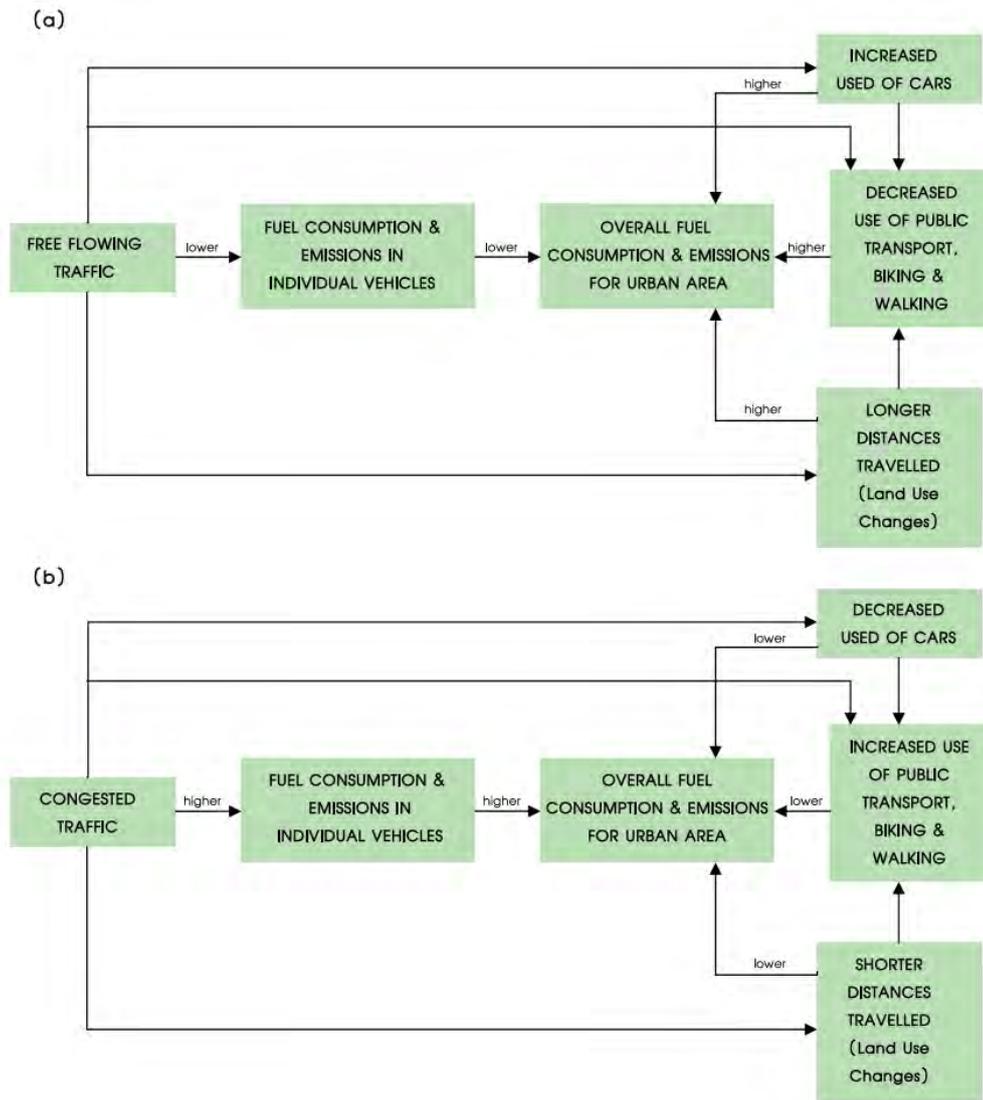


Fig. 3.26 - Schematizzazione del processo di produzione di emissioni in ambito urbano considerando anche gli effetti indiretti e le retroazioni nel caso di una città (a) con strade in condizioni *free-flow*, (b) con viabilità congestionata.

La maggior o minor incidenza dei fattori indiretti dipende dai sistemi di trasporto presenti e dalla realtà socio-economica e urbanistica. Tuttavia è possibile affermare che la velocità media di scorrimento in una città non è un buon indicatore dell'impatto ambientale dei trasporti, né che una città caratterizzata da fenomeni di congestione del traffico necessariamente abbia un impatto ambientale maggiore di una con una viabilità più scorrevole.

Politiche orientate ad una decongestione del traffico (es. costruzione di nuove infrastrutture) potrebbero condurre a risultati ambientali opposti a quelli inizialmente previsti.

Confronto tra le politiche adottate da Pechino e Shanghai per limitare l'uso dell'auto in ambito urbano.

Shanghai e Pechino sono le due città con il più alto numero di abitanti della Cina, e, rispettivamente, la prima e la terza del mondo. L'elevata crescita della popolazione e della ricchezza ha portato negli ultimi anni ad un aumento esponenziale del numero di auto circolanti; pertanto si sono resi necessari importanti provvedimenti per limitarne l'uso e ridurre i fenomeni di congestione stradale.

Per le caratteristiche socio-economiche simili e le differenti politiche adottate nei trasporti, risulta molto interessante il confronto tra queste due realtà. La popolazione e il PIL pro capite di Shanghai sono, rispettivamente, circa il 10% e il 15% in più rispetto a Pechino. Del tutto diverso è invece il numero di veicoli per mille abitanti: a Pechino è quasi il triplo che a Shanghai (tab. 3.5)⁸³.

	Unità	Pechino	Shanghai
Popolazione	Milioni	17,55	19,2
Superficie	km ²	16'808	6'341
PIL	milioni di ¥	1'187	1'490
PIL pro capite	migliaia	67,6	77,6
Veicoli totali	Milioni	3,72	1,47
Veicoli per 1000ab.	veicoli/1000 abitanti	212	76,6

Tab. 3.5 - Dati socio-economici e di motorizzazione di Shanghai e Pechino, fine 2009

(1¥ = 1 CNY = 1 RMB \cong 0,10€).

Nonostante i valori delle superfici siano molto diversi tra loro, il confronto tra le due realtà risulta comunque interessante in quanto l'estensione della città può essere considerata una variabile endogena rispetto al sistema di trasporto.

⁸³ Haoa Han, Wanga Hewu, Ouyanga Minggao, (2011) *Comparison of policies on vehicle ownership and use between Beijing and Shanghai and their impacts on fuel consumption by passenger vehicles*, Energy policy.

Le politiche nazionali della Cina, in questi ultimi anni, hanno sempre promosso il mercato dell'automobile, portando ad una crescita esponenziale del numero delle vetture possedute. In fig. 3.27⁸⁴ è mostrata la serie storica del numero di veicoli circolanti e del PIL pro-capite. Si noti la forte correlazione tra le due serie.

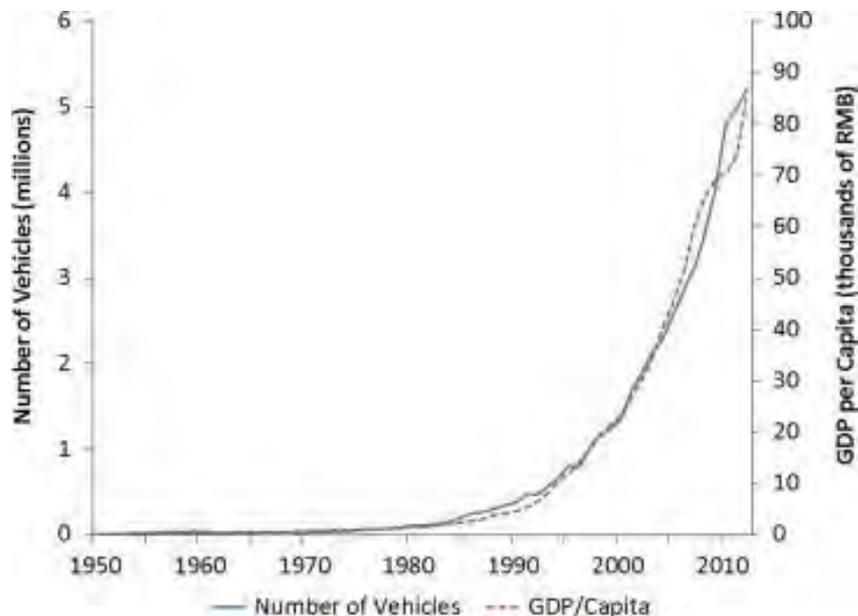


Fig. 3.27 - Andamento del numero di veicoli circolanti e del PIL pro-capite cinese dal 1950.

In fig. 3.28⁸⁵ è mostrato l'andamento della vendita di auto in Cina e del tasso di crescita negli anni dal 2000 al 2009; da notare che nel 2009, grazie al “Piano di rivitalizzazione dell'industria dell'auto”, il numero delle auto vendute è aumentato del 44%.

⁸⁴ Yanga Jun, Liub Ying, Qinc Ping, Liud Antung A., (2014) *A review of Beijing's vehicle registration lottery: Short-term effects on vehicle growth and fuel consumption*, Energy policy.

⁸⁵ Haoa Han, Wanga Hewu, Ouyanga Minggao, (2011) *Comparison of policies on vehicle ownership and use between Beijing and Shanghai and their impacts on fuel consumption by passenger vehicles*, Energy Policy.

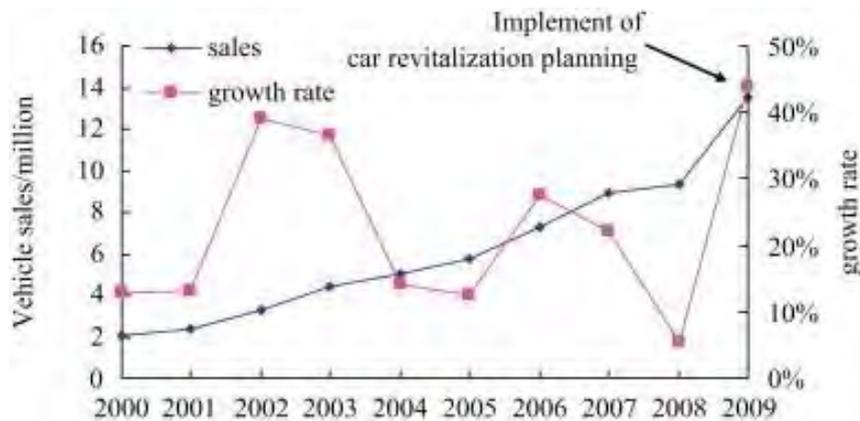


Fig. 3.28 - Numero totale di auto vendute in Cina per anno, in blu, e tasso di crescita, in rosa.

Shanghai è stata la prima città cinese, nel 1986⁸⁶, ad adottare strategie per contenere il numero delle auto possedute, in particolare mettendo all'asta ogni mese un determinato numero licenze per auto (targhe). Il sistema odierno, istituito nel 2008, consiste in un'asta on-line della durata di 90 minuti per la vendita di circa 10'000 targhe: ogni partecipante paga quello che punta (*pay as you bid*) e negli ultimi 30 minuti può effettuare al massimo 2 puntate⁸⁷.

Nel marzo 2013 il prezzo medio per una licenza ha raggiunto il valore record di €11'400 (91'898¥, 1¥ \cong 0,124€), fig. 3.29⁸⁸. Nel 2012 il sistema delle aste ha generato per l'amministrazione di Shanghai un utile di 0,83 miliardi di euro (6,7 miliardi di ¥), destinato poi per il miglioramento del trasporto pubblico e delle infrastrutture⁸⁹.

⁸⁶ Gli effetti dei primi provvedimenti adottati sono stati poco significativi. Per questa ragione molti autori pongono in un momento successivo l'inizio delle politiche atte a limitare il numero delle auto possedute, in particolare nel 1994, anno in cui è stato riorganizzato il sistema delle aste per il conferimento delle licenze.

⁸⁷ Li Shanjun, (2014) *Better Lucky Than Rich? Welfare Analysis of Automobile License Allocations in Beijing and Shanghai*. disponibile al sito: http://www.umass.edu/resec/seminars/docs/beijing_lottery_v2.pdf

⁸⁸ <http://www.odfund.com/>

⁸⁹ Li Shanjun, (2014) *Better Lucky Than Rich? Welfare Analysis of Automobile License Allocations in Beijing and Shanghai*.

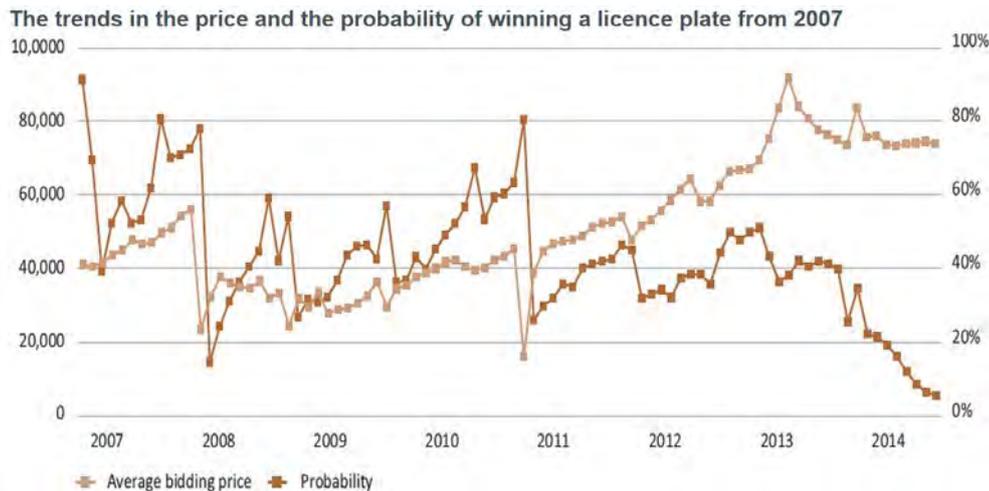


Fig. 3.29 - Grafico raffigurante l'andamento temporale del prezzo medio di vendita delle targhe e della probabilità di aggiudicarsene una, dal 2007 ad oggi.

Questa soluzione viene percepita dalla popolazione come una politica molto iniqua, ma funzionante nella limitazione della congestione stradale⁹⁰.

In occasione dell'Expo di Shanghai 2010, l'amministrazione della città aveva predisposto delle misure per limitare l'uso dell'auto in caso di ricorrenti congestioni stradali, ma non risulta che siano mai state applicate⁹¹.

Un primo provvedimento, adottato a Shanghai ed orientato principalmente all'aspetto ambientale, è stato quello di rilasciare, dal 2013, 20'000 licenze gratuite per i veicoli elettrici prodotti in Cina⁹²; da maggio 2014 ha esteso la concessione anche a 3'000 veicoli prodotti da un'azienda estera, la Tesla, specializzata in veicoli a propulsione elettrica⁹³.

A Pechino, i primi provvedimenti di contrasto della congestione del traffico sono stati attuati molto più tardi che a Shanghai. Nel 2007, si è cercato di incentivare fortemente il trasporto pubblico, riducendo del 60% il prezzo dei biglietti di bus e metro, ma con scarsi risultati⁹⁴. Le prime politiche per disincentivare l'uso dell'auto sono state attuate in occasione delle Olimpiadi, nel giugno 2008. Le limitazioni interessavano esclusivamente

⁹⁰ Chen Xiaojie, Zhao Jinhua, (2013) *Bidding to drive: Car license auction policy in Shanghai and its public acceptance*, Transport Policy.

⁹¹ Haoa Han, Wanga Hewu, Ouyanga Minggao, (2011) *Comparison of policies on vehicle ownership and use between Beijing and Shanghai and their impacts on fuel consumption by passenger vehicles*, Energy Policy.

⁹² U.S. Energy Information Administration, (2013) *International Energy Outlook 2013 with Projections to 2040*.

⁹³ <http://evworld.com/>

⁹⁴ Chen Xiaojie, Zhao Jinhua, (2013) *Bidding to drive: Car license auction policy in Shanghai and its public acceptance*, Transport Policy.

l'uso dell'auto: la soluzione adottata è stata quella delle targhe alterne, ovvero i veicoli con il numero di targa pari (dispari) potevano essere usati solo durante i giorni pari (dispari). Come si può vedere in fig.3.30⁹⁵ il risultato della politica adottata è stato soddisfacente; successivamente l'amministrazione ha deciso di applicare altri provvedimenti simili. Nel 2009 è entrata in vigore un'altra normativa che vietava, in base al numero della targa, l'uso del veicolo durante un giorno ferialo della settimana; è stata poi prorogata, seppur con qualche piccola modifica, fino al 2012.

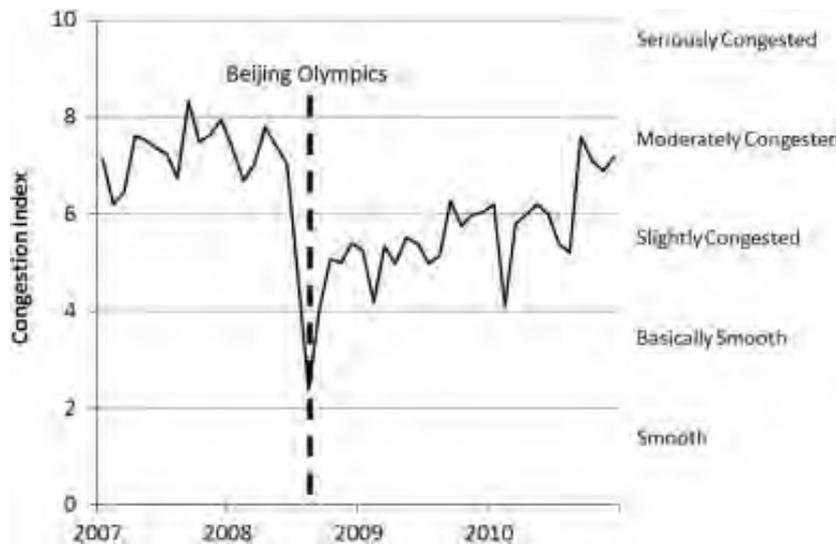


Fig. 3.30 - Livello di congestione stradale a Pechino, in una scala da 0 a 10, dall'anno 2007 al 2010.

Tali politiche, efficaci nel breve termine, hanno invece mostrato dei problemi in seguito. Alcune famiglie, grazie anche al “Piano di rivitalizzazione dell'industria dell'auto”, decisero di comprare una seconda auto, ma con un numero di targa tale da poterne usare sempre almeno una. Ciò portò, oltre a una riduzione dell'efficienza dei piani basati sulle targhe, un notevole incremento dei veicoli a Pechino. Il 2010 è stato un anno caratterizzato da grandi problemi di viabilità. Il 14 agosto⁹⁶ di quell'anno, per un lavoro in una strada tra Pechino e la vicina Zhangjiakou, il traffico si bloccò completamente per 3 giorni interessando 100 km di autostrada (fig. 3.31)⁹⁷; la situazione ritornò alla normalità dopo circa dieci giorni. In altra

⁹⁵ Beijing Municipal Commission of Transport and Beijing Transportation Research Center, (2012) *Work Report of Thoughts and Measures on Controlling the Total Quantity of Motor Vehicles in the Face of International Cities*. Pechino, Cina.

⁹⁶ Ipotizzo, come refuso di stampa, in *J.Yanga et al (2014)*, l'indicazione di “14 settembre” anziché “14 agosto”, quale data in cui si verificò l'enorme congestione stradale che bloccò l'autostrada G110 nel 2010.

⁹⁷ <http://home.wangjianshuo.com/>

zona, sempre in quei giorni, per un acquazzone, ci furono seri problemi di viabilità (indice di congestione 10 su 10) in 4321 strade⁹⁸.



Fig. 3.31 - Foto dell'autostrada G110 in prossimità di Pechino durante la congestione iniziata il 14 agosto 2010.

La situazione della viabilità, diventata insostenibile, ha portato l'amministrazione di Pechino ad adottare delle politiche radicali. Dall'inizio del 2011 fu istituito un sistema di lotteria che prevedeva, per i vincitori, il diritto personale, non cedibile o vendibile, di possedere una nuova macchina. Da allora ogni mese vengono messe in palio 17'600 licenze e per i partecipanti non vi è alcun onere economico: può partecipare all'estrazione chiunque paghi da 5 anni le tasse e non possieda un'auto. In fig. 3.32⁹⁹ vengono mostrate le probabilità di vincita ed il numero di partecipanti alla lotteria. Da rilevare come a partire dai primi mesi del 2011 la probabilità di vincita cominciò subito a decrescere con l'aumentare del numero dei partecipanti.

⁹⁸ Yanga Jun, Liub Ying, Qinc Ping, Liud Antung A., (2014) *A review of Beijing's vehicle registration lottery: Short-term effects on vehicle growth and fuel consumption*, Energy policy.

⁹⁹ Yanga Jun, Liub Ying, Qinc Ping, Liud Antung A., (2014) *A review of Beijing's vehicle registration lottery: Short-term effects on vehicle growth and fuel consumption*, Energy policy.

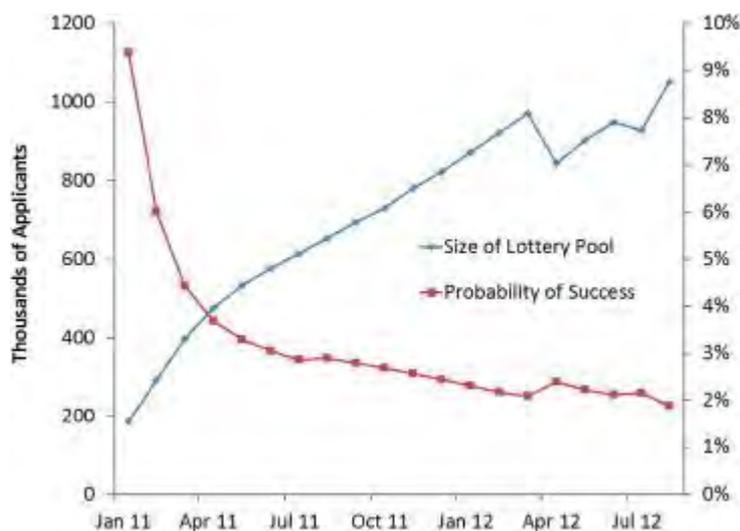


Fig. 3.32 - Grafico raffigurante la probabilità di vincita e il numero di partecipanti alla lotteria, tra il 2011 e il 2012 a Pechino.

In più, nel 2010, la città di Pechino ha investito oltre il 5% del proprio PIL nei trasporti, di cui l'84% per quelli pubblici ed il restante 16% per provvedimenti in ambito stradale al fine mitigare gli effetti della congestione¹⁰⁰ (fig. 3.33).

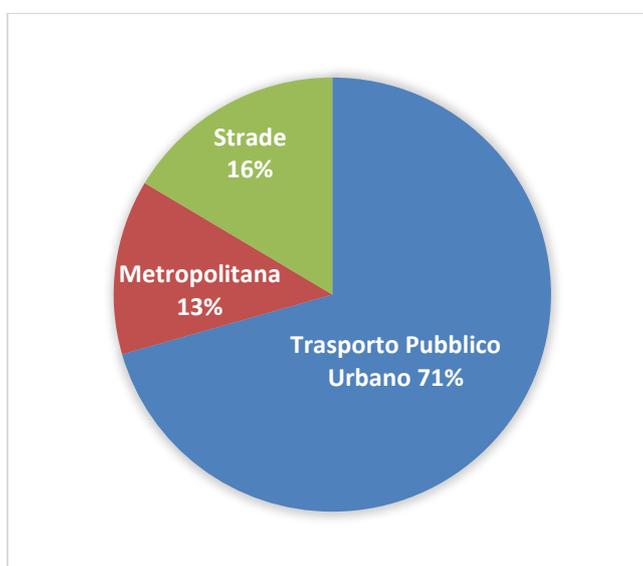


Fig. 3.33 - Grafico raffigurante la ripartizione del 5% del PIL del 2010 di Pechino, investito nel settore dei trasporti.

¹⁰⁰ Yanga Jun, Liub Ying, Qinc Ping, Liud Antung A., (2014) *A review of Beijing's vehicle registration lottery: Short-term effects on vehicle growth and fuel consumption*, Energy policy.

Come si può vedere in fig. 3.34¹⁰¹, il livello congestione è diminuito immediatamente a partire dall'anno successivo.

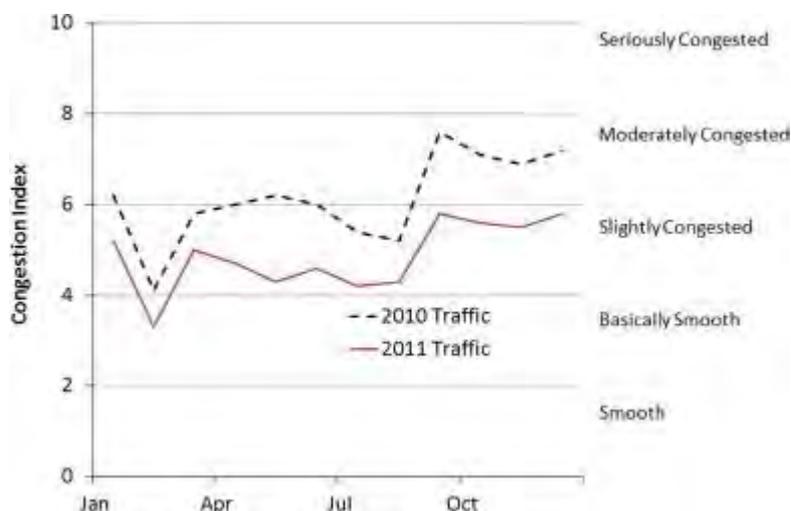


Fig. 3.34 - Confronto tra i livelli di congestione stradale a Pechino, in una scala da 0 a 10, tra l'anno 2010 e 2011.

È interessante notare come i risultati ottenuti nel 2011, non possano essere correlabili ad una sola soluzione, ma ad un insieme di politiche: il potenziamento dei sistemi di trasporto pubblico da un lato e strategie per mitigare l'uso dell'auto dall'altro.

La soluzione di regolare, nel 2011, con un sistema di lotteria la possibilità di possedere un'auto, ha portato, nel brevissimo termine, ad un aumento delle auto circolanti, a causa del picco di vendite registrate nel dicembre 2010 (fig. 3.35)¹⁰². Da rilevare quindi che i risultati ottenuti dalle politiche di Pechino nel 2011, riportati in fig. 3.34, sono correlabili in particolar modo al potenziamento del sistema di trasporto pubblico ed ai provvedimenti in ambito stradale, piuttosto che al sistema della lotteria.

¹⁰¹ Beijing Municipal Commission of Transport and Beijing Transportation Research Center, (2012) *Work Report of Thoughts and Measures on Controlling the Total Quantity of Motor Vehicles in the Face of International Cities*. Beijing, China.

¹⁰² Li Shanjun (2014), *Better Lucky Than Rich? Welfare Analysis of Automobile License Allocations in Beijing and Shanghai*. disponibile nel sito: http://www.umass.edu/resec/seminars/docs/beijing_lottery_v2.pdf

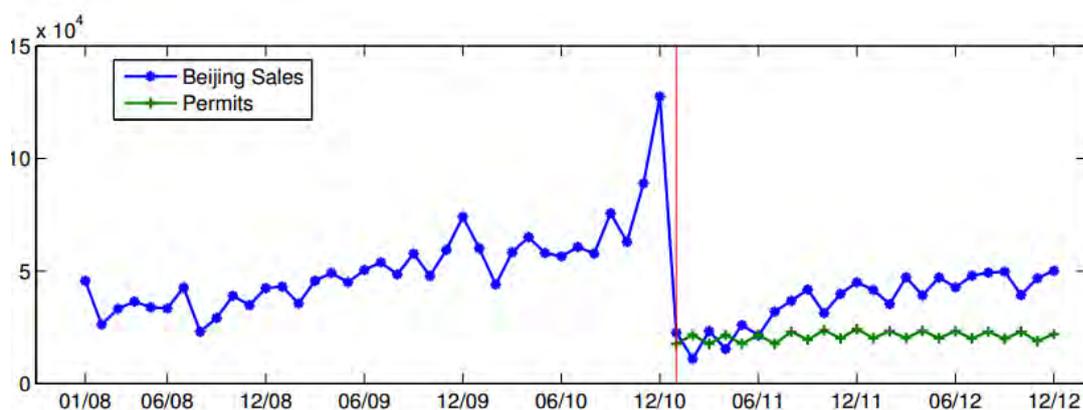


Fig. 3.35 - Andamento temporale delle vendite di autoveicoli, in blu, e delle licenze (*permits*) rilasciate, in verde, a Pechino dal 2008 al 2012.

Si noti inoltre come provvedimenti legati esclusivamente all’uso dell’auto, quali quelli adottati da Pechino prima del 2011, risultino efficaci solo nel breve termine, in quanto non strutturali e radicali come invece quelli che incidono sulla proprietà del veicolo.

Anche Pechino ha adottato politiche per la salvaguardia ambientale: nel 2014 ha deciso di incentivare la vendita di auto elettriche diminuendo anno per anno le licenze per le auto a combustione convenzionale ed aumentando quelle per le auto elettriche in una lotteria parallela (tab. 3.6)¹⁰³.

Anno	Veicoli convenzionali	Veicoli elettrici	Veicoli totali
2014	130'000	20'000	150'000
2015	120'000	30'000	150'000
2016	90'000	60'000	150'000
2017	90'000	60'000	150'000

Tab. 3.6 - Numero di licenze previste per i veicoli tradizionali ed elettrici per gli anni dal 2014 al 2017.

Risulta interessante confrontare gli impatti ambientali delle due realtà nel 2009, anno in cui non si sono verificati eventi eccezionali di domanda, come invece nel 2008, anno delle Olimpiadi, o anche nel 2010, anno successivo al “Piano di rivitalizzazione dell’industria dell’auto” nonché anno dell’Expo di Shanghai. Il confronto risulta interessante anche per

¹⁰³ <http://sustainabletransport.org/>

paragonare due differenti approcci adottati per disincentivare l'uso dell'auto: una politica atta a limitare la proprietà, istituita 15 anni prima, da una parte, ed una limitazione sull'uso, iniziata l'anno precedente, dall'altra. Sono così confrontabili le conseguenze, sulle emissioni di gas serra, di strategie di sviluppo di sistemi di trasporto diverse, ma in ambiti socio-economico-politici simili.

In fig. 3.36¹⁰⁴ è mostrato il confronto tra le emissioni totali dei trasporti nelle due città, ripartite secondo i principali modi di trasporto.

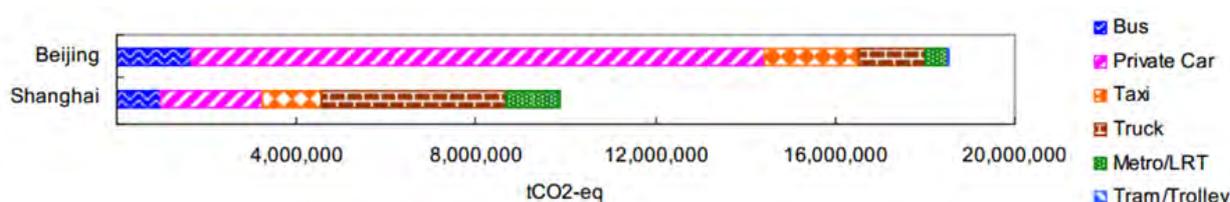


Fig. 3.36 - Emissioni di gas serra del settore dei trasporti nelle città di Shanghai e Pechino, ripartite secondo i modi di trasporto, nel 2009.

In tab. 3.7¹⁰⁵ sono indicati a confronto i valori delle emissioni totali e pro-capite del settore dei trasporti, a Shanghai e Pechino, nel 2009.

Emissioni di CO ₂	Shanghai	Pechino
MtCO ₂ totali	9,88	18,54
tCO ₂ per abitante	0,51	1,06

Tab. 3.7 - Emissioni di CO₂ del settore dei trasporti delle città di Shanghai e Pechino, totali e pro-capite, nel 2009.

Risulta che il modello di sviluppo adottato da Shanghai, con meno della metà delle emissioni pro-capite di CO₂, è, da un punto di vista ambientale, più sostenibile di quello di Pechino.

¹⁰⁴ ITEC Independent Transport Economists Club, (2011) *Low-Carbon Transport System in China: Transport CO2 Emission Inventory*, Young Crane Consulting CO. LTD. Disponibile al sito: http://www.tdm-beijing.org/files/YCC_Indie_Study_Transport_CO2_Emission_Inventory_2011.pdf

¹⁰⁵ Ibidem.

Riduzione delle emissioni grazie all'alta velocità ferroviaria in Nord Europa: previsione della riduzione degli impatti con la linea ferroviaria Europabanan.

In nord Europa è stata proposta una nuova linea ferroviaria che collega Stoccolma a Gothenburg e a Malmö-Copenaghen (fig. 3.37¹⁰⁶). La lunghezza prevista è di 740 km, di cui 44 in tunnel e 12 sopraelevati. Il progetto, non ancora finanziato per gli alti costi di realizzazione previsti (12 miliardi di euro), porterebbe, oltre ad una riduzione dei tempi di percorrenza, anche ad una limitazione delle emissioni di CO₂. Attualmente si stima che grazie a questa linea si eviterà l'immissione in atmosfera di 550'000 tCO₂ all'anno¹⁰⁷.

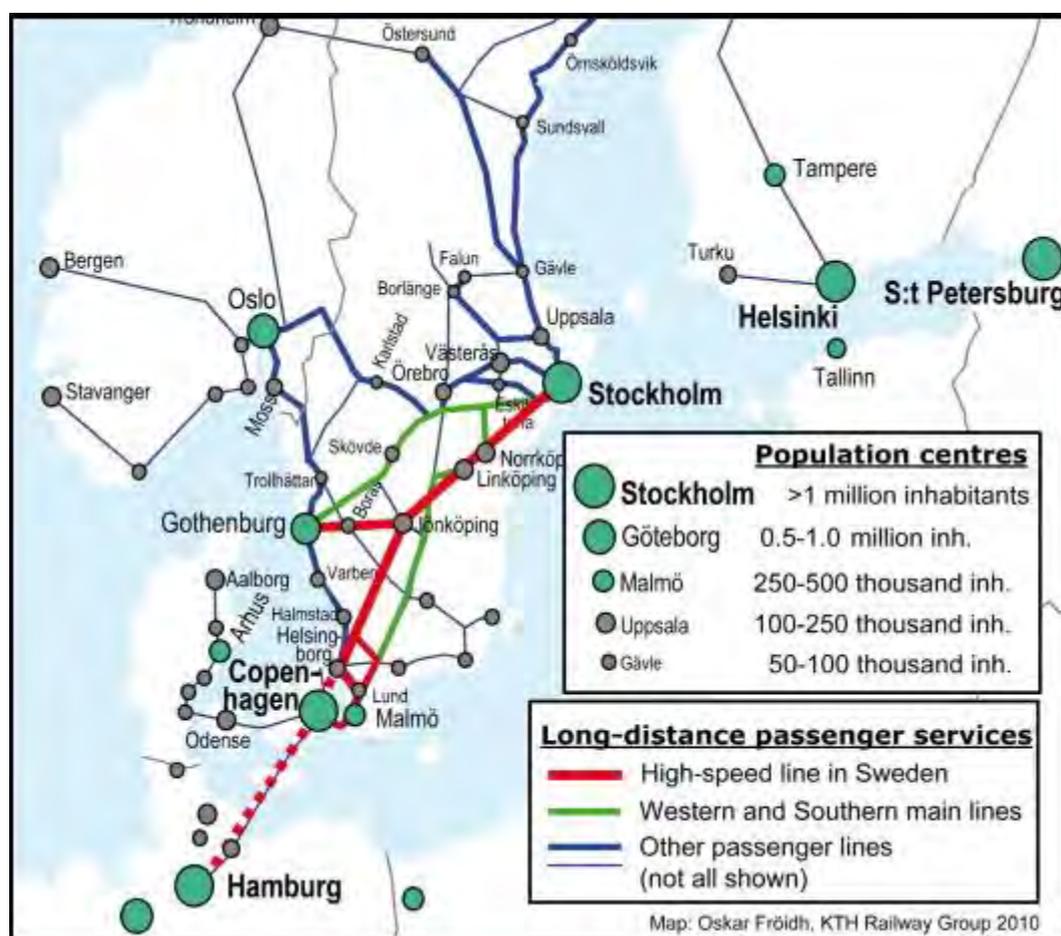


Fig. 3.37 - Tracciato della nuova linea ferroviaria alta velocità (*Europabanan*), proposta per gli stati del nord Europa.

¹⁰⁶ Åkerman Jonas, (2011) *The role of high-speed rail in mitigating climate change – The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective*, Transportation Research Part D: Transport and Environment.

¹⁰⁷ Ibidem.

In relazione a tal progetto, in fig. 3.38¹⁰⁸ vengono mostrate le stime delle emissioni, dirette (per la produzione di elettricità) e indirette (per la costruzione dell'infrastruttura, la manutenzione, ecc.), e della riduzione delle emissioni grazie allo *shift* modale. Circa il 60% del totale della stima della CO₂ non emessa è imputabile allo *shift* camion-treno nel trasporto merci.

È interessante notare come, nonostante il considerevole impatto ambientale iniziale, stimato in circa 4 milioni di tonnellate di CO₂ per la costruzione, la realizzazione di una linea ferroviaria AV porti nel tempo, grazie allo *shift* modale, ad una sensibile riduzione delle emissioni di CO₂.

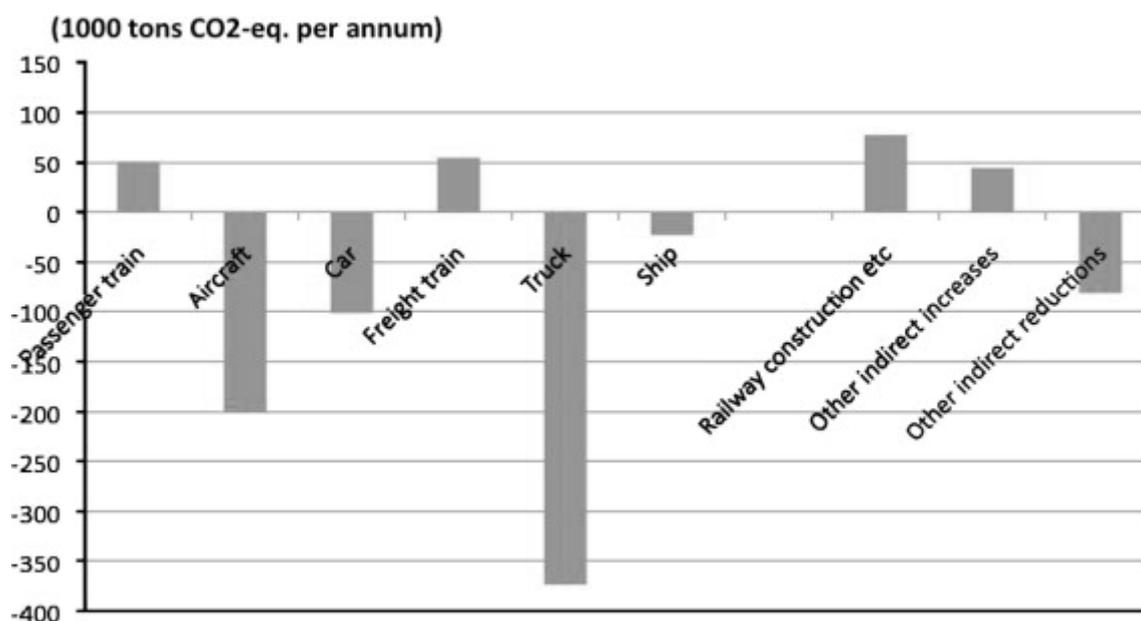


Fig. 3.38 - Previsione degli impatti diretti, a sinistra, e indiretti, a destra, una volta ultimata la linea AV *Europabanan*; i valori negativi sono dovuti alle emissioni non prodotte a seguito di uno *shift* modale in favore del treno AV. Tali valori sono previsti per l'anno 2025 per il trasporto di persone e per l'anno 2030 per il trasporto merci, per differenti tempi di adattamento alla nuova linea, posto il 2023 come anno di ultimazione dell'opera.

¹⁰⁸ Åkerman Jonas, (2011) *The role of high-speed rail in mitigating climate change – The Swedish case Europabanan from a life cycle perspective*, Transportation Research Part D: Transport and Environment.

Incentivare lo shift modale modificando le abitudini di viaggio: TravelSmart

Esiste una particolare tipologia di politiche di trasporto non infrastrutturali, basata sul cambiamento volontario delle abitudini di viaggio (*Voluntary Travel Behaviour Change, VTBC*).

Uno dei programmi VTBC più diffuso è TravelSmart, la cui finalità è ridurre le emissioni di CO₂ sensibilizzando le persone alle questioni ambientali e informandole sugli impatti del settore dei trasporti. L'obiettivo principale perseguito è limitare l'uso dell'auto con varie strategie: promuovendo mezzi di trasporto collettivi, mezzi non motorizzati e car pooling; consigliando di effettuare viaggi più brevi, se possibile fuori dall'orario di punta e concatenando gli spostamenti. Esempi concreti dell'attività sono: organizzazione di *walking bus* per accompagnare i bambini nel percorso casa-scuola, pianificazione di *carpooling* per i lavoratori, produzione di materiale informativo sui benefici dei mezzi sostenibili e sulle externalità negative dell'auto. Punti di forza sono i costi ridotti, l'assenza di consistenti risvolti negativi e la possibilità di applicare tali programmi congiuntamente ad altre politiche.

L'applicazione di TravelSmart in Perth, capitale dell'Australia Occidentale con 450'000 residenti, è costata in media 36 A\$ (circa 24,5€, 1 A\$ \cong 0,68 € nel 2014) per residente. Considerando la conseguente riduzione dei costi sia pubblici che privati per il trasporto, il programma ha permesso un risparmio di 30\$ per ogni dollaro investito¹⁰⁹. L'ammontare dei ricavi aggiuntivi derivanti dal trasporto pubblico, in un periodo di 5 anni, corrisponde già al costo del programma TravelSmart. La media pro-capite di anidride carbonica risparmiata è stata stimata in 225 kg l'anno¹¹⁰.

L'applicazione di TravelSmart nella parte occidentale di Adelaide, capitale dell'Australia Meridionale, che ha coinvolto 22'101 residenti, ha permesso una significativa riduzione delle emissioni di CO₂. Dopo circa un anno, l'uso dell'auto, espresso in p-km, da parte dei partecipanti è diminuito del 18%, mentre è aumentato del 6% per i residenti non partecipanti.

¹⁰⁹ Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

¹¹⁰ Ibidem.

Il programma TravelSmart è stato inoltre applicato in diverse altre città dell'Europa, degli Stati Uniti e dell'Australia. Come mostra la fig. 3.39¹¹¹ si sono raggiunte riduzioni nell'uso della macchina, anche del 14%.

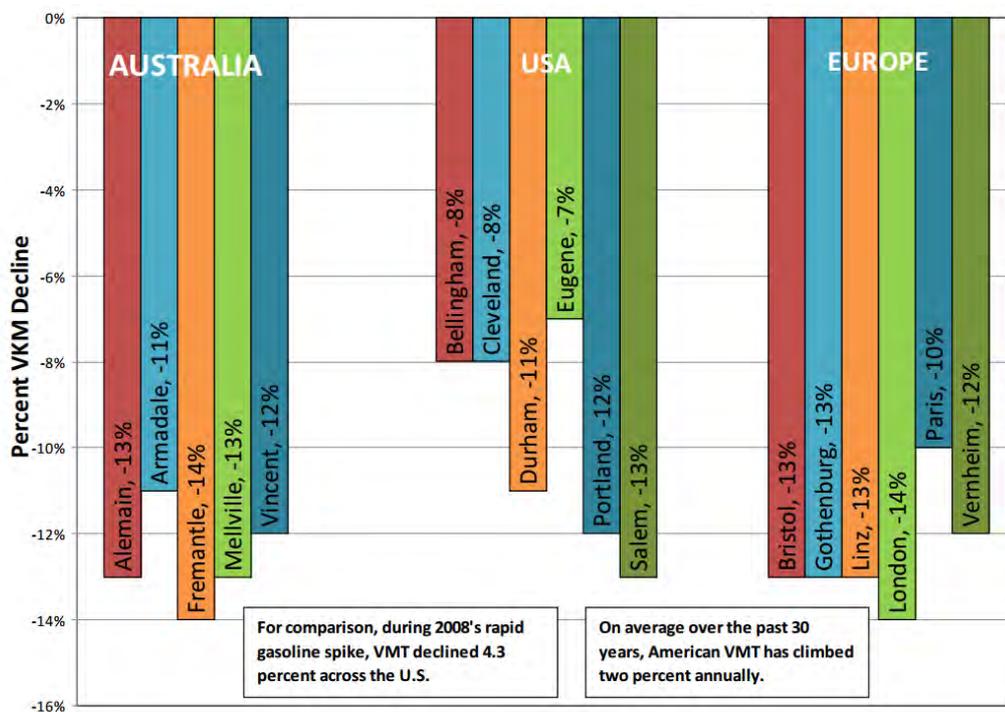


Fig. 3.39 - Riduzione dell'uso dell'auto in alcune città dell'Australia, degli Stati Uniti e dell'Europa grazie all'applicazione del programma TravelSmart;

Riduzione degli spostamenti motorizzati tramite lo sviluppo urbanistico: Transit Oriented Development, TOD

Il *Transit Oriented Development*, abbreviato in TOD (in italiano: “sviluppo orientato al trasporto collettivo”), è un insieme di soluzioni atte a ridurre al minimo gli spostamenti motorizzati, in particolare quelli con mezzi privati, basate su uno sviluppo urbanistico razionale.

Una città che adotta un sistema di sviluppo orientato ai trasporti pubblici (TOD) è caratterizzata da: alta densità abitativa e commerciale, scarsa disponibilità di parcheggio,

¹¹¹ Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series. Department of Planning and Infrastructure, Government of Western Australia.

propensione ad incentivare e agevolare spostamenti in bici o a piedi, distribuzione capillare di fermate dei mezzi pubblici.

TOD si riferisce anche a strategie di sviluppo di nuovi corridoi metropolitani o di aree limitrofe alle città, atte a ridurre l'urban sprawl e la dipendenza dall'automobile. In molte applicazioni la fermata del mezzo di trasporto pubblico rappresenta un vero e proprio centro del quartiere, caratterizzato da un'alta densità abitativa e commerciale nel raggio di lunghezza pari allo spazio percorribile in 5-10 minuti a piedi; negli Stati Uniti il raggio di riferimento è in genere di mezzo miglio (800m circa)¹¹², in quanto si ritiene che una persona sia disposta a camminare al massimo dieci minuti per arrivare fino alla fermata, considerando una velocità media di 3mph (4,8 km/h).

La densità abitativa è uno dei fattori che, su scala urbana, incide di più sui consumi energetici totali nell'ambito dei trasporti. Come mostra la fig. 3.40¹¹³, un legame inversamente proporzionale approssima bene la relazione tra densità urbana ed energia pro-capite per il trasporto in molte città.

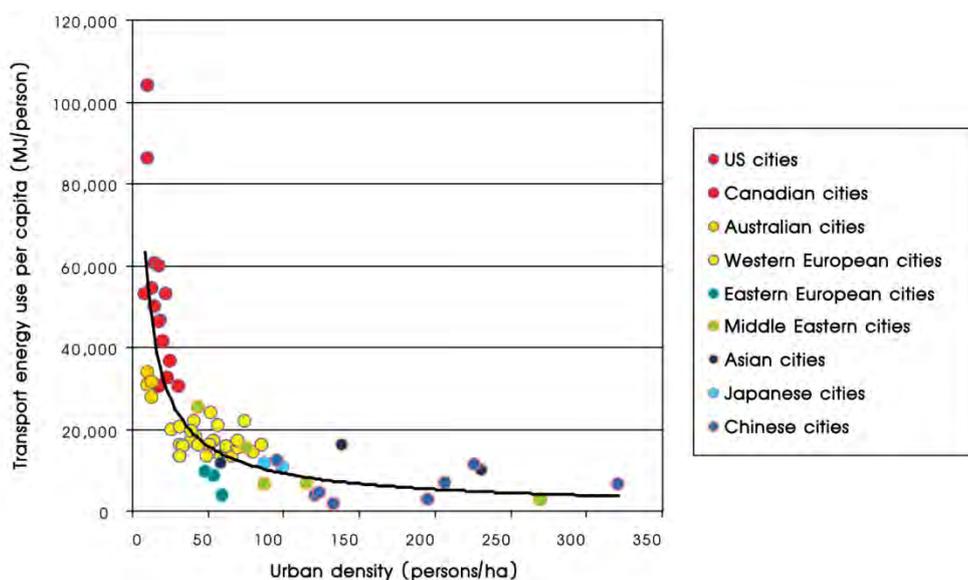


Fig. 3.40 - Relazione tra densità urbana ed energia pro-capite per il trasporto in varie città.

Una particolare tipologia di TOD è il *Development Assisted Transit* (trasporto pubblico finanziato dallo sviluppo immobiliare), spesso abbreviato in DAT. Si tratta di una strategia

¹¹² Guerra Erick and Cervero Robert, (2013) *Is a Half-Mile Circle the Right Standard for TODs?*, Access number 42.

¹¹³ Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

di finanziamento tramite la quale soggetti privati, proprietari di lotti o immobili, finanziano completamente o in parte la realizzazione di un servizio di trasporto collettivo per aumentare l'accessibilità, e quindi il valore, della loro area.

Dal punto di vista socio-economico, lo sviluppo di zone TOD riduce il costo medio della vita in quanto diminuisce il bisogno di possedere più auto per famiglia; inoltre, negli Stati Uniti, dove il problema dell'obesità è molto sentito, tale soluzione urbanistica è stata apprezzata anche perché "costringe" l'utente a effettuare degli spostamenti a piedi, anche se brevi. Dal punto di vista ambientale, le zone TOD comportano un minor consumo di territorio ed una marcata riduzione degli inquinanti locali e dei gas serra.

Esempi di TOD sono presenti a Delhi (India), Curitiba (Brasile) ed in molte città degli Stati Uniti. Esempi di *Development Assisted Transit* (DAT) si possono osservare ad Hong Kong, Christchurch (NZ), Portland (USA) e Bangalore (India)¹¹⁴.

In fig. 3.41¹¹⁵ è mostrata la visione aerea di un corridoio TOD Rosslyn-Ballston in Arlington, Virginia; sono evidenziate le fermate della metro e i quartieri ad alta densità sviluppatisi nel raggio di mezzo miglio.



Fig. 3.41 - Visione aerea del corridoio TOD Rosslyn-Ballston in Arlington, Virginia; sono evidenziate le fermate della metro e i quartieri ad alta densità sviluppatisi nel raggio di mezzo miglio.

¹¹⁴ Salter Robert, Dhar Subash, Newman Peter (2011), *Technologies for Climate Change Mitigation: Transport Sector*, TNA Guidebook Series.

¹¹⁵ www.wikipedia.com

Da uno studio australiano¹¹⁶ è emerso che una persona, che abita nelle zone suburbane a bassa densità, per i propri spostamenti produce al giorno 8-10 kgCO₂-eq o più, una persona invece che abita in una zona TOD causa emissioni per 0-4 kgCO₂-eq.

La pianificazione urbanistica orientata ai trasporti, risulta quindi essere una strategia fondamentale per la riduzione nel lungo termine delle emissioni in ambito urbano, in particolare se non vengono realizzate soluzioni innovative basate sull'uso di biocarburanti, di idrogeno o di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili.

¹¹⁶ Trubka Roman, Newman Peter and Bilsborough Darren, *Assessing the Costs of Alternative Development Paths in Australian Cities*, Curtin University Sustainability Policy Institute.

Parte IV - Conclusioni e scenari climatici futuri

I sistemi di trasporto costituiscono uno dei settori ove è possibile una buona mitigazione delle emissioni di gas serra con costi relativamente contenuti, in particolar modo se si considerano soluzioni per il breve-medio termine, quali strategie per migliorare l'efficienza energetica e per incentivare lo *shift* modale.

Un'efficace azione per limitare le emissioni, nel caso di trasporto di persone, consiste nell'incentivare l'uso dei mezzi di trasporto collettivi, quando sia presente una sufficiente domanda di spostamento, o i veicoli ibridi e il *carpooling* dinamico, ove invece la domanda è più debole. Nel caso del settore aereo, ove non sia possibile uno *shift* modale in favore del treno ad alta velocità, lo sviluppo della tipologia di aerei BWB (*Blended Wing Body*) e l'impiego di materiali innovativi leggeri, quali plastiche rinforzate al carbonio, rappresentano provvedimenti molto interessanti per migliorare l'efficienza energetica, in particolar modo qualora, in futuro, non ci sia un utilizzo considerevole di biocarburanti.

Più delicata risulta essere invece la questione del trasporto merci. Il trasporto su gomma dovrebbe essere utilizzato solo per la parte finale dello spostamento, nella quale è necessaria la massima flessibilità e capacità di penetrazione nel territorio. Nonostante le notevoli difficoltà iniziali di carattere economico e infrastrutturale, incentivare lo *shift* camion-treno o camion-nave rappresenta una necessità per abbattere le emissioni. Nel settore navale provvedimenti atti a limitare la velocità delle navi dovrebbero essere attuati quanto prima per le loro concrete potenzialità di mitigazione ed il costo ridotto. Soluzioni innovative come SkySails, debbono essere tenute in considerazione sia per i benefici ottenibili sia perché può essere applicata sia a navi in via di progettazione sia a navi già costruite.

Nel lungo termine è possibile spostare il problema della riduzione delle emissioni all'ambito energetico, ossia alla produzione di elettricità, idrogeno o biocarburanti. Questi ultimi, presentando vincoli solo di natura economica, nonostante alcuni autori affermino sia possibile produrre "bio-petrolio" (biocarburante grezzo) di terza generazione con costi attorno ai 20\$ al barile¹¹⁷, rappresentano una soluzione che permetterebbe riduzioni molto spinte delle emissioni con costi e tempi relativamente contenuti. Tuttavia, analizzando la questione ambientale nel suo complesso e considerando quindi anche gli inquinanti locali, i

¹¹⁷ Ayhan Demirbas, (2010): *Use of algae as biofuel sources*, Energy Conversion and Management.

veicoli elettrici o a *fuel cell* sono gli unici che permettono un abbattimento degli impatti ambientali totali. Nel trasporto navale ed aereo, ove il problema degli inquinanti locali è meno sentito, l'applicazione di biocarburante risulta essere una soluzione molto interessante in quanto non presenta particolari risvolti negativi. Da non escludere, nel lungo termine, la possibilità di un'applicazione combinata delle soluzioni: centrali termoelettriche alimentate a biocarburanti e veicoli stradali elettrici o a *fuel cell*. Inoltre, se il problema del cambiamento climatico dovesse risultare più grave di quanto ipotizzato, ad esempio per un feed-back dovuto al vapore acqueo più importante di quello previsto, un sistema di captazione e stoccaggio della CO₂ permetterebbe un bilancio complessivo di anidride carbonica emessa minore di zero.

Un altro contributo, indiretto ma determinante ai fini della riduzione delle emissioni di CO₂, potrebbe essere dato da pianificazioni urbanistiche orientate ai trasporti collettivi, che riducono sensibilmente gli spostamenti effettuati con veicoli privati, promuovendo così uno *shift* modale in favore del trasporto pubblico.

Sulla base di quanto esposto, si può osservare che il costo per tonnellata di CO₂ non emessa è, generalmente, tanto maggiore quanto più grande è la percentuale delle emissioni che ci si propone di abbattere. Ne deriverebbe una funzione dei costi, in relazione alla quantità di CO₂ non emessa, non lineare, strettamente crescente e, in genere, convessa. Per ottenere risultati a costi contenuti, risulterebbe quindi conveniente adottare il prima possibile delle politiche per il breve termine.

In conclusione, si può affermare che esistono soluzioni per una mitigazione delle emissioni e che, in alcuni casi, non hanno costi particolarmente elevati. Ne risulta che, almeno in ambito trasportistico, i vincoli principali all'applicazione di soluzioni per il breve termine non sono tanto di tipo tecnologico o economico, quanto invece conseguenti ad aspetti comportamentali e ad inerzia del sistema stesso. Una conferma di ciò è il valore di elasticità della domanda di benzina rispetto al prezzo, stimato -0,052 come precedentemente riportato. Considerando anche i risultati delle politiche VTBC (*Voluntary Travel Behaviour Change*), si può ritenere che, parallelamente a qualsiasi politica atta a limitare le emissioni di gas serra, sia essa di carattere tecnico o economico, debbano esserci anche azioni volte ad informare e sensibilizzare la popolazione sulle motivazioni e sulle finalità raggiungibili.

*Scenari climatici futuri*¹¹⁸

A conclusione della presente tesi si riporta in sintesi una previsione della situazione climatica del ventunesimo secolo effettuata dall'IPCC. In tale studio vengono presi in considerazione 4 scenari, chiamati RCP (*Representative Concentration Pathways*), che si basano sul valore del forzante radiativo globale previsto per il 2100 (numero seguente la sigla RCP, espresso in Wm^{-2}); esso è funzione delle emissioni previste e quindi delle politiche future per la mitigazione dell'effetto serra (fig.4.1). I 4 scenari sono:

- RCP2.6, scenario blu: si suppone una mitigazione molto spinta delle emissioni in tempi molto brevi. Dal punto di vista ambientale è lo scenario più ottimistico;
- RCP4.5, scenario azzurro: si ipotizzano provvedimenti concreti per limitare le emissioni a partire dalla prima metà del secolo. Il valore delle emissioni, a fine secolo, si stabilizza a circa 4 GtC (14,64 GtCO₂) all'anno;
- RCP6.0, scenario arancione: si ipotizzano, in un primo momento, provvedimenti atti a limitare leggermente le emissioni. Una mitigazione spinta è prevista poi solo negli ultimi decenni del secolo;
- RCP8.5, scenario rosso: si suppone che non venga adottata alcuna politica per limitare le emissioni di gas serra. Dal punto di vista ambientale è lo scenario peggiore.

¹¹⁸ I dati, le immagini e i contenuti presenti in questa parte sono tratti da: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013): *Climate Change 2013: the Physical Science Basis*, Cambridge University Press.

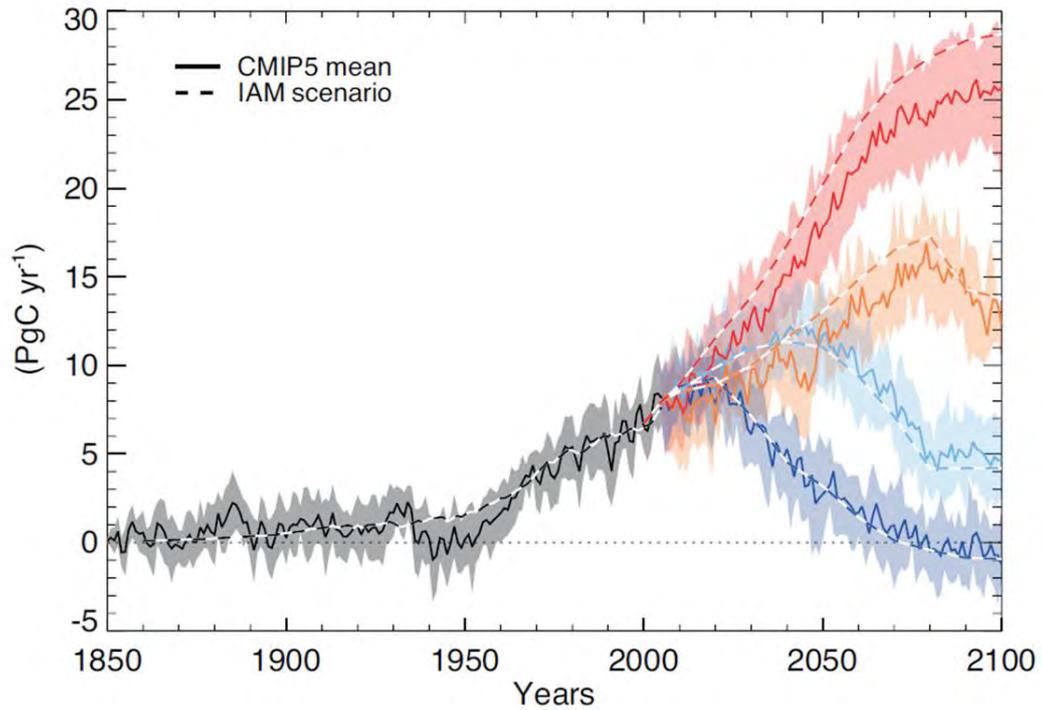


Fig. 4.1 - Previsioni delle emissioni di gas serra nei 4 scenari RCP, ottenuti con 2 modelli di calcolo differenti: l'IAM (*Integrated Assessment Model*) e il CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*), modello più dettagliato e complesso.

La fig. 4.2 Riporta la concentrazione di CO₂ in atmosfera e la variazione della temperatura media della superficie terrestre prevista nei 4 scenari RCP.

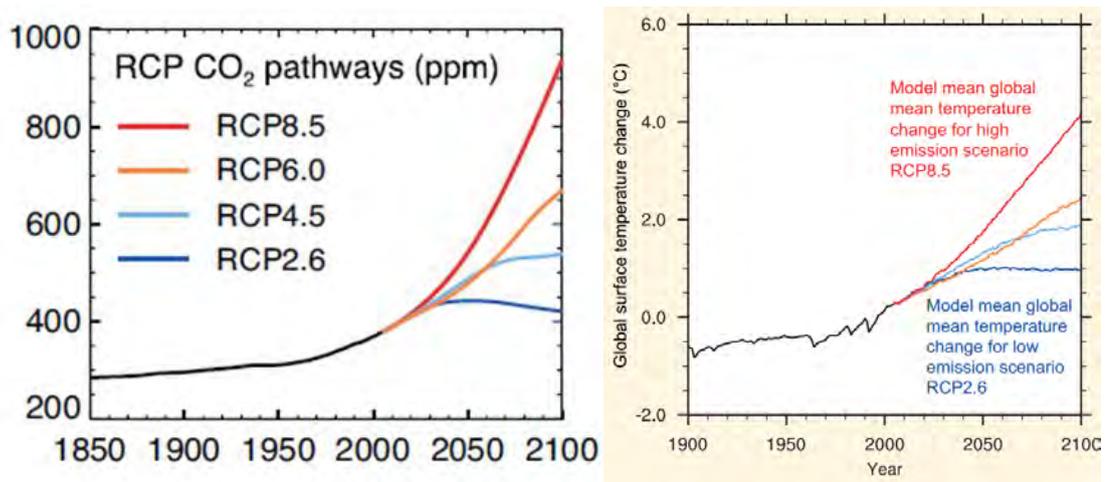


Fig. 4.2 - Concentrazione della CO₂ in atmosfera, a sinistra, e variazione della temperatura media della superficie terrestre, a destra, nei 4 scenari RCP.

In fig. 4.3 viene mostrata la variazione dell'assetto climatico del pianeta previsto per gli anni 2081-2100, sulla base della situazione rilevata negli anni 1986-2005, per i due scenari estremi RCP2.6 e RCP8.5. Vengono mostrati: la variazione della temperatura superficiale (a), la variazione percentuale della quantità di pioggia annuale (b), l'estensione della calotta polare artica (c) e la variazione del pH degli oceani (d). Drammatica risulta essere la situazione della calotta polare artica nello scenario RCP8.5.

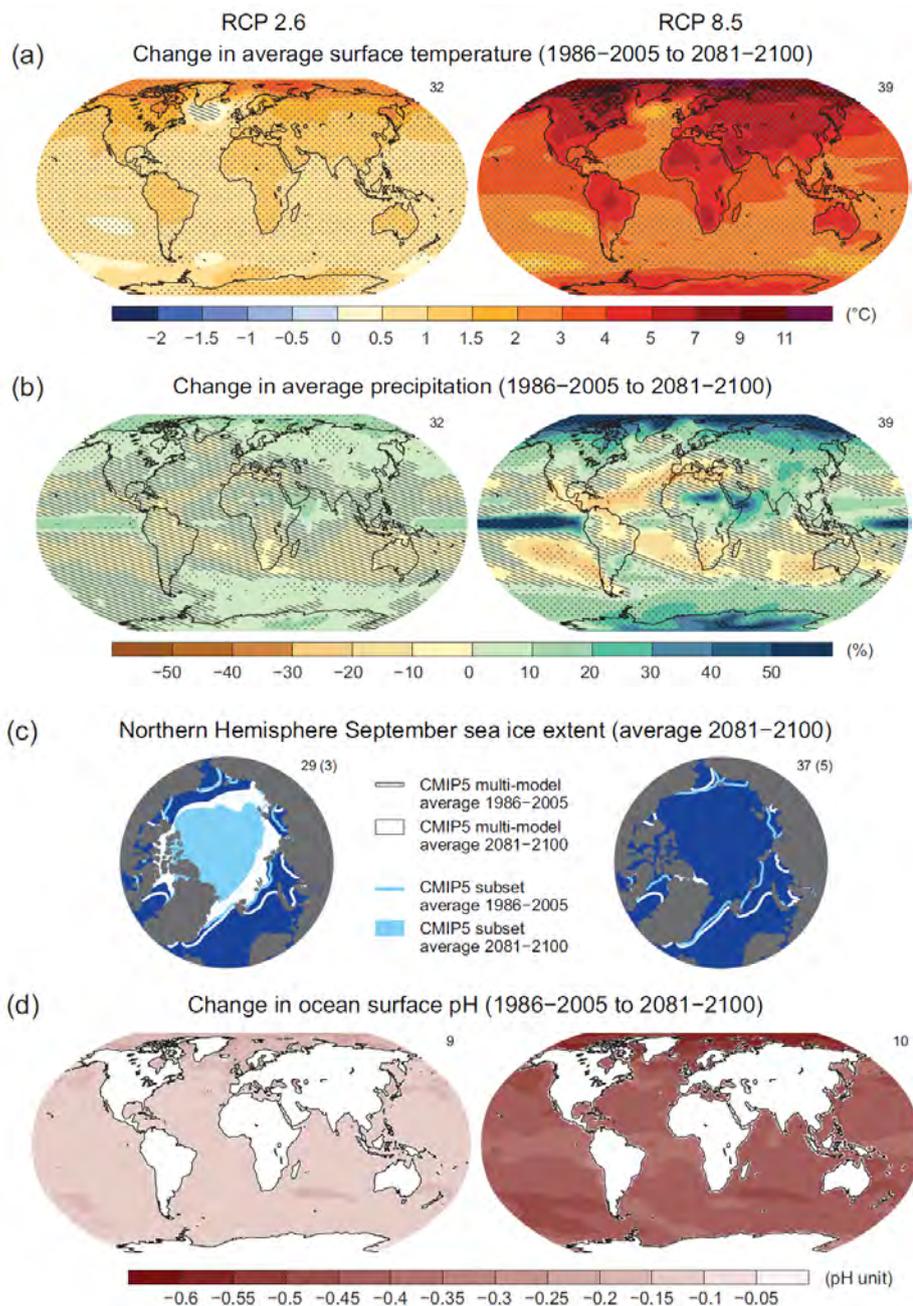


Fig. 4.3 - Variazione della temperatura superficiale (a), variazione percentuale della quantità di pioggia annuale (b), estensione della calotta polare artica (c) e variazione del PH degli oceani (d) negli scenari RCP2.6 e RCP8.5

In conclusione, a confermare l'importanza e la convenienza dell'abbattimento delle emissioni di gas serra, è particolarmente significativa la fig. 4.4, che mostra il tempo di ritorno futuro di una pioggia giornaliera, con tempo di ritorno attuale di 20 anni, nello scenario RCP8.5. Come si vede, in alcune zone, ad esempio tra Cina ed India, il tempo di ritorno futuro sarà circa un quinto di quello attuale; ne viene che, qualora non vengano adottate politiche concrete per limitare le emissioni di gas serra, saranno necessari importanti provvedimenti, dai costi molto elevati, per la salvaguardia idrogeologica del territorio in molte parti del mondo.

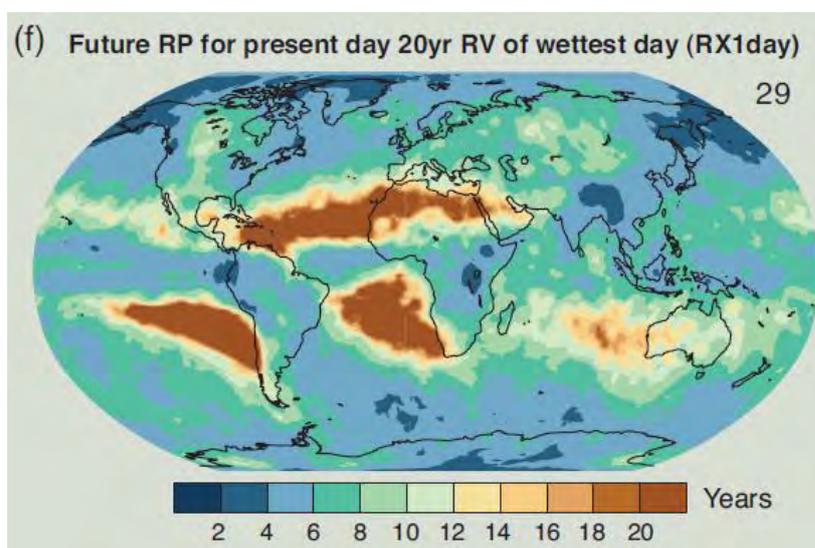


Fig. 4.4 - Tempo di ritorno futuro (tra il 2081 e il 2100) di una pioggia giornaliera con tempo di ritorno attuale di 20 anni nello scenario RCP8.5.

Pertanto, dato che l'anidride carbonica sviluppa il massimo del suo potenziale di riscaldamento (massimo della funzione AGTP) 20 anni dopo la sua emissione, risulta prioritario limitarne le emissioni oltre che per la salvaguardia dell'ambiente, anche per motivi economici, ma soprattutto per prevenire futuri stravolgimenti climatici, praticamente irreversibili.