

## Legenda

AE	Abitanti equivalenti; unità di misura utilizzata per misurare il carico organico trattato da un impianto di depurazione
AFOLU	<i>Agriculture, Forestry and Other Land Use</i> : settore dell'inventario IPCC che include le emissioni delle attività agricole e zootecniche e il riassorbimento forestale
AIA	Autorizzazione Integrata Ambientale
APAT	Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici
BOD <sub>5</sub>	Domanda Biologica di Ossigeno
LTO	<i>Landing and Take Off</i> : movimenti in aeroporto (atterraggio o decollo)
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Anidride carbonica
DGERM	Direzione Generale per l'Energia e le Risorse Minerarie del Ministero dello Sviluppo Economico
EMEP-CORINAIR	Linee guida europee per la redazione degli inventari delle emissioni
FAR	Fourth Assessment Report. Report IPCC 2007
FE	Fattore di emissione
GHG	Gas serra compresi dal Protocollo di Kyoto (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, HFC, PFC, SF <sub>6</sub> )
GWP	<i>Global Warming Potential</i> : potenziale di riscaldamento dell'atmosfera associato ad un gas serra
IFN	Inventario Forestale Nazionale
IFR	Inventario Forestale Regionale
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> : comitato internazionale sui cambiamenti climatici
LULUCF	<i>Land Use, Land use change and Forestry</i> : uso del suolo, cambiamenti dell'uso del suolo e selvicoltura
MNFE	Manuale Nazionale dei Fattori di Emissione
N <sub>2</sub> O	Protossido d'azoto
NMVOC	<i>Non Methan Volatil Organic Carbon</i> : composti organici volatili escluso il metano
ONU	Organizzazione delle Nazioni Unite
RSU	Rifiuti Solidi Urbani
TAR	<i>Third Assessment Report</i> : Report IPCC 2001
TEP	Tonnellata equivalente di petrolio
TIER	Livello di dettaglio usato per la stima delle emissioni.
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Chang</i> : Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> . Organizzazione internazionale di meteorologia

## Unità di Misura

Per la stima delle emissioni sono state utilizzate le unità di misura riportate di seguito. Le emissioni dell'intero inventario sono riportate solamente in tonnellate di equivalenti di anidride carbonica (t CO<sub>2eq</sub>).

Unità di misura	Ordine di grandezza
Gg o kt	10 <sup>9</sup> g
Mg o t	10 <sup>6</sup> g
kg	10 <sup>3</sup> g
g	1 g

## 1. Introduzione

### 1.1 Il Progetto REGES

Nel 1997 è stato firmato il Protocollo di Kyoto che, per ora, costituisce l'unico accordo internazionale attivo e vincolante per la lotta ai cambiamenti climatici. Poiché non erano stati raggiunti gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas serra fissati a Rio, si è resa necessaria l'adozione di questo protocollo più rigoroso per tener fede agli obiettivi.

Per assicurare il successo alle politiche di riduzione delle emissioni contenute nel Protocollo di Kyoto è sicuramente necessario iniziare fin da ora a discutere le politiche per il secondo periodo di impegno, compreso tra il 2013 e il 2017. L'Unione Europea si è impegnata fin dalla pubblicazione del report *"Limiting global climate change to 2 degrees Celsius - The way ahead for 2020 and beyond"*, nel gennaio 2007, a farsi promotrice e leader della lotta alla riduzione delle emissioni dei gas serra. I paesi dell'EU si sono impegnati a raggiungere una diminuzione autonoma e unilaterale delle proprie emissioni del 20% al 2020 e del 30% se altri paesi aderiranno a questo nuovo progetto.

Nonostante i nuovi obiettivi europei di riduzione siano ancora più stringenti, l'Italia presenta ad oggi un forte ritardo nel rispettare gli impegni presi aderendo al Protocollo di Kyoto. A fronte di un obbligo di riduzione delle emissioni del 6,5% rispetto al 1990, anno di riferimento, l'Italia, nel Rapporto annuale europeo sulla situazione delle emissioni dei gas serra riferito al 2007 (EEA, 2009), mostra un aumento del 7,1%, portando così complessivamente l'obiettivo di riduzione al 2012 al 15,1% rispetto al 1990 (Tabella 1.1.1).

Tabella 1.1.1: Emissioni di CO<sub>2eq</sub> in Italia e obiettivi del Protocollo di Kyoto (EEA, 2009).

Stato membro	Emissioni al 1990 (milioni di t)	Emissioni al 2007 (milioni di t)	Cambiamento 1990-2007 (%)	Obiettivo per il Burden Sharing (%)	Obiettivo totale (%)
Italia	516,3	552,8	7,1	-6,5	-15,1

Negli ultimi anni, a partire anche dalla 12° Conferenza dell'organo delle Parti tenutasi a Nairobi, è emersa la necessità di suddividere ulteriormente gli obiettivi

dalla scala nazionale a quella regionale, in modo da poter calibrare localmente gli interventi di riduzione delle emissioni in base alle potenzialità locali.

La possibilità di procedere verso un *burden sharing* (ripartizione della responsabilità nella riduzione delle emissioni) regionale sta prendendo piede in Italia (ENEA, 2008), ma non si è ancora arrivati ad una formalizzazione legislativa che chiarisca il ruolo degli enti locali nel raggiungimento degli obiettivi nazionali e il criterio di ripartizione della riduzione. Esiste già una proposta di *burden sharing* regionale nella Legge Finanziaria 2008, in merito alla ripartizione tra le regioni italiane degli obiettivi di generazione di energia elettrica da fonti di energia rinnovabile, individuati dalla direttiva 2001/77/CE.

Nell'attesa di una probabile ripartizione della responsabilità nella riduzione delle emissioni che coinvolga a livello territoriale Regioni, Province e Comuni italiani in una concreta azione nelle politiche per il clima, la Provincia di Siena si è dotata autonomamente di uno strumento di controllo e monitoraggio delle emissioni di gas serra prodotte sul suo territorio. A questo scopo è stato implementato il Progetto REGES "*Progetto per la verifica e la certificazione della Riduzione delle Emissioni di Gas a Effetto Serra per il territorio della Provincia di Siena*", realizzato in collaborazione con il gruppo di Ecodinamica del Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Siena, con la società RINA S.p.A. e con l'Agenzia Provinciale per l'Energia e l'Ambiente. Inoltre, la Provincia di Siena aveva già precedentemente previsto il controllo continuo delle tonnellate equivalenti di anidride carbonica per abitante nella procedura di monitoraggio della qualità dell'aria del Sistema di Gestione Ambientale, messo a punto sia per la certificazione ISO 14001 che per l'EMAS.

L'inventario dei gas serra costituisce lo strumento di monitoraggio e controllo delle emissioni dei gas climalteranti poiché individua le sorgenti delle emissioni dei più importanti gas a effetto serra rilasciati in atmosfera. L'elaborazione di un inventario ha, perciò, lo scopo di verificare il raggiungimento degli obiettivi d'abbattimento delle emissioni che, con cadenza annuale, ogni nazione aderente al Protocollo di Kyoto si prefissa di raggiungere. Questo strumento è applicabile anche ad una scala territoriale inferiore a quella nazionale e permette di calibrare l'applicazione degli interventi di riduzione delle emissioni alle principali fonti individuate.

Per la Provincia di Siena sono anche disponibili inventari delle emissioni dei gas serra a scala provinciale, prodotti per disaggregazione delle emissioni dell'inventario

nazionale (elaborato dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale - ISPRA) e dell'Inventario Regionale Sorgenti delle Emissioni (IRSE, 2003).

Il Progetto REGES nasce per quantificare le emissioni causate da gas serra e ridurre l'inquinamento attraverso il monitoraggio dell'andamento delle emissioni in atmosfera nel tempo. L'inventario contenuto nel primo report, realizzato nel 2008 e con dati riferiti al 2006, costituisce la *baseline*, l'anno di riferimento, sul quale calibrare e verificare le successive scelte per la riduzione delle emissioni. L'inventario presentato nel presente (secondo) report, invece, si riferisce al 2007 ed è utile per confrontare la variazione dei gas serra rilasciati in atmosfera, per poi verificare se queste variazioni sono dovute all'attuazione di politiche per la tutela dell'ambiente e del clima, a cambiamenti di uso del suolo, a trasformazioni nelle abitudini dei cittadini.

Negli inventari nazionali e in quello regionale le emissioni alla scala locale sono state stimate a partire dalla disaggregazione di quelle della scala maggiore, il che comporta un margine di errore maggiore. Nei due inventari elaborati per la realizzazione del Progetto REGES, invece, i dati sono raccolti direttamente a scala locale.

## **1.2 Quadro di riferimento dell'applicazione dell'inventario dei gas serra**

L'inventario dei gas serra della Provincia di Siena è stato elaborato per l'anno 2007, includendo le emissioni prodotte sia direttamente che indirettamente nel territorio. L'analisi condotta prevede anche un confronto con le emissioni dell'anno 2006, elaborato nel precedente inventario e considerato come anno di riferimento storico.

L'inventario dei gas serra può essere elaborato secondo varie metodologie; in questo studio sono state adottate le Linee Guida IPCC "2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse gas inventories" utilizzate a livello nazionale per la redazione annuale degli inventari dei gas serra dei paesi aderenti al protocollo di Kyoto. La scelta dei dati di attività, dei fattori di emissione e la spiegazione di alcune sorgenti di emissione trascurate è riportata in ogni settore dell'inventario.

La corrispondenza tra la suddivisione delle categorie di emissione della norma ISO 14064 e della metodologia IPCC è riportata in Tabella 1.2.1.

Tabella 1.2.1: Corrispondenza tra le categorie di emissione della norma ISO 14064 e della metodologia IPCC 2006.

ISO 14064	2006 IPCC
Emissioni dirette	Settore energia - prodotta in loco Assorbimento forestale e agricolo
Emissioni indirette	Energia importata
Altre emissioni indirette	Settore industria Settore agricoltura Settore rifiuti

### 1.3 L'inventario dei gas serra secondo le linee guida IPCC

L'inventario delle emissioni dei gas serra costituisce un particolare esempio di inventario delle emissioni, strumento utilizzato per monitorare la qualità dell'aria e per pianificare interventi di abbattimento degli inquinanti atmosferici, specialmente in ambito industriale e urbano.

Mentre gli scopi di un generico inventario delle emissioni sono frequentemente legati agli obiettivi di qualità dell'aria e agli impatti locali degli inquinanti, un inventario dei gas serra non si propone obiettivi puramente locali, ma vuole quantificare le responsabilità di un territorio rispetto ad un problema globale come il cambiamento climatico, anche in vista di possibili miglioramenti.

“Un inventario delle emissioni è una serie organizzata di dati relativi alla quantità di inquinanti introdotti in atmosfera da sorgenti naturali e/o antropiche”, come specificato nel D.M. del 20/05/91 “Criteri per l’elaborazione dei piani regionali per il risanamento e la tutela della qualità dell’aria”. L’obiettivo di un inventario delle emissioni è quindi quello di individuare le sorgenti territoriali di emissione e di ottenere una stima delle emissioni e un’incertezza associata alla stima che sia la più bassa possibile (IPCC, 2000).

L'inventario prevede la stima delle emissioni e delle rimozioni antropiche dei gas serra regolamentati dal Protocollo di Kyoto: l’anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), il metano (CH<sub>4</sub>), il protossido d’azoto (N<sub>2</sub>O), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC) e l’esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>). Nel presente inventario sono state trascurate le emissioni dei gas fluorurati (HFC, PFC, SF<sub>6</sub>) in quanto, anche a livello nazionale, essi contribuiscono per meno dell’1% sul totale delle emissioni (APAT, 2008). Inoltre sul territorio provinciale non sono presenti impianti dell’industria chimica per la

produzione di sostanze fluorurate o grandi industrie elettroniche nelle quali vengono utilizzati questi gas come materie prime in input.

Le emissioni dei diversi gas serra inclusi nell'inventario hanno effetti differenti sul riscaldamento della troposfera. Per riportarli ad un'unica unità di misura, si utilizzano coefficienti di conversione basati sul potenziale di riscaldamento globale indotto sulla troposfera da ogni gas rispetto a quello della CO<sub>2</sub>, usata quindi come unità di riferimento. Questo coefficiente è detto *Global Warming Potential (GWP)* e dal punto di vista chimico-fisico costituisce la misura del contributo nel lungo termine di un gas al riscaldamento globale. Questo indice è ponderato sulla base del tempo di vita atmosferico del gas e della sua capacità di assorbire la radiazione infrarossa emessa dalla Terra. I GWP sono calcolati dall'IPCC e riportati negli *Assessment Report*, con un aggiornamento effettuato circa ogni 6 anni in base alle nuove conoscenze acquisite. L'adeguatezza di questo indice è stata dibattuta fin dalla sua introduzione poiché due set di emissioni che possono essere uguali in termini di equivalenti di CO<sub>2</sub> (CO<sub>2eq</sub>) calcolati con i GWP, possono avere effetti non equivalenti sul clima della troposfera (Fuglestad, 2000; Smith et al., 2000). Nonostante siano stati proposti degli approcci alternativi, il GWP rimane al momento la migliore unità di misura per confrontare l'impatto dei gas serra *long lived* (O'Neill, 2003). I valori indicati nell'ultimo rapporto, il *Fourth Assessment Report (IPCC, 2007)* sono presentati in Tabella 1.3.1.

Tabella 1.3.1: Valori di GWP stabiliti dall'IPCC nel *Fourth Assessment Report, 2007*.

Gas serra	Tempo di vita anni	Efficienza radiativa W (m <sup>-2</sup> ppb <sup>-1</sup> )	Global Warming Potential per orizzonte temporale		
			20 anni	100 anni	500 anni
CO <sub>2</sub>	200	1,40 × 10 <sup>-5</sup>	1	1	1
CH <sub>4</sub>	12	3,70 × 10 <sup>-4</sup>	72	25	7,6
N <sub>2</sub> O	114	3,03 × 10 <sup>-3</sup>	289	298	153
SF <sub>6</sub>	3.200	0,52	16.300	22.800	32.600
CHF <sub>3</sub>	270	0,19	12.000	14.800	12.200
PFC-14	50.000	0,10	5.210	7.390	11.200

Per il calcolo delle emissioni nel presente inventario sono stati utilizzati i GWP con orizzonte temporale pari a 100 anni, perché è un periodo di tempo adeguatamente lungo per proiettare gli effetti delle nostre azioni di risanamento sulle problematiche ambientali.

La contabilizzazione delle emissioni della metodologia IPCC prevede la suddivisione in macrosettori e poi in categorie, come è riportato sinteticamente in Figura 1.3.1.

Lo studio è volto ad individuare, all'interno di ogni settore, le sorgenti di emissione riscontrabili sul territorio, seguendo rigorosamente la metodologia IPCC e in maniera tale da fornire un bilancio del tutto confrontabile con quello di altre realtà nazionali e mondiali.

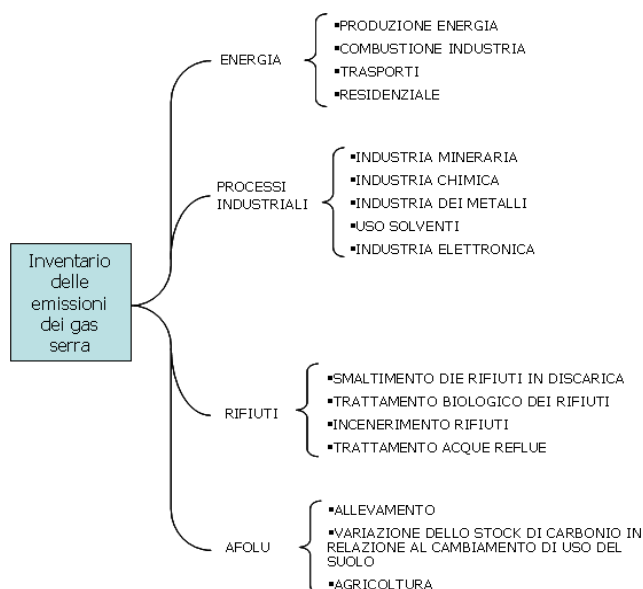


Figura 1.3.1: Schema di lavoro per il bilancio dei gas serra.

Le emissioni di gas serra in un territorio sono inventariate in base alla categoria di emissione di provenienza. La metodologia IPCC suddivide le emissioni in 4 macrosettori, illustrati in Figura 1.3.1 e presentati di seguito.

### 1) SETTORE ENERGIA

Il settore energia è generalmente il settore più importante in un inventario dei gas serra e contribuisce solitamente per oltre il 90% della CO<sub>2</sub> e il 75% delle emissioni totali di gas serra nei paesi industrializzati. Comprende al suo interno tutte le emissioni causate dalla produzione di energia e include, quindi, sia gli impianti per la produzione di energia elettrica, che la combustione diretta dei combustibili fossili utilizzati per il trasporto, il riscaldamento, e per il settore industriale.

Le emissioni sono suddivise in due tipologie a seconda della sorgente:

1. Combustione di combustibili fossili (trasporto, riscaldamento, industria);
2. Produzione e consumo di energia elettrica.

### 2) SETTORE PROCESSI INDUSTRIALI



I gas serra sono prodotti da un'ampia varietà di attività industriali. È esclusa da questa sezione l'industria per l'energia, già trattata nel settore precedente. Le principali emissioni provengono da processi industriali di produzione, durante i quali le materie prime subiscono trasformazioni fisiche e/o chimiche. Durante questi processi possono essere rilasciati molti gas serra quali CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e HFC, PFC, SF<sub>6</sub>.

### **3) SETTORE RIFIUTI**

Il settore rifiuti comprende la stima delle emissioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, e N<sub>2</sub>O dai seguenti processi:

1. Smaltimento in discarica;
2. Trattamento biologico dei rifiuti (digestione e compostaggio);
3. Incenerimento dei rifiuti (ove non sia previsto il recupero energetico);
4. Trattamento delle acque reflue.

### **4) SETTORE AGRICOLTURA, FORESTE E USO DEL SUOLO (AFOLU)**

Il settore agricoltura, foreste e uso del suolo può essere suddiviso nelle seguenti categorie:

1. Cambiamento di uso del suolo;
2. Variazione dello stock di carbonio in biomassa, lettiera e suolo, per ogni categoria di uso del suolo individuata;
3. Allevamento degli animali e gestione delle deiezioni prodotte;
4. Emissioni dirette e indirette da addizione di azoto al suolo.

In questo settore è contabilizzato l'assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte delle foreste e delle colture perenni all'interno della seconda categoria, come variazione dello stock di carbonio nella biomassa.

Alcune assunzioni generali suggerite dall'IPCC (2007) che vengono seguite in questo studio sono:

- le emissioni causate dal traffico internazionale aereo e navale non devono essere incluse nel totale, ma riportate separatamente;
- le emissioni di CO<sub>2</sub> derivanti dal traffico veicolare devono essere attribuite al paese dove sono stati venduti i carburanti;
- le emissioni relative al carbonio stoccato in prodotti non combustibili sono contabilizzate nel momento e nel luogo del rilascio (ad esempio durante l'incenerimento dei rifiuti);

- le emissioni causate dalla combustione delle biomasse sono considerate nel settore AFOLU come parte del cambiamento dello stock di carbonio.

#### 1.4 Aggiornamento dell'inventario delle emissioni

L'inventario presentato in questo report è stato realizzato in serie storica, pertanto la metodologia e le fonti dei dati utilizzati sono coerenti con lo studio precedente (Progetto REGES, 2008). La scelta delle fonti dei dati di attività, dei fattori di emissione e della metodologia per il trattamento dei dati è stata specificata e motivata per ogni categoria di emissione, in modo da ottenere delle stime trasparenti e riproducibili e facilitare il periodico aggiornamento.

Nel capitolo 3 sono state definite le *key categories*, ovvero quelle categorie di emissione responsabili del 95% delle emissioni totali (Tier 1) o del 95% dell'incertezza (Tier 2). Dopo aver determinato le *key categories* è stata valutata l'incertezza relativa alle categorie di emissione individuate e l'incertezza associata all'intero inventario.

## 2. Inventario dei Gas serra

### 2.1 La stima delle emissioni

Ai fini della redazione dell'inventario dei gas serra sono stati raccolti i dati di tutte le principali attività potenzialmente responsabili di emissioni, collocate all'interno del territorio della Provincia di Siena, seguendo un criterio misto, geografico e della responsabilità delle emissioni prodotte. I dati raccolti per settore di emissione costituiscono lo stato dell'arte delle attività connesse alle emissioni in atmosfera della Provincia di Siena al 2007 e hanno permesso la stima delle emissioni prodotte.

Di seguito sono presentati i dati raccolti, la metodologia di calcolo delle emissioni e i risultati conseguiti per ognuno dei 4 macrosettori di cui è composto l'inventario dei gas serra IPCC, naturalmente messi a confronto con quelli dell'inventario al 2006, così da poter costruire una serie storica dei dati e permettere l'osservazione dell'andamento delle emissioni nel tempo, nonché l'uso dell'inventario dei gas serra come uno strumento di verifica di eventuali azioni intraprese per il raggiungimento degli obiettivi di riduzione delle emissioni.

La stima delle emissioni è stata eseguita in modo diversificato a seconda della tipologia delle sorgenti:

- per le sorgenti puntuali è possibile riportare direttamente il dato di emissione, sulla base delle dichiarazioni delle singole aziende o delle misurazioni effettuate. Nel caso di mancanza di dati in riferimento ad uno specifico inquinante è stato possibile stimare i dati sulla base di opportuni fattori di emissione;
- per le sorgenti lineari e areali le emissioni sono state stimate su base territoriale utilizzando il seguente approccio:

$$E/\text{anno} = A \times FE$$

dove:

E = emissioni (in kg di inquinante)

A = dato dell'attività

FE = fattore di emissione per unità di attività e per specifico inquinante

Ad ogni attività la metodologia associa un fattore di emissione (FE). Questo rappresenta un coefficiente che quantifica il tasso di emissione o di rimozione di un

gas per unità di attività. I fattori di emissione sono spesso basati su misure sperimentali, mediate a loro volta per ottenere un tasso di emissioni standard per determinate condizioni, che restituisca la quantità di gas serra generata per unità iniziale individuata.

La scelta dei fattori di emissione rappresenta una delle criticità maggiori nella stima delle emissioni; la metodologia IPCC fornisce, nella sua forma semplificata di calcolo, i fattori di emissione di *default* da utilizzare in mancanza di riferimenti specifici per la scala nazionale o inferiore. I valori di *default* presenti nei manuali IPCC costituiscono tuttavia dei valori medi per macroaree, che possono portare a grandi sovrastime o sottostime, perché propri di situazioni lontane da quelle dell'Italia. La scelta di utilizzare fattori di emissione locali e aggiornati è fortemente consigliata nei manuali IPCC, al fine di rendere realistica la stima delle emissioni per ogni preciso contesto geografico. In questo studio è stato adottato il “Manuale Nazionale dei Fattori di Emissione” (APAT, 2002), utilizzato anche per la redazione dell'inventario annuale a scala nazionale, il quale si appoggia comunque sui database internazionali, frequentemente aggiornati dall'IPCC e dall'agenzia europea EMEP/CORINAIR (EMEP/CORINAIR, 2007). Il manuale APAT è stato successivamente riportato e aggiornato sul sito internet INVENTARIA dell'APAT, dove è inserito il database dei fattori di emissione utilizzati per l'inventario nazionale (<http://www.sinanet.apat.it/it/inventaria/disaggregazione-2000/db>), i cui valori in molti casi sono rimasti invariati rispetto a quelli riportati sul “Manuale Nazionale dei Fattori di Emissione” del 2002 ed è per questo motivo che abbiamo scelto di attingere i fattori di emissione da questo manuale per la realizzazione dell'Inventario.

Le linee guida IPCC 2006 individuano vari gradi di dettaglio (Tier) nel calcolo delle emissioni e nella scelta dei fattori di emissione, a seconda della disponibilità locale delle informazioni. Il primo livello di approssimazione del calcolo, il Tier 1, prevede un approccio *top-down* nella raccolta dei dati, mentre il secondo e il terzo livello di dettaglio, i Tiers 2 e 3, seguono un approccio *bottom-up*.

Gli inventari della Provincia di Siena realizzati per il Progetto REGES sono basati su un approccio *bottom-up*: per ciò che riguarda i dati di attività sono stati resi disponibili dati a scala provinciale, mentre i fattori di emissione sono basati su valori di letteratura.

### *Criterio adottato nell'attribuzione delle emissioni*

Il criterio proprio della metodologia IPCC è di tipo geografico, ovvero prevede la contabilizzazione di tutte le emissioni relative alle attività che si svolgono all'interno di determinati confini. Il calcolo delle emissioni prodotte da un certo territorio, tuttavia, può essere seguito non solo prendendo in considerazione quelle effettivamente generate all'interno dei suoi confini territoriali, ma anche quelle generate all'esterno di tale area, ovunque esse avvengano, purché riconducibili ad attività svolte nel territorio di partenza: il principio geografico viene così sostituito dal principio di responsabilità. Il principio di responsabilità richiede che si considerino le emissioni che derivano dagli usi finali dell'energia attribuibili ad attività localizzate nell'area selezionata, sia che la loro produzione avvenga all'interno dell'area stessa, che oltre i suoi confini. È chiaro che maggiore è la dimensione dell'area, più simili saranno i risultati a cui si perviene con le diverse metodologie di calcolo, fino a identificarsi a scala nazionale.

La metodologia IPCC è stata predisposta per la scala nazionale, ovvero la scala alla quale sono poi applicati gli obblighi di riduzione dei gas serra stabiliti dal protocollo di Kyoto. Adottando questa metodologia a una scala più piccola, regionale, provinciale o comunale può essere opportuno utilizzare un criterio misto, geografico e di responsabilità, poiché al diminuire della scala aumentano gli scambi con l'esterno del sistema considerato e il solo criterio geografico può dar luogo a conclusioni che possono sovrastimare o sottostimare la realtà. Questo approccio è consigliato anche nelle "Linee guida agli inventari locali di emissioni in atmosfera" prodotte dal Centro Tematico Atmosferico, Clima ed Emissioni (APAT, 2001).

Come per l'inventario che costituisce la *baseline* di riferimento, è stato applicato alla Provincia di Siena un criterio misto di attribuzione delle emissioni e sono stati creati due scenari di attribuzione delle emissioni dei prodotti legnosi forestali.

Nel *primo scenario* è stato deciso di procedere secondo la metodologia IPCC, seguita anche da APAT nella redazione annuale dell'inventario nazionale delle emissioni dei gas serra, che prevede di detrarre completamente il carbonio contenuto nella biomassa forestale asportata con le utilizzazioni forestali da quello guadagnato nell'accrescimento annuale delle foreste. Seguendo questo approccio non si tiene conto del carbonio immagazzinato nei prodotti legnosi, nonostante che l'impiego finale di molti prodotti legnosi consenta di espandere, anche se temporaneamente, la funzione fissativa dell'anidride carbonica da parte delle piante.

Nel *secondo scenario*, che è quello adottato per il bilancio finale delle emissioni, è stato deciso di considerare il destino delle utilizzazioni forestali prodotte nel 2007 in Provincia di Siena e di valutarle in base al luogo di utilizzo dei prodotti legnosi. Questo scenario è stato poi utilizzato per l'elaborazione del bilancio delle emissioni e degli indicatori sintetici prodotti.

Le competenze della Provincia di Siena in tema di energia derivano dall'art. 31-2°c. del D.Lgs. 112/98 e dalla L.R. 88/1988. Sulla base di queste normative, in via volontaria ed in coerenza con la propria politica ambientale, la Provincia di Siena ha approvato il vigente Piano Energetico Provinciale con D.C.P. n. 13 del 04.02.2003. La successiva L. 239/2004 e la conseguente legge di delega L.R. 39/2005, attribuiscono alle province ulteriori competenze anche relative all'autorizzazione di impianti per la produzione di energia da fonte rinnovabile. Il recente Piano di indirizzo Energetico Regionale P.I.E.R. della Regione Toscana, approvato con D.C.R. 47/2008 riconosce alle province un ruolo di programmazione coordinato con quello regionale e sulla base di tale considerazione potranno essere attribuite alle province (per legge) ulteriori competenze anche relativamente al raggiungimento degli obiettivi regionali nell'ottica del riparto della quota minima di incremento dell'energia prodotta da fonte rinnovabile così come prevista dalla Legge Finanziaria per il 2008 e dal D.Lgs. 115/2008.

Per questo motivo si è deciso di seguire il criterio geografico di attribuzione delle emissioni sia per il consumo di energia elettrica che per il consumo di prodotti petroliferi. Per il consumo di energia elettrica questo ha significato considerare il consumo provinciale soddisfatto, in primo luogo, dalla produzione locale e poi, per la parte non coperta, dall'energia importata dalla rete nazionale di distribuzione.

## 2.2 II SETTORE ENERGIA

Nel caso dell'inventario della Provincia di Siena le emissioni sono state suddivise in:

- Combustione diretta da combustibili fossili;
- Produzione e consumo di energia elettrica.

Questo è il quadro generale per le categorie di emissione incluse nel Settore Energia (Tabella 2.2.1):

Tabella 2.2.1 Categorie di emissione incluse nel Settore Energia.

Gas serra	Categoria di emissione	Fonte del dato di attività	Fonte FE
CO <sub>2</sub>	Trasporto su strada	D.G.E.R.M.	IPCC
CO <sub>2</sub>	Trasporto aereo	BP, Aeroporto di Ampugnano	IPCC
CO <sub>2</sub>	Riscaldamento	D.G.E.R.M.	IPCC
CO <sub>2</sub>	Industria	D.G.E.R.M.	IPCC
CO <sub>2</sub>	Produzione energia elettrica da rifiuti	Sienambiente	IPCC
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	Terna, Enel, Sienambiente	calcolato
CH <sub>4</sub>	Trasporto su strada	D.G.E.R.M.	IPCC
CH <sub>4</sub>	Trasporto aereo	BP, Aeroporto di Ampugnano	IPCC
CH <sub>4</sub>	Riscaldamento	D.G.E.R.M.	IPCC
CH <sub>4</sub>	Industria	D.G.E.R.M.	IPCC
N <sub>2</sub> O	Trasporto su strada	D.G.E.R.M.	IPCC
N <sub>2</sub> O	Trasporto aereo	BP, Aeroporto di Ampugnano	IPCC
N <sub>2</sub> O	Riscaldamento	D.G.E.R.M.	IPCC
N <sub>2</sub> O	Industria	D.G.E.R.M.	IPCC

Le fonti dei dati, le categorie di attività e i fattori di emissione considerati per i calcoli delle stime delle emissioni per l'anno 2007 sono identiche a quelle utilizzate per il 2006.

### *Emissioni da combustione di combustibili fossili*

I prodotti petroliferi inclusi nell'inventario sono elencati nella prima colonna della Tabella 2.2.2 e i consumi sono espressi in tonnellate (t) di combustibile.

È stato utilizzato come dato di attività per la stima delle emissioni quello delle vendite dei prodotti petroliferi, dato registrato nel Bollettino Petrolifero dal Dipartimento Generale Energia e Risorse Minerarie (D.G.E.R.M., <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/>) e disponibile a scala provinciale. Per quanto riguarda il consumo di kerosene e benzina d'aviazione (AV gas) per il trasporto aereo, sono stati richiesti i dati di vendita di combustibile alla Società Petrolifera AIR BP Carburanti, fornitrice nel 2007 di kerosene Jet A1 e di AV gas per l'aeroporto di Ampugnano (Siena). La variazione percentuale nel consumo dei differenti combustibili tra il 2006 e il 2007 è riportata in Tabella 2.2.2. La complessiva diminuzione dei consumi nel 2007 è probabilmente associata al forte

aumento del prezzo del petrolio avvenuta proprio in quel periodo, fattore che ha influenzato tutti i settori e in maniera particolare quello energetico.

Tabella 2.2.2: Tonnellate di combustibile venduto nella Provincia di Siena e variazione percentuale dei consumi tra il 2006 ed il 2007 (Dati D.G.E.R.M.).

Combustibile	2006	2007	Variazione 2006-2007
Benzina	64.628	58.052	-10,2%
Gasolio	174.801	167.145	-4,4%
GPL	19.057	16.818	-11,7%
Olio combustibile	4.132	4.071	-1,5%
Lubrificanti	1.834	1.624	-11,5%
Jet Kerosene	241	217	-10,0%
AV gas	0	113	---
Gas naturale	139.278	130.098	-6,6%

In Tabella 2.2.3 sono indicati i consumi di combustibile utilizzato per il trasporto su strada suddivisi per categoria: autotrazione privata, autostradale ed extra-rete. Come si può osservare, nel 2007 c'è stata una diminuzione netta delle vendite di tutti i combustibili utilizzati per la mobilità dei mezzi di trasporto rispetto all'anno precedente, ad eccezione delle tonnellate di gasolio utilizzato per l'autotrazione privata e per quella autostradale. L'extra-rete, che comprende in massima parte i carburanti utilizzati per i trasporti pubblici, inclusi anche i consumi di gasolio delle locomotrici per il trasporto ferroviario, ha visto una diminuzione di circa il 14% di benzina e il 10% per il gasolio rispetto al 2006.

Tabella 2.2.3: Vendite provinciali di prodotti petroliferi per il trasporto espresse in tonnellate e confronto tra il 2006 ed il 2007 (Dati D.G.E.R.M.).

GPL	Totale	Autotrazione	Autotrazione rete		
2006	2.768	1.608	1.160		
2007	2.693	1.564	1.129		
Variazione	-2,7%	-2,7%	-2,7%		
BENZINA	Totale	Rete ordinaria	Rete autostradale	Extra-rete	
2006	64.628	60.465	3.197	966	
2007	58.052	54.423	2.795	834	
Variazione	-10,2%	-10,0%	-12,6%	-13,7%	
GASOLIO	Totale (escl. Agricolo)	Rete ordinaria	Rete autostradale	Extra rete	Agricolo
2006	139.185	85.120	17.966	36.099	23.021
2007	137.102	85.861	18.651	32.590	19.884
Variazione	-1,5%	0,9%	3,8%	-9,7%	-13,6%

La benzina è il combustibile che ha subito maggiormente la diminuzione delle vendite, con una variazione percentuale di circa il 10%, rispetto agli altri combustibili



utilizzati per il trasporto su strada, sia privato che pubblico. Nella Tabella 2.2.3 è inserito anche il consumo di gasolio per le attività agricole, la cui variazione percentuale ammonta a circa il 13% in meno rispetto all'anno precedente.

I dati sul gas metano venduto nel 2007 sono stati convertiti da Sm<sup>3</sup> a Nm<sup>3</sup> e poi a tonnellate utilizzando come densità il fattore 0,7174 kg/Nm<sup>3</sup>. Il confronto del consumo delle tonnellate di metano utilizzate nel 2007 per i differenti settori di attività rispetto all'anno di riferimento è riportato nella Tabella 2.2.4. Anche in questo caso, si osserva una diminuzione delle vendite complessive di metano, comprese quelle per il riscaldamento residenziale e del terziario.

Tabella 2.2.4: Tonnellate di metano vendute nel 2006 e nel 2007 e loro variazione percentuale (Dati D.G.E.R.M. su dati Snam Rete Gas).

<b>Gas naturale</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>Variazione 2006-2007</b>
Industriale	9.725	9.235	-5,0%
Termoelettrico	0	0	---
Reti di distribuzione	129.554	120.863	-6,7%
<b>Totale</b>	<b>139.278</b>	<b>130.098</b>	<b>-6,6%</b>

Per quanto riguarda i combustibili per riscaldamento, le vendite provinciali sono riportate in Tabella 2.2.5. Possiamo supporre che la diminuzione del consumo dei combustibili per questo settore sia principalmente correlabile ad una temperatura media invernale di circa 5°C più alta rispetto alla media degli ultimi dieci anni (Regione Toscana, 2008).

Tabella 2.2.5 Vendite di combustibili utilizzati per il riscaldamento domestico e terziario e loro variazione percentuale tra il 2006 ed il 2007 (Dati D.G.E.R.M.).

<b>Riscaldamento</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>Variazione 2006-2007</b>
	<b>t</b>	<b>t</b>	<b>%</b>
Gasolio	12.595	10.159	-19,3%
GPL	16.289	14.125	-13,3%
Metano	129.554	120.863	-6,7%

Sono stati condotti studi sulla correlazione tra i dati delle vendite registrate dal Bollettino Petrolifero del Ministero delle Attività produttive e i consumi effettivi all'interno di un determinato territorio (Cesarini, 2007), specialmente su scala provinciale e comunale. Spesso il confronto dei due set di dati ha dimostrato che la vendita di combustibili non è direttamente correlabile con il consumo effettivo nei confini territoriali. Nonostante questo, per la realizzazione dell'inventario è stato scelto di utilizzare i dati di vendita dei prodotti petroliferi in mancanza di dati

sull'effettivo consumo locale, nel rispetto della metodologia IPCC, basata sulla vendita dei combustibili.

Di seguito sono riportati i dati di attività utilizzati per la stima delle emissioni, ovvero le quantità di combustibili fossili venduti in Provincia di Siena nel 2007 (Tabella 2.2.6).

Tabella 2.2.6: Vendite provinciali di combustibili fossili al 2007 (Dati D.G.E.R.M.).

Utilizzo	Trasporto	Riscaldamento	Agricolo	Industria	Totale
	t	t	t	t	t
Benzina	58.052				58.052
Gasolio	137.102	10.159	19.884		167.145
GPL	2.693	14.125			16.818
Olio comb.				4.071	4.071
Lubrificanti	94			1.530	1.624
Gas naturale		120.863		9.235	130.098
Kerosene	217				217
AV gas	113				113

La metodologia di calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> prevede la conversione delle migliaia di tonnellate (10<sup>3</sup> t o kt) di combustibile in terajoule (TJ), attraverso l'utilizzo del potere calorifico inferiore (pci); questo valore viene quindi moltiplicato per il fattore di emissione in t CO<sub>2</sub> per TJ, che tiene conto del contenuto in carbonio del singolo combustibile, assumendo un fattore di ossidazione pari al 100%, secondo quanto consigliato nelle linee guida IPCC 2006. Questa assunzione è differente da quella riportata nelle Linee Guida IPCC 1996, dove la percentuale di ossidazione era impostata al 99% per i liquidi e a 99,5% per tutti gli altri combustibili. Formalmente, l'equazione generale per il calcolo delle emissioni di CO<sub>2</sub> è la seguente:

$$Emissioni\ CO_2 = kt\ combustibile \times pci\ (TJ/kt) \times fattore\ di\ emissione\ (t\ CO_2/TJ)$$

In Tabella 2.2.7 sono riportati i poteri calorifici per la conversione da migliaia di tonnellate a TJ e il contenuto percentuale in carbonio di ogni combustibile; per entrambi i parametri di conversione sono stati utilizzati valori di *default* IPCC, fattori di riferimento anche nella decisione della commissione europea 2007/589/CE, che istituisce le linee guida per il monitoraggio e la comunicazione delle emissioni di gas a effetto serra ai sensi della direttiva 2003/87/CE.

Tabella 2.2.7: Poteri calorifici e fattori di emissione per i combustibili fossili considerati (valori IPCC 2006).

Tipo di carburante	pci (TJ/kt)	Fattore di emissione t CO <sub>2</sub> /TJ
Gas naturale	48,0	56,1
Gasolio	43,0	74,1
Benzina	44,3	69,3
GPL	47,3	63,1
Olio combustibile	40,4	77,4
Lubrificanti	40,2	73,3
Kerosene	43,8	71,5
AV gas	44,3	69,3

Le emissioni da traffico aereo sono state stimate a partire solamente dal consumo di combustibili, il kerosene JET A1 e l'AV gas. Non è stato possibile stimare le emissioni servendosi anche della tipologia di aeromobile e dei movimenti in aeroporto, dati per altro disponibili, poiché non sono presenti, nelle linee guida IPCC 2006, fattori di emissione per aerei di taglia piccola come quelli presenti nell'aeroporto di Ampugnano (taglia massima ATR 42). Utilizzando i fattori di emissione di un aeromobile simile ma di maggiori dimensioni quale l'ATR 72-500 si sarebbe incorso in forti sovrastime delle emissioni. Considerando che più del 90% dei movimenti in aeroporto (ciclo LTO, Landing - Take-Off), riportati in Tabella 2.2.8, rientrano nella tipologia dell'aviazione generale, ovvero sono voli non militari e non di linea, si è deciso di addebitare alla Provincia di Siena le emissioni per il trasporto aereo, come nell'inventario del 2006.

Tabella 2.2.8: Movimenti nell'Aeroporto di Ampugnano nel 2007 (Aeroporto di Ampugnano).

Numero LTO nel 2007	n°
Nazionali	363
Europei	218
Aviazione generale	7.694
<b>Totale</b>	<b>8.275</b>

I fattori di emissione degli altri gas serra rilasciati dalla combustione di combustibili fossili (metano e protossido d'azoto) sono fortemente influenzati dalla tecnologia del processo di combustione. Sono stati utilizzati i seguenti fattori di emissione di *default* IPCC in kg/TJ (Tabella 2.2.9 e 2.2.10).

Tabella 2.2.9 Fattori di emissione per il metano da combustione dei combustibili fossili in kg/TJ (IPCC, 2006).

FE kg CH <sub>4</sub> /TJ	Riscaldamento	Industria	Trasporto	Agricolo
Gasolio	3		3,9	3
Benzina			25	
GPL	1		62	
Olio combustibile		3		
Lubrificanti		3		
Gas naturale	1	1		
Kerosene			0,5	
AV gas			0,5	

Tabella 2.2.10 Fattori di emissione per il protossido di azoto da combustione dei combustibili fossili in kg/TJ (IPCC, 2006).

FE kg N <sub>2</sub> O/TJ	Riscaldamento	Industria	Trasporto	Agricolo
Gasolio	0,6		3,9	0,6
Benzina			8	
GPL	0,1		0,2	
Olio combustibile		0,6		
Lubrificanti		0,6		
Gas naturale	0,1	0,11		
Kerosene			2	
AV gas			2	

Utilizzando i fattori di emissione in Tabella 2.2.7, sono state stimate le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alla combustione riportate in Tabella 2.2.11 e successivamente sono state messe a confronto con quelle 2006, calcolando anche la variazione percentuale delle emissioni (Tabella 2.2.12).

Tabella 2.2.11 Emissioni di anidride carbonica da combustibili fossili nel 2007.

Tipo di combustibile	2007
	t CO <sub>2</sub>
Gas naturale	350.327
Gasolio	532.574
Benzina	178.219
GPL	50.196
Olio combustibile	12.730
Lubrificanti	4.785
Kerosene	679
AV gas	346
<b>Totale</b>	<b>1.129.856</b>

Nel 2007 il gasolio è stato responsabile, con il 47,14%, delle emissioni totali, seguito dal gas naturale con il 31,1 % e poi dalla benzina con il 15,77%, come riportato in figura 2.2.1. Le emissioni per settore di utilizzo del 2007 sono messe a confronto a quelle della *baseline* nella Tabella 2.2.12.

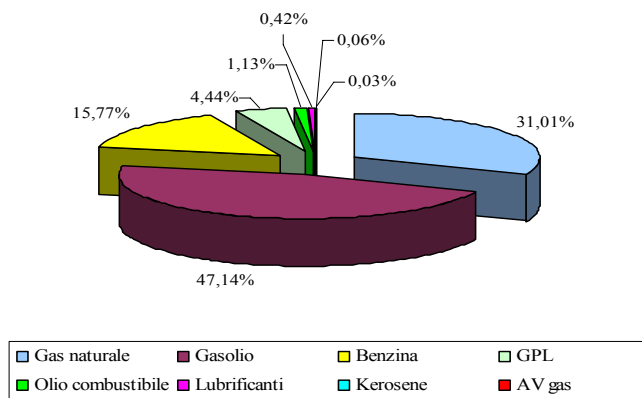


Figura 2.2.1 Percentuali di emissioni di CO<sub>2</sub> per tipo di combustibile fossile nel 2007.

Rispetto alla *baseline* è possibile notare una diminuzione delle emissioni dovute a ogni combustibile, ad eccezione dell'AV gas, per altro trascurabile. Tra i combustibili maggiormente impiegati, la benzina per il trasporto su strada ha visto la diminuzione nelle emissioni di CO<sub>2</sub> più grande con una variazione del 10% rispetto all'anno precedente. Le emissioni totali sono caratterizzate da un calo complessivo del 6,3%.

Tabella 2.2.12 Confronto tra le emissioni di CO<sub>2</sub> per combustione dei combustibili fossili per tipo di utilizzo nel 2006 e nel 2007 e loro variazione percentuale.

Tipo di carburante per tipo di utilizzo	2006	2007	Variazione 2006-2007
	t CO <sub>2</sub>	t CO <sub>2</sub>	%
Gas naturale	375.048	350.327	-6,6%
<i>industria</i>	26.186	24.868	-5,0%
<i>riscaldamento</i>	348.862	325.459	-6,7%
GPL	56.878	50.196	-11,7%
<i>riscaldamento</i>	48.617	42.158	-13,3%
<i>autotrazione privato</i>	8.261	8.038	-2,7%
Benzina	198.407	178.219	-10,2%
Gasolio	556.968	532.574	-4,4%
<i>riscaldamento</i>	40.131	32.370	-19,3%
<i>agricolo</i>	73.352	63.356	-13,6%
<i>autotrazione</i>	443.485	436.848	-1,5%
Olio combustibile	12.921	12.730	-1,5%
Lubrificanti	5.404	4.785	-11,5%
Kerosene	756	679	-10,2%
AV gas	0	346	---
<b>Totale</b>	<b>1.206.382</b>	<b>1.129.856</b>	<b>-6,3%</b>

In Tabella 2.2.13 sono riportate le emissioni di metano e di protossido d'azoto del 2007, messe a confronto con quelle dell'anno precedente, per settore di utilizzo del combustibile, ricavate ricorrendo ai fattori di emissione presentati in Tabella 2.2.9 e 2.2.10.

Tabella 2.2.13 Emissioni di metano e di protossido d'azoto da combustione dei combustibili fossili nel 2007 e variazione percentuale rispetto al 2006.

Settore di utilizzo	2006	2007	Variazione 2006-2007	2006	2007	Variazione 2006-2007
	kg CH <sub>4</sub>	kg CH <sub>4</sub>	%	kg N <sub>2</sub> O	kg N <sub>2</sub> O	%
Industria	1.189	1.133	-4,7%	191	182	-4,7%
Trasporto	103.034	95.189	-7,6%	46.272	43.620	-5,7%
Riscaldamento	8.614	7.780	-9,7%	1.024	909	-11,2%
Agricolo	2.970	2.565	-13,6%	594	513	-13,6%
<b>Totale</b>	<b>115.807</b>	<b>106.667</b>	<b>-7,9%</b>	<b>48.081</b>	<b>45.224</b>	<b>-5,9%</b>

Come per le emissioni di CO<sub>2</sub> anche quelle di CH<sub>4</sub> e di N<sub>2</sub>O dovute alla combustione dei prodotti petroliferi sono caratterizzate da una forte diminuzione percentuale in ogni settore di utilizzo.

#### *Emissioni da consumo di energia elettrica*

L'energia elettrica in un inventario dei gas serra a scala locale può essere contabilizzata secondo due criteri (Ridolfi et al., 2008). Utilizzando un criterio strettamente geografico, proprio della metodologia IPCC, le emissioni generate dall'industria dell'energia si contabilizzano a partire dai combustibili fossili utilizzati dalle centrali presenti sul territorio. Applicando questo criterio, ad una scala più piccola di quella nazionale, si può ottenere un fattore di emissione specifico per il territorio considerato che può differire in maniera considerevole da quello nazionale, a seconda della tipologia degli impianti attivi su quel territorio e soprattutto della percentuale di energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili. Utilizzando il criterio di responsabilità, ovvero calcolando le emissioni a partire dai consumi, indipendentemente dalla produzione locale, le emissioni associate alla produzione media nazionale di kWh sono moltiplicate per i kWh consumati. Il secondo approccio ha una sua giustificazione nel fatto che tutta la produzione italiana, sia essa da combustibili fossili o da fonti rinnovabili, è comunque immessa nella rete nazionale e non consumata localmente (fatta eccezione per la quota autoprodotta). Il primo approccio ci permette, invece, di valutare effettivamente la gestione a scala locale della produzione dell'energia e l'incidenza delle fonti rinnovabili. Partendo dal bilancio energetico provinciale, i cui dati aggiornati sono contenuti nella Relazione sullo Stato dell'Ambiente della Provincia di Siena (2008), in questo inventario si è deciso di utilizzare un criterio misto, geografico per la frazione dei consumi che può essere coperta dalla produzione locale, mentre per la quantità di energia elettrica

importata è stato applicato il fattore di emissione calcolato a partire dalla produzione di energia elettrica a scala nazionale.

La produzione locale di energia elettrica è generata a partire dall'energia geotermica, dall'energia da rifiuti e da alcuni impianti di solare fotovoltaico. Nel 2007 l'energia prodotta dai rifiuti include solamente quella prodotta da recupero del biogas captato nelle discariche dei rifiuti solidi urbani, ma non quella prodotta dal termovalorizzatore di Poggibonsi. Infatti quest'ultimo, nel 2007, era chiuso per opere di potenziamento e manutenzione.

Le emissioni relative al 4% di energia elettrica importata sono state stimate a partire dal fattore di emissione calcolato per la scala nazionale. Il fattore di emissione per l'energia elettrica in Italia per l'anno 2007 è stato elaborato a partire dal totale delle emissioni di CO<sub>2eq</sub> generate dalla combustione di tutti i combustibili fossili utilizzati per la produzione di energia elettrica diviso per l'energia elettrica totale prodotta (fonti fossili e rinnovabili), meno la quota di energia elettrica prodotta in Provincia di Siena. In Tabella 2.2.14 sono presentati i fattori di emissione per gas serra e tipo di combustibile utilizzato.

Tabella 2.2.14 Fattori di emissione utilizzati per la stima delle emissioni da produzione di energia elettrica da termoelettrico (valori IPCC, 2006).

Tipo di combustibile	IPCC, 2006	CO <sub>2</sub> t/TJ	CH <sub>4</sub> kg/TJ	N <sub>2</sub> O kg/TJ
Solidi	coke da gas	107,0	1	0,1
Gas naturale	gas naturale	56,1	1	0,1
Gas derivati	gas da cokeria	44,4	1	0,1
Petroliferi	altri prodotti petroliferi	73,3	1	0,6
Altri combustibili solidi	lignite	101,1	1	1,5
Altri combustibili gassosi	gas di raffineria	57,6	1	0,1

Nel 2007 la produzione di energia elettrica in Provincia di Siena è costituita per la totalità da fonte rinnovabile, grazie principalmente alla presenza della geotermia, e dell'energia ottenuta dai rifiuti (prodotta dal recupero del biogas dalle discariche). In Tabella 2.2.15 è riportato il bilancio energetico della Provincia di Siena nell'anno 2007 messo a confronto con quello dell'anno precedente: si è verificato un aumento del 9,3% rispetto al 2006 dell'energia elettrica da geotermico e del 17,1% da fotovoltaico, mentre quella da rifiuti è diminuita del 46,6%, per la mancata attività del termovalorizzatore di Poggibonsi. La percentuale di fonti rinnovabili sulla quantità di energia consumata, includendo quella prodotta in Provincia e quella importata dalla rete nazionale, è pari a circa il 96%. Il consumo pro-capite è di 4.990

kWh/ab rispetto ai 4.867 kWh/ab del 2006, mostrando un aumento percentuale pari al 2,6%.

Tabella 2.2.15 Confronto del bilancio energetico della Provincia di Siena tra il 2006 ed il 2007 (Dati, Terna e Relazione sullo Stato dell'Ambiente, 2008)

Produzione energia elettrica	2006	2007	Variazione 2006-2007
	MWh	MWh	%
Geotermico	1.150.014	1.257.300	9,3%
Energia da rifiuti	9.114	4.869	-46,6%
Fotovoltaico	85	100	17,1%
Totale energia prodotta	1.159.213	1.262.269	8,9%
Totale energia consumata	1.274.100	1.312.400	3,0%
Import dalla rete nazionale	114.887	50.131	-56,4%

Non è ancora chiaro a livello scientifico quanto le emissioni di anidride carbonica generate dalla produzione geotermica siano di origine naturale o antropica (Ármansson, 2005). Per questo non è stata ancora stabilita a livello internazionale una metodologia che riguarda le emissioni di anidride carbonica da estrazione del fluido geotermico per la produzione di energia elettrica e quindi non sono state incluse nell'inventario.

Nel 2007 sono stati prodotti 100 MWh di energia elettrica da fotovoltaico, mentre l'energia prodotta da rifiuti è totalmente generata dalla captazione del biogas dalle discariche di Torre a Castello (Comune di Asciano) e di Abbadia S. Salvatore, con la produzione di 4.869 MWh. L'energia elettrica prodotta dalla combustione del biogas ha emissioni di gas serra nulle, poiché la CO<sub>2</sub> prodotta è di origine biogenica, dato che è originata da processi naturali. L'impianto di termovalorizzazione esistente a Poggibonsi è stato fermato in data 26/11/2006, ed è rimasto chiuso per tutto il 2007 per interventi di adeguamento e di ampliamento; per questo motivo nel 2007 non ci sono state emissioni, dalla produzione di energia elettrica, da addebitare alla Provincia di Siena.

Per quanto riguarda la stima delle emissioni da energia elettrica importata, la produzione di energia elettrica in Italia nel 2007 è stata basata per l'85% sulla combustione dei combustibili fossili, mentre le rinnovabili ammontano al 15% (Tabella 2.2.16).



Tabella 2.2.16 Confronto della produzione di energia elettrica in Italia tra il 2006 ed il 2007 (dati Terna).

Fonte	2006	%	2007	%
	GWh			GWh
Idroelettrico	43.425	13,8	38.481	12,0
Geotermoelettrico	5.527	1,8	5.569	1,7
Termoelettrico	262.165	83,5	271.333	84,9
Eolico e Fotovoltaico	2.973	0,9	4.073	1,3
<b>Totale</b>	<b>314.090</b>	<b>100,0</b>	<b>319.457</b>	<b>100,0</b>

Il fattore di emissione di un kWh prodotto nel 2007 in Italia è stato ottenuto dal rapporto tra le emissioni generate dalla produzione da termoelettrico e tutta l'energia elettrica prodotta, inclusa quella da fonte rinnovabile, pari nel complesso a 319.457 GWh, meno quella prodotta in Provincia di Siena, pari a 1.262 GWh. In Tabella 2.2.17 sono riportate le emissioni prodotte nel 2007 per la generazione di energia elettrica in Italia.

Tabella 2.2.17 Stima delle emissioni dovute alla produzione di energia elettrica prodotto in Italia nel 2007.

Termoelettrico	Quantità	Quantità	Emissioni	Emissioni	Emissioni	Emissioni
	10 <sup>3</sup> tep	TJ	Gg CO <sub>2</sub>	Gg CH <sub>4</sub>	Gg N <sub>2</sub> O	Gg CO <sub>2eq</sub>
Solidi	10.321	431.679	46.190	0,4	0,0	46.213
Gas naturale	28.292	1.183.322	66.384	1,2	0,1	66.449
Gas derivati	1.218	50.943	2.262	0,1	0,0	2.265
Petroliferi	5.245	219.374	16.080	0,2	0,1	16.125
Altri combustibili solidi	4.149	173.533	17.544	0,2	0,3	17.626
Altri combustibili gassosi	389	16.270	937	0,0	0,0	938
<b>Totale</b>	<b>49.614</b>	<b>2.075.121</b>	<b>149.397</b>	<b>2,1</b>	<b>0,6</b>	<b>149.616</b>

La combustione di prodotti petroliferi, carbone e metano e altri combustibili, pari a 49.336 migliaia di tep (tonnellate di petrolio equivalente, potere calorifico 41,825 TJ/kt) ha comportato emissioni di gas serra pari a 149.616.172 tonnellate di CO<sub>2eq</sub>, a fronte di una produzione nazionale lorda di energia elettrica pari a 319.457 GWh, al netto di quella prodotta in Provincia di Siena (Tabella 2.2.18).

Tabella 2.2.18 Fattore di emissione per un kWh di energia elettrica importato in Provincia di Siena nel 2007.

Emissioni da produzione energia elettrica	Energia elettrica prodotta (- Siena)	Fattore di emissione per l'energia elettrica importata
Gg CO <sub>2eq</sub>	GWh/anno	kg CO <sub>2eq</sub> /kWh
149.616	318.194	0,47

Moltiplicando i MWh importati dalla rete nazionale per il fattore di emissione calcolato si ottengono le emissioni dovute all'energia importata (Tabella 2.2.19).

Tabella 2.2.19 Emissioni di GHG da consumo di energia elettrica importata.

Energia elettrica importata	Fattore di emissione	Emissioni
MWh	t CO <sub>2eq</sub> /MWh	t CO <sub>2eq</sub>
50.131	0,47	23.572

Nel 2007, rispetto all'anno precedente, l'energia elettrica importata dal mix nazionale è più che dimezzata: le emissioni di CO<sub>2eq</sub> sono diminuite del 57%, mentre la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili è aumentata di circa il 9%.

Come si può notare il fattore di emissione che si ottiene per il consumo totale di energia elettrica in Provincia di Siena, includendo il 4% importato dalla rete nazionale, porta ad avere un valore di emissioni pari a 0,018 kg di CO<sub>2eq</sub> per kWh consumato, ovvero il fattore di emissione è molto inferiore a quello nazionale calcolato per il 2007 pari a 0,47 kg CO<sub>2eq</sub>/kWh. Infatti nel 2007 la percentuale di rinnovabili sul totale dell'energia consumata è del 96%, mentre nella realtà nazionale arriva solamente al 15%. In Tabella 2.2.20 sono riassunte le emissioni del settore energia, con i contributi alle emissioni per categoria di emissione e per gas serra.

Tabella 2.2.20 Emissioni di CO<sub>2eq</sub> dal settore energia per categoria di emissione e gas serra (2007).

Categorie di emissione		
Gas	Sorgente di emissione	t CO <sub>2eq</sub>
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	686.461
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	1.025
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	399.987
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso industriale	42.383
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	0
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	23.572
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	2.444
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto aereo	0
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	195
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso industriale	28
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	13.143
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto aereo	9
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	271
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso industriale	54
<b>Totale settore energia</b>		<b>1.169.571</b>

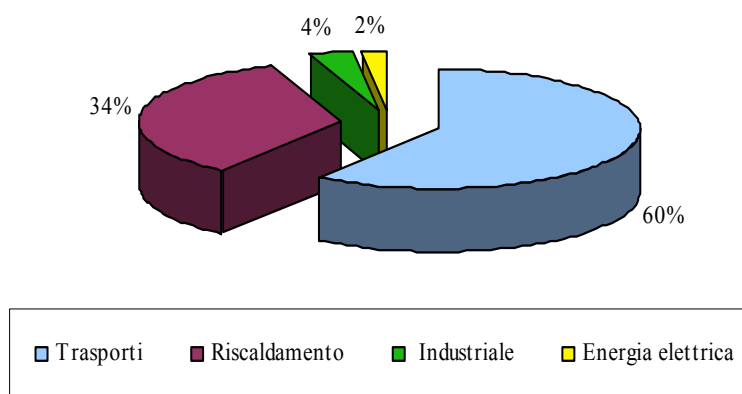


Figura 2.2.2 Ripartizione delle emissioni tra i settori di emissione.

Si può notare come l'anidride carbonica sia di gran lunga il principale gas serra del settore energia. Per quanto riguarda la responsabilità percentuale dei quattro settori nei quali sono state collocate le emissioni, il settore dei trasporti copre il 60% delle emissioni (Figura 2.2.2).

Il confronto delle emissioni espresse in CO<sub>2eq</sub> tra il 2006 ed il 2007, per quanto riguarda i contributi alle emissioni per gas serra emessi, è riportato nella Tabella 2.2.21, dove si può vedere anche la rispettiva variazione percentuale.

Tabella 2.2.21 Confronto delle emissioni di CO<sub>2eq</sub>, e rispettive variazioni percentuali, dovute al settore energia e raggruppate per gas serra.

Emissioni Settore Energia	t di CO <sub>2eq</sub> - 2006	t di CO <sub>2eq</sub> - 2007	Variazione 2006-2007
CO <sub>2</sub>	1.264.379	1.153.427	-8,8%
CH <sub>4</sub>	2.895	2.667	-7,9%
N <sub>2</sub> O	14.328	13.477	-5,9%
<b>Totale</b>	<b>1.281.602</b>	<b>1.169.571</b>	<b>-8,7%</b>

Come è possibile notare dalla Tabella 2.2.21, l'anno 2007 è stato caratterizzato da una complessiva diminuzione del 9% delle emissioni di gas serra dovute al settore energia dell'inventario, rispetto all'anno precedente.

### 2.3 SETTORE PROCESSI INDUSTRIALI

I gas serra sono prodotti da un'ampia varietà di attività industriali (Tabella 2.3.1). Le emissioni provengono da processi, durante i quali le materie prime subiscono trasformazioni fisiche o chimiche. Durante questi processi possono essere rilasciati molti gas serra quali CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e PFC.

E' stato portato a termine un censimento delle industrie presenti sul territorio della provincia a partire dalle autorizzazioni alle emissioni e dalle AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale) rilasciate dalla Provincia nel periodo 2000-2007.

Tabella 2.3.1 Impianti industriali con emissioni di gas serra nel processo produttivo.

Tipo di gas serra diretto emesso	Produzione di:
CO <sub>2</sub>	Cemento, ferro, acciaio, calce
CH <sub>4</sub>	Carburo di calcio
N <sub>2</sub> O	Acido adipico, acido nitrico
PFCs	Alluminio
SF <sub>6</sub>	Magnesio, apparecchi elettronici

Da questo censimento è emerso che sono presenti sul territorio provinciale due tipi di industrie con produzione di emissioni di gas serra da processo produttivo, ovvero l'industria della ceramica e laterizi e quella di vetro e cristallo. E' inoltre presente un solo impianto incluso nella direttiva sull'Emission Trading 2003/87/CE, le cui emissioni sono state incluse per la produzione di energia nella sezione precedente e per quello delle emissioni di processo in questa sezione. Questo è il quadro generale per le attività contabilizzate nel settore processi industriali (Tabella 2.3.2)

Tabella 2.3.2 Categorie di emissione incluse nel settore processi industriali

Gas serra	Categoria	Fonte dei dati di attività	Fonte FE
CO <sub>2</sub>	Industria della ceramica e dei laterizi	AIA	IPCC
CO <sub>2</sub>	Industria del vetro e del cristallo	AIA	IPCC, calcolati

#### *Industria della ceramica e dei laterizi*

Sono state stimate le emissioni di 7 aziende che producono ceramica o laterizi sulle 18 censite, ovvero quelle per le quali è stato possibile ottenere il dato di argilla in input, usato come dato di attività e contenuto nei dati sulle materie prime delle

Autorizzazioni Integrate Ambientali (AIA). Non è stato possibile usare direttamente i dati di emissione oraria contenuti nelle autorizzazioni poiché i fumi della cottura sono miscelati con quelli della combustione delle caldaie (già conteggiati nel settore Energia). La quantità di carbonati nell'argilla utilizzata può variare in percentuale dall'1% al 30% (Industrie Laterizi Riunite, 1997; Dondi et al., 2006). Mentre per la produzione dei laterizi la percentuale può essere di livello medio-alto, per l'industria della ceramica questa deve essere la più bassa possibile. Per calcolare la quantità di carbonati presenti, è stata considerata una percentuale media pari al 5% del peso dell'argilla in ingresso per le industrie dei laterizi e all'1% per quelle di ceramiche. Si è ipotizzato che tutto il carbonato presente nell'argilla fosse  $\text{CaCO}_3$ ; è stato inserito anche l'uso di carbonati addizionati alle argille quali il carbonato di bario, la cui quantità è stata calcolata per l'anno 2007 grazie ad una ripartizione sul totale del corrispettivo quantitativo utilizzato nell'anno precedente. Il fattore di emissione in  $\text{t CO}_2$  per tonnellata di carbonato è per il carbonato di calcio pari a 0,4397 e per il carbonato di bario pari a 0,2230. Il fattore di emissione del carbonato di bario è stato calcolato utilizzando la seguente equazione (Decisione 2007/589/CE) per il calcolo del fattore di emissione stechiometrico.

$$FE_{\text{carbonati}} = \frac{(M_{\text{CO}_2})}{\left[ Y \cdot (M_X) + Z \cdot (M_{\text{CO}_3^{-2}}) \right]}$$

dove:

X = metallo alcalino terroso o alcalino

$M_X$  = peso molecolare di X in [g/mol]

$M_{\text{CO}_2}$  = peso molecolare della  $\text{CO}_2 = 44,0095$  [g/mol]

$M_{\text{CO}_3^{-2}}$  = peso molecolare del  $\text{CO}_3^{-2} = 60,0089$  [g/mol]

Y = coefficiente stechiometrico di X = 1 (nel caso del carbonato di bario)

Z = coefficiente stechiometrico del  $\text{CO}_3^{-2} = 1$

L'equazione utilizzata per il calcolo è riportata di seguito:

$$\text{Emissioni di CO}_2 = (\sum \{\text{dati attività}_{\text{carbonati}} \cdot FE\} + \{\text{quantità attività}_{\text{additivi}} \cdot FE\})$$

Le emissioni di gas serra da attività di processo sono prodotte in contemporanea con le emissioni da combustione di carburanti e questo può rendere difficile l'attribuzione delle emissioni o creare situazioni di doppio conteggio utilizzando misure dirette di emissioni. Non è stato possibile quindi utilizzare i dati delle portate orarie di scarico in atmosfera dei diversi inquinanti presenti nelle autorizzazioni alle

emissioni, ma è stato necessario risalire alle materie prime utilizzate in input al processo produttivo.

L'industria della ceramica e dei laterizi è fonte di emissioni di gas serra che si verificano nel processo di cottura dell'argilla, per liberazione della CO<sub>2</sub> dai carbonati e della sostanza organica contenuti nella materia prima. Sono state contabilizzate solamente le emissioni da carbonati, secondo quanto previsto dalla direttiva 2003/87/CE. Le emissioni di anidride carbonica del 2007 provenienti dai 7 impianti per i quali è stato possibile reperire i dati di attività di argilla in input al processo sono presentati in Tabella 2.3.3.

Tabella 2.3.3 Emissioni di anidride carbonica di processo dall'industria di ceramica e laterizi in Provincia di Siena nel 2007.

n. impianti	Prodotto	Argilla	Carbonati	Carbonati	FE	Emissioni CO <sub>2</sub>
		t	%	t	tCO <sub>2</sub> (t <sub>carbonati</sub> ) <sup>-1</sup>	t
6	Laterizi	607.895	5	30.395	0,4397	13.365
1	Ceramica	63.639	1	636	0,4397	280
	Additivi (BaCO <sub>3</sub> )			348	0,2230	78
<b>Totale</b>				<b>31.379</b>		<b>13.722</b>

Le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alla produzione di laterizi sono contraddistinte da un aumento percentuale di circa il 25% rispetto al 2006, caratterizzato da 10.707 t di CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera per questo tipo di produzione, mentre le emissioni dovute ai ceramifici sono rimaste invariate. Anche la CO<sub>2</sub> rilasciata in seguito alla combustione di carbonati additivi, ha visto un incremento complessivo di circa il 24%, considerando le 62 t rilasciate nel 2006.

#### *Industria del vetro e del cristallo*

Nell'industria del vetro e del cristallo le emissioni di processo di gas serra derivano dall'utilizzo di carbonati come fondenti nel processo di produzione del vetro. E' stato possibile ottenere i dati sui carbonati utilizzati come fondenti dalla principale azienda presente sul territorio che si stima copra l'80-90% della produzione. E' stato applicato un Tier 3, basato direttamente sulla quantità di carbonati utilizzati e non sulla quantità di vetro prodotto. I fattori di emissione dei carbonati utilizzati sono stati calcolati con la stessa equazione usata per il calcolo dei FE dell'industria della ceramica e laterizi. Le emissioni di CO<sub>2</sub> sono riportate in Tabella 2.3.4, insieme ai

fattori di emissione e alle quantità di carbonati utilizzati nel 2007 per la produzione di vetro e cristallo.

Tabella 2.3.4 Emissioni di anidride carbonica da uso dei carbonati nell'industria del vetro e del cristallo.

Carbonato	Consumo t	FE t CO <sub>2</sub> (t carbonato) <sup>-1</sup>	Emissioni CO <sub>2</sub> t
Dolomite granulare Ca-Mg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	104,3	0,4773	49,8
Dolomite calcinata <sup>1</sup> MgO-CaO residuo CaCO <sub>3</sub>	8,4	0,4397	3,7
Sodio Carbonato	439,8	0,4149	182,5
Potassio Carbonato	726,3	0,3184	231,3
Piombo Carbonato	0,0	0,1647	0,0
Calcio Carbonato	103,3	0,4397	45,4
Calce calcinata <sup>*</sup> CaO residuo CaCO <sub>3</sub>	0,6	0,4397	0,3
Bario Carbonato	355,1	0,2230	79,2
Stronzio Carbonato	12,4	0,2981	3,7
<b>Totale</b>	<b>1750,2</b>		<b>595,8</b>

Le emissioni del settore processi industriali della Provincia di Siena nell'anno 2007 sono così distribuite tra le due tipologie di industrie presenti (Figura 2.3.1).

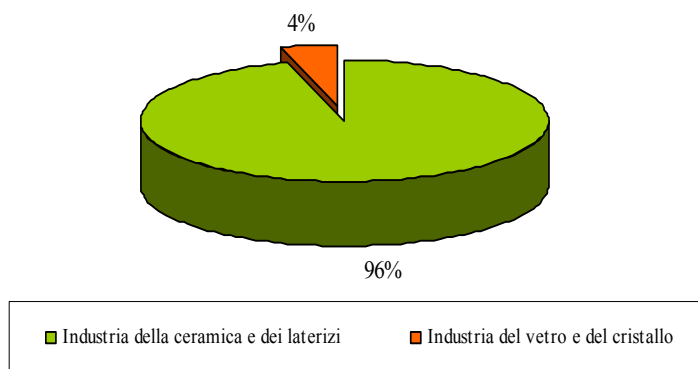


Figura 2.3.1 Percentuale delle emissioni per tipologia industriale.

Le emissioni complessive del settore processi industriali ammontano a 14.358 t di CO<sub>2</sub> nel 2007 (Tabella 2.3.5).

<sup>1</sup> La dolomite calcinata e la calce calcinata sono ossidi e non producono emissioni di CO<sub>2</sub>, ma si trovano insieme ad un residuo di carbonato di calcio: nel calcolo delle emissioni sono state considerate solamente le tonnellate del residuo di CaCO<sub>3</sub> che per la dolomite calcinata corrisponde al 9,1% del totale (92 t), mentre per la calce calcinata è il 7,3% delle 8,04 t complessive utilizzate per la produzione.

Tabella 2.3.5 Emissioni di GHG dal settore industria per categoria di emissione.

Categorie di emissione		
Gas	Sorgente di emissione	t CO <sub>2eq</sub>
CO <sub>2</sub>	Industria della ceramica e dei laterizi	13.722
CO <sub>2</sub>	Industria del vetro e del cristallo	596
<b>Totale settore Industria</b>		<b>14.318</b>

In Tabella 2.3.6 e nella Figura 2.3.2 è riportato il confronto tra le emissioni di CO<sub>2eq</sub> del settore processi industriali tra il 2006 e l'anno successivo, insieme alle corrispettive variazioni percentuali.

Tabella 2.3.6 Confronto delle emissioni di CO<sub>2eq</sub> e rispettive variazioni percentuali dovute al settore produzioni industriali .

Sorgente di emissione	t di CO <sub>2eq</sub> - 2006	t di CO <sub>2eq</sub> - 2007	Variazione 2006-2007
Industria ceramica e laterizi	11.050	13.722	24,2%
Industria vetro e cristallo	923	596	-35,4%
<b>Totale</b>	<b>11.973</b>	<b>14.318</b>	<b>19,6%</b>

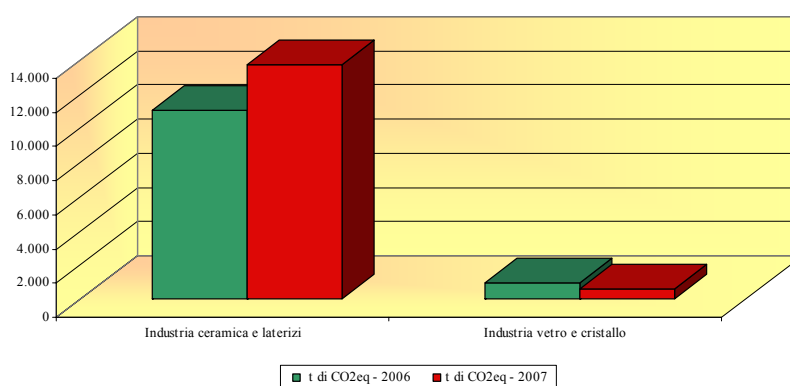


Figura 2.3.2 Confronto emissioni di CO<sub>2eq</sub> per le differenti sorgenti di emissione.

Rispetto al 2006, l'industria del vetro e del cristallo si è contraddistinta per una netta diminuzione delle emissioni ed una variazione percentuale di circa -35%. Al contrario l'industria della ceramica e dei laterizi nel 2007 ha visto un aumento della CO<sub>2</sub> rilasciata in atmosfera e la variazione percentuale complessiva delle emissioni imputabili al settore dei processi industriali equivale a circa il +20%.



## 2.4 SETTORE RIFIUTI

Lo smaltimento dei rifiuti urbani e industriali produce una quantità importante di metano. La decomposizione anaerobica della sostanza organica da parte dei batteri metanogeni presenti in una discarica, provoca il rilascio di metano in atmosfera. Si stima che questa fonte costituisca, a scala mondiale, dal 5 al 20% di tutte le emissioni antropogeniche.

Il settore rifiuti comprende la stima delle emissioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O dai seguenti processi:

- Smaltimento in discarica;
- Trattamento biologico dei rifiuti (compostaggio);
- Incenerimento dei rifiuti (ove non sia previsto il recupero energetico);
- Trattamento delle acque reflue.

Questo è il quadro generale delle categorie incluse nel settore rifiuti (Tabella 2.4.1).

Tabella 2.4.1 Categorie di emissione incluse nel settore rifiuti.

Gas serra	Categoria	Fonte del dato di attività	Fonte FE
CH <sub>4</sub>	Smaltimenti dei rifiuti in discarica	Sienambiente	IPCC Waste Model
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	Sienambiente	IPCC
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	ATO 2, 4, 5, 6, Autorizzazioni provinciali agli scarichi	IPCC
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	Sienambiente	IPCC
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	ATO 2, 4, 5, 6, Autorizzazioni provinciali agli scarichi	IPCC

I 36 comuni della Provincia di Siena nel 2007 costituivano l'ATO Rifiuti 8, che ha come gestore unico Sienaambiente S.p.A. Di seguito sono riportati gli impianti di smaltimento dei rifiuti, in funzione nel 2007, sul territorio provinciale (Tabella 2.4.2).

Tabella 2.4.2 Impianti attivi nel 2007.

Impianto	Tipo	Metodologia
Le Macchiaie	Discarica	IPCC Waste Model
Torre a Castello	Discarica	IPCC Waste Model
Poggio alla Billa	Discarica	IPCC Waste Model
Le Cortine	Compostaggio	Emissioni CH <sub>4</sub> e N <sub>2</sub> O
Pian dei Foci	Termovalorizzatore	Non attivo nel 2007

### *Smaltimento dei rifiuti in discarica*

La metodologia IPCC per la stima di queste emissioni è basata su un'equazione di primo ordine di decadimento della sostanza organica contenuta nel rifiuto urbano. Questo metodo prevede come assunzione che la frazione organica degradabile (Degradable Organic Carbon, DOC) presente nel rifiuto si decomponga lentamente nel periodo di alcune decadi, durante le quali si formano CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Se le condizioni sono costanti, il tasso di produzione di metano dipende solamente dalla quantità di carbonio organico conferita in discarica. In questo modo le emissioni di CH<sub>4</sub> sono più alte nei primi anni dal conferimento, per poi rallentare gradualmente. La quantità emessa di metano è stata stimata con il "IPCC Waste Model" che ha richiesto la ricostruzione storica delle emissioni di metano dalle discariche a partire dal 1951.

Tabella 2.4.3 Ricostruzione della produzione di rifiuti dal 1951 al 2007.

Anno	Abitanti	Rifiuti kg(abitante) <sup>-1</sup>
1951	274.500	300
1961	270.062	330
1971	257.221	340
1981	255.118	360
1991	250.740	390
2001	252.288	555
2006	261.894	520
<b>2007</b>	<b>262.990</b>	<b>578</b>

E' stata ricostruita la quantità di rifiuti che è stata smaltita in Provincia di Siena dal 1951 fino al 1996 a partire dai dati sulla popolazione residente (dati ISTAT) e sulla produzione di rifiuti pro-capite. Per gli ultimi 10 anni è stato possibile usare dati forniti da Sienambiente, mentre per il periodo precedente ci si è affidati ai report nazionali dei rifiuti (elaborazioni da dati APAT) (Tabella 2.4.3).

L'equazione di base per il modello di decomposizione della sostanza organica di primo ordine per la stima delle emissioni di metano da smaltimento di rifiuti in discarica è:

$$DDOC_m = DDOC_{m(0)} e^{-kt}$$

dove:

DDOC<sub>m(0)</sub> è la massa carbonio organico degradabile all'inizio della reazione, t = 0

k è la costante di reazione

t è il tempo in anni

La quantità di DOC degradabile è data dall'equazione IPCC 3.2.

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF$$

dove:

$DDOC_m$  è la massa di carbonio organico degradabile depositata che è degradata

W massa di rifiuto depositato, t

DOC frazione carbonio organico degradabile, %

$DOC_f$  frazione di DOC che effettivamente si decompone, %

MCF fattore di correzione per la parte di rifiuto che si decompone in modo anaerobico in discarica.

Il fattore di correzione MCF per discariche anaerobiche gestite correttamente, categoria corrispondente a quella delle discariche presenti in Provincia di Siena, è 1; gli altri parametri di *default* utilizzati per la stima sono riportati nella metodologia IPCC e anche nel report del precedente inventario dei gas serra.

Il fattore di ossidazione riflette la quantità di metano prodotta che è ossidata nel suolo o nel materiale di copertura della discarica ad opera dei microrganismi presenti. Questo fattore, per discariche gestite, utilizzando anche materiale di copertura (suolo o compost), è 0,1.

E' inclusa, nella quantità totale di rifiuti smaltiti in discarica, anche la quantità di fanghi di depurazione smaltiti in discarica, che sono pari a 1.969 t (calcolati facendo una riproporzione con quelli del 2006). Alle emissioni per il 2007 calcolate con l'*IPCC WASTE MODEL* sono stati sottratti i metri cubi di metano recuperati nello stesso anno.

Il biogas che si genera ha una composizione media costituita dal 50% di metano e 50% di anidride carbonica, quest'ultima non contabilizzata perché di origine organica. Questo valore è confermato sia dai valori di *default* IPCC, sia dai documenti prodotti da *Sienambiente* (*Sienambiente*, 2001). E' stato usato come valore di densità per il metano 0,71 kg/m<sup>3</sup>.

La frazione merceologica del rifiuto solido urbano indifferenziato smaltito in discarica nel 2007 è riportata nella Figura 2.4.1.

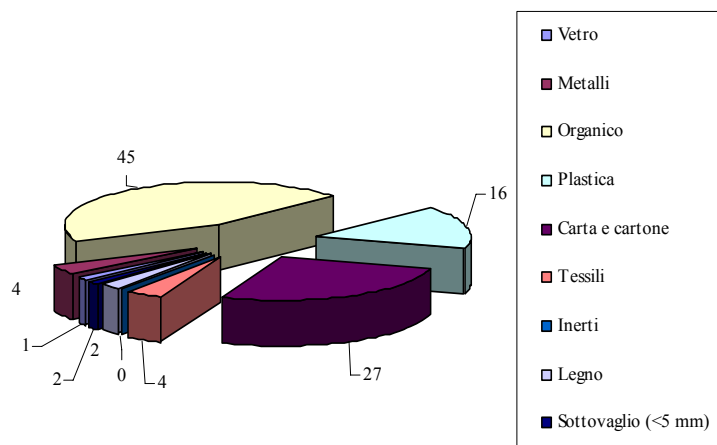


Figura 2.4.1 Frazione merceologica del rifiuto conferito in discarica nel 2007.

La quantità di rifiuti totale smaltita nelle discariche presenti in Provincia di Siena è riportata in Figura 2.4.2, ed è basata su dati forniti da Sienambiente a partire dal 1997, anno di inizio gestione.

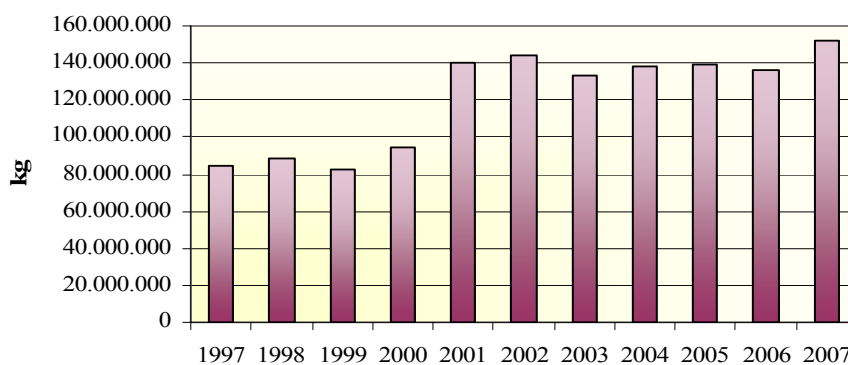


Figura 2.4.2 Andamento della quantità di rifiuti in discarica dal 1997 al 2007.

In Tabella 2.4.4 è presentato l'andamento delle quantità di rifiuti solidi urbani smaltiti in discarica dal 1997 per ogni impianto (dati Sienambiente), mentre in Tabella 2.4.5 è riportata la quantità di biogas captata nel 2007 nelle due discariche dove sono presenti impianti per il recupero.

Tabella 2.4.4 Quantità di rifiuti solidi urbani smaltita in discarica in Provincia di Siena dal 1997 al 2007 in kg (dati Sienambiente) per impianto.

Nome discarica	Comune	Apertura	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Discarica di Cornia	Castelnuovo B.	-1950	14.200.000	12.687.000	13.230.000	13.016.000	25.802.000	11.715.300	0	0	0	0	0
Discarica Buche di P. Piano	Monteroni	-1950	10.838.000	13.151.000	16.268.000	16.174.000	25.429.000	10.663.039	0	0	0	0	0
Discarica Le fornaci	Monticiano	-1950	8.001.067	13.482.721	4.614.465	8.934.604	7.345.000	0	0	0	0	0	0
Discarica di Cavernano	Chianciano	-1950	----	9.835.790	17.495.155	17.089.534	16.486	17.136.668	4.536.270	0	0	0	0
Discarica Le Macchiaie	Sinalunga	1950	37.636.954	22.817.888	9.943.980	19.545.130	22.486.000	16.346.770	36.799.991	59.082.805	60.676.375	26.585.140	41.506.000
Discarica di Torre a Castello	Asciano	1970	----	----	----	----	38.325.000	55.346.344	63.217.783	48.241.365	28.640.959	74.072.415	95.059.000
Discarica Poggio alla Billa	Abbadia SS	1992	14.218.855	16.230.475	20.610.966	20.133.480	20.699.000	32.771.451	28.122.040	30.880.934	49.835.770	35.698.800	15.549.000
Tot kg smaltiti per discarica D1			84.894.876	88.204.874	82.162.566	94.892.748	140.102.486	143.979.572	132.676.084	138.205.104	139.153.104	<b>136.356.355</b>	<b>152.114.000</b>

Tabella 2.4.5 Quantità di biogas recuperato in Provincia di Siena dal 2004 al 2007 in m<sup>3</sup> (Dati Sienambiente) dalle due discariche che presentano il recupero nell'anno dell'inventario. Non sono inclusi i m<sup>3</sup> bruciati in torcia di sicurezza.

Nome discarica	Comune	2004	2005	2006	2007
Discarica di Torre a Castello	Asciano	1.217.294	1.905.507	2.701.583	2.347.154
Discarica Poggio alla Billa	Abbadia SS	0	0	1.192.723	1.273.607
Quantità di biogas recuperato (m <sup>3</sup> )		1.217.294	1.905.507	3.894.306	<b>3.620.761</b>

La quantità di metano recuperata nel 2007 è riportata in Tabella 2.4.6.

Tabella 2.4.6 Quantità di metano recuperato con il biogas nel 2007.

Quantità di biogas recuperato	Quantità di metano	Quantità di metano
m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	t
3.620.761	1.810.381	1.285

Non sono state invece considerate le quantità di metano bruciate in torcia di sicurezza di tutte le discariche, attive o in gestione post-chiusura, presenti sul territorio provinciale, per mancanza di dati. L'approccio utilizzato per la stima delle emissioni di metano in discarica è quindi cautelativo. In Tabella 2.4.7 è presentato il bilancio tra le emissioni lorde di metano calcolate in serie storica con l'*IPCC Waste Model*, la quantità di metano recuperata e le emissioni nette.

Tabella 2.4.7 Emissioni lorde e nette di metano da smaltimento dei rifiuti in discarica.

Emissioni lorde di metano	Metano recuperato	Emissioni nette di metano
t	t	t
6.116	1.285	4.831

Nella Figura 2.4.3 sono riportate le emissioni generate dallo smaltimento in discarica in serie storica.

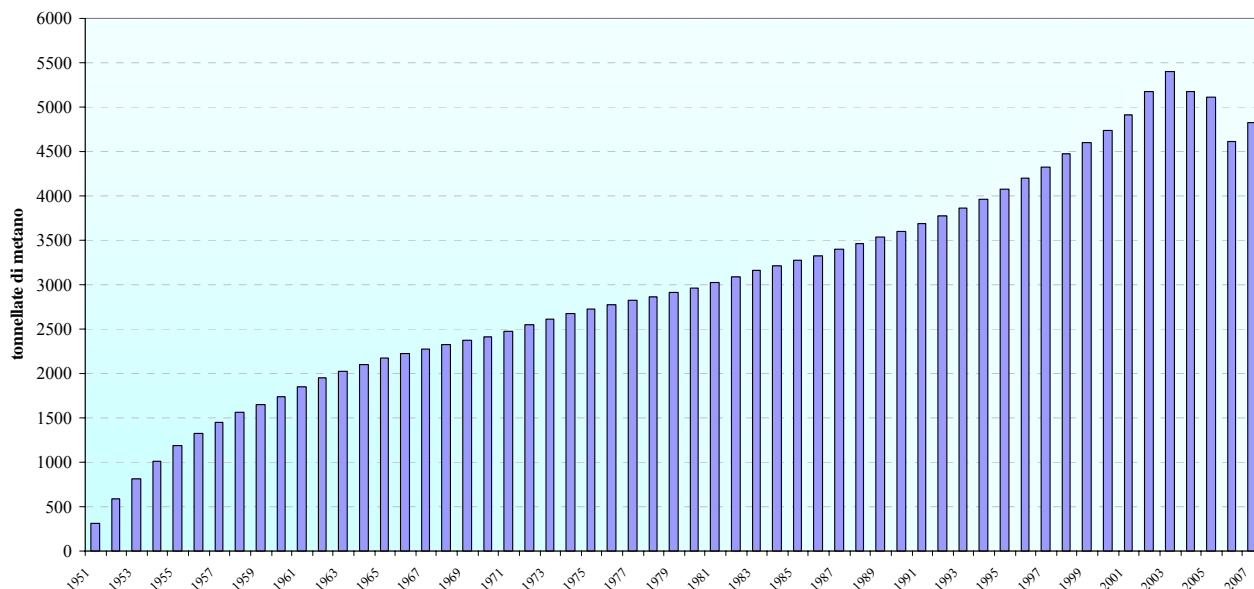


Figura 2.4.3 Andamento delle emissioni di metano da smaltimento dei rifiuti in discarica.

Dall'osservazione di questa figura, si nota che nel 2007 l'ammontare di emissioni di metano dalle discariche è maggiore rispetto all'anno precedente. Ciò è correlabile ad una maggiore quantità

di rifiuti urbani conferiti in discarica nel 2007 rispetto al 2006 (l'11,6% in più), dovuta alla mancata attività del termovalorizzatore di Poggibonsi.

Nel 2007 sono, perciò, aumentate le emissioni di metano da smaltimento dei rifiuti in discarica con una variazione positiva di circa il 19% rispetto al 2007 (vedere Tabella 2.4.18).

Il recupero del biogas ha comunque permesso un abbattimento delle emissioni totali del 22% rispetto al caso in cui tutto il biogas venisse rilasciato in atmosfera. Si tratta di una nota positiva che limita le emissioni di metano da smaltimento dei rifiuti in discarica per l'anno 2007, nonostante che nell'anno precedente la quantità di biogas recuperato fosse stata maggiore ed avesse permesso un abbattimento delle emissioni del 24%.

### *Compostaggio dei rifiuti*

Il trattamento biologico dei rifiuti, effettuato attraverso il processo di compostaggio della frazione organica differenziata, è fonte di emissioni di CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, prodotte durante la lavorazione del compost da parte della flora microbica. Mentre la CO<sub>2</sub> prodotta è di origine biogenica, e quindi non è contabilizzata come sorgente antropica di emissioni, le emissioni di metano e protossido di azoto sono incluse nell'inventario. Le emissioni del processo di compostaggio, valutate in equivalenti di CO<sub>2</sub>, risultano comunque inferiori a quelle che si sarebbero sviluppate smaltendo la stessa quantità di rifiuto organico in discarica (Marmo, 2008). Il processo del compostaggio, infatti, è basato su reazioni ossidative che portano alla degradazione della sostanza organica con la liberazione, per la maggior parte, di CO<sub>2</sub> che, come detto in precedenza, è di origine biogenica, e non di CH<sub>4</sub> come avviene nel processo di fermentazione. Partendo dai dati delle quantità di rifiuto organico trattato con il processo di compostaggio, forniti da Sienambiente, sono state calcolate le emissioni di metano e protossido d'azoto, con riferimento all'equazione IPCC 4.1 (Vol. 5), moltiplicando la quantità di rifiuto organico trattata per i fattori di emissione di metano (fattore di emissione MNFE) e protossido d'azoto (fattore di emissione IPCC) in g/kg di rifiuto trattato (Tabella 2.4.8).

Tabella 2.4.8 Fattori di emissione per la stima delle emissioni da compostaggio dei rifiuti organici.

Quantità trattata	FE CH <sub>4</sub>	FE N <sub>2</sub> O
kg	g/kg	g/kg
17.903.000	0,05	0,30

L'impianto di selezione, valorizzazione delle raccolte differenziate e compostaggio in località "Pian delle Cortine", nel Comune di Asciano, è l'unico impianto di compostaggio presente nel territorio della Provincia di Siena nel 2007. Questo impianto ha trattato in tale anno 17.903.000 kg di rifiuto organico per la produzione di compost di qualità, con una variazione percentuale rispetto al 2006 pari a 6,2%, caratterizzato da 16.789.589 kg di rifiuto trattato. Il sistema

impiantistico è a “cumulo continuo aerato” caratterizzato dalla presenza di uno specifico sistema di insufflazione/aspirazione dell’aria per il corretto svolgimento dei fenomeni bioossidativi (Sienambiente, 2005). In Tabella 2.4.9 sono riportate le emissioni generate durante il processo di compostaggio.

Tabella 2.4.9 Emissioni di gas serra del processo di compostaggio.

Quantità trattata	Emissioni CH <sub>4</sub>	Emissioni N <sub>2</sub> O	Emissioni CO <sub>2eq</sub>
kg	kg	kg	kg
17.903.000	895	5.371	1.622.907

#### *Trattamento delle acque reflue*

La quantità di CH<sub>4</sub> prodotto dipende principalmente dalla quantità di materia organica degradabile presente nelle acque reflue, dalla temperatura alla quale avviene il processo e dal tipo di trattamento. Il trattamento di reflui con un alto contenuto di materia organica di origine residenziale e industriale può emettere una considerevole quantità di CH<sub>4</sub>. A livello mondiale le emissioni provenienti dallo smaltimento di acque reflue e fanghi ammontano all’8-11% di tutte le emissioni di metano. Le competenze in materia di trattamento delle acque reflue in Provincia di Siena sono suddivise tra le 4 ATO nelle quali è suddiviso il territorio.

In Tabella 2.4.10 sono riportati dati relativi alla potenzialità massima e reale in abitanti equivalenti (AE) dei depuratori per le acque reflue civili e la portata delle acque di scarico ai depuratori gestiti da ogni ATO. Per abitante equivalente si intende il carico organico biodegradabile avente una richiesta biochimica di ossigeno a 5 giorni (BOD<sub>5</sub>) pari a 60 g di ossigeno al giorno. Questo indicatore ci permette di calcolare il carico organico contenuto nei reflui e quindi smaltito nei depuratori e di stimare le emissioni di metano originate durante il processo di trattamento. Per l’ATO 6 non è stato possibile ottenere la potenzialità reale allo scarico di tutti gli impianti utilizzati (gli unici valori a cui abbiamo potuto accedere derivano da statistiche pubblicate dal SIRA, <http://sira.arpad.toscana.it/sira/dep/DEPS.htm>). Si è deciso quindi, per gli impianti che non disponevano di questo dato di considerare un’utilizzazione media del carico potenziale pari al 69%, media di utilizzazione degli impianti per i quali avevamo i dati sia del carico potenziale che reale. Per quanto riguarda l’ATO 4, abbiamo calcolato la potenzialità reale allo scarico in AE a partire dalla portata d’acqua depurata espressa in m<sup>3</sup>/giorno, tenendo conto che ogni abitante equivalente consuma mediamente 200 l d’acqua giornalieri. L’ATO 2, invece, ha fornito i dati sia per quanto riguarda la potenzialità reale che di progetto dei suoi depuratori, mentre l’ATO 5 ha comunicato che nell’anno 2007 non aveva più in gestione nessun impianto di depurazione nella Provincia di Siena.



Tabella 2.4.10 Abitanti equivalenti potenziali e reali trattati dai gestori delle ATO in Provincia di Siena.

ATO	Nome ATO	Gestore	n° comuni serviti	n° impianti > 1000 AE	Potenzialità massima di progetto (AE)	Potenzialità reale allo scarico (AE)	m <sup>3</sup> di acqua trattata
2	Toscana Nord	Acque S.p.A.	2	1	75.050	38.175	*2.786.775
4	Valdarno	Nuove Acque	5	9	69.390	*42.765	3.121.838
5	Toscana Costa	Asa Livorno	0	0	0	0	0
6	Ombrone	Acquedotto del Fiora	29	36	231.210	*178.873	*12.822.911
	<b>Totale</b>		<b>36</b>	<b>46</b>	<b>375.650</b>	<b>259.813</b>	<b>18.731.524</b>

\* Dato stimato

In Tabella 2.4.11 vediamo il confronto tra l'anno 2006 ed il 2007 della potenzialità reale allo scarico degli impianti di depurazione delle acque reflue civili espressa in AE e la relativa variazione percentuale. La potenzialità reale allo scarico è sostanzialmente invariata, visto che il grado di approssimazione nel calcolo dovuta alla carenza di dati non ci consente di considerare significativo un calo del 2,7%.

Tabella 2.4.11 Confronto della potenzialità massima degli impianti delle acque reflue civili e variazione tra il 2006 e il 2007.

2006	2007	Variazione 2006-2007
AE civili	AE civili	%
267.055	259.813	-2,7%

Per quel che riguarda le acque reflue di origine industriale, è stato fatto un inventario dei depuratori presenti sul territorio, ricorrendo ai dati riportati sulle autorizzazioni agli scarichi rilasciate ogni 4 anni dalla provincia a varie aziende operanti nel senese ed in possesso di depuratori propri. La potenzialità dei depuratori industriali è stata stimata pari a 131.511 AE. Abbiamo ritenuto di modificare il metodo adottato nel report sul 2006 in cui era stata inserita una stima della potenzialità dei depuratori delle acque reflue industriali ricavabile dalla Relazione sullo Stato dell'Ambiente della Regione Toscana (2000). Il confronto tra 2006 e 2007 degli AE industriali è riportato nella Tabella 2.4.12, insieme alla relativa variazione percentuale.

Tabella 2.4.12 Confronto tra la potenzialità massima degli impianti per le acque reflue industriali nel 2006 e nel 2007, con variazione percentuale.

2006	2007	Variazione 2006-2007
AE industriali	AE industriali	%
261.000	131.511	-49,6

Resta sempre difficile stabilire criteri di oggettività nel calcolo degli AE dei depuratori delle acque reflue industriali; il primo ed ovvio motivo è che il calcolo dovrebbe essere fatto sul carico organico per persona per giorno e, purtroppo, solo alcune industrie si prestano a questa valutazione. La seconda difficoltà è dovuta alla fonte dei dati ed alle diverse situazioni locali. Non tutte le industrie determinano scarichi assimilabili ai civili; vi sono molti casi di industrie

che recapitano in fognatura civile essendo i propri reflui perfettamente compatibili con un trattamento depurativo tradizionale biologico a fanghi attivi. Ciò nonostante, molti carichi inquinanti di origine industriale non sono omogenei tra di loro poiché la composizione degli scarichi delle attività è molto variabile: la presenza di taluni inquinanti e la loro concentrazione sono strettamente correlate alle materie prime trattate ed al ciclo produttivo utilizzato.

La potenzialità in AE degli impianti di depurazione industriale fornita dagli uffici amministrativi della Provincia di Siena è stata in massima parte stimata dagli esperti dell'Amministrazione Provinciale e dall'ARPAT a partire dalla portata d'acqua depurata espressa in m<sup>3</sup> giornalieri e considerando il consumo medio di ogni abitante pari a circa 200 l d'acqua al giorno. Quindi, secondo questo approccio di valutazione, è stato ipotizzato che i carichi inquinanti dei reflui industriali siano assimilabili a quelli di origine civile o di natura domestica. Il dato pubblicato nell'inventario 2006, che partiva dai dati del Rapporto sullo Stato dell'Ambiente della Regione Toscana (2000) era stato stimato, invece, considerando il carico di COD (Domanda Chimica di Ossigeno). Da queste differenti ipotesi deriva la forte variazione percentuale tra l'anno 2006 ed il 2007 sugli AE dei depuratori delle acque reflue industriali. C'è comunque da considerare che nella Provincia di Siena non sono presenti grandi insediamenti industriali e molti depuratori privati appartengono ad aziende agricole e ad agriturismi, lasciandoci propendere per un'ipotesi di assimilazione degli scarichi industriali a quelli domestici.

Nel presente inventario è stata aggiunta anche la capacità di raccolta delle acque reflue nelle fosse biologiche gestite dalle ATO operanti sul territorio provinciale, corrispondente a 7.180 AE (valore che sarà aggiornato nel prossimo inventario). Il valore in AE riferito alle fosse biologiche non è stato incluso nei calcoli dell'inventario del 2006, per la mancata disponibilità di questo dato.

Per il calcolo delle emissioni di metano si è fatto riferimento all'equazione IPCC 6.1 (Volume 5) utilizzando come dato di attività il dato di BOD delle acque civili e industriali.

$$Emissioni CH_4 = (BOD_{totale} - BOD_{fanghi}) \cdot FE$$

Il fattore di emissione è stato calcolato con l'equazione IPCC 6.2:

$$FE = B_0 \cdot MCF$$

dove:

B<sub>0</sub> è la capacità massima di produzione di metano, kg CH<sub>4</sub> (kg BOD)<sup>-1</sup>

MCF è il fattore di correzione del metano

La capacità di produzione del metano è di 0,06 kg CH<sub>4</sub> (kg BOD)<sup>-1</sup>, valore di *default* IPCC, mentre il fattore di correzione di metano utilizzato è di 0,1, valore assegnato a impianti aerobici di trattamento delle acque reflue (range 0-0,1). E' stato scelto il valore di 0,1 poiché molti depuratori, pur essendo ben gestiti, non lavorano in condizioni ottimali in quanto il volume trattato è in media il 70% di quello potenziale. Per le fosse biologiche sono stati scelti gli stessi valori di *default*.

Le emissioni di metano da trattamento delle acque reflue sono presentate in Tabella 2.4.13. Le emissioni generate dal trattamento dei fanghi di depurazione, che sono smaltiti in discarica, sono già state trattate nella sezione sulle emissioni da smaltimento in discarica dei rifiuti. La quantità di BOD abbattuta con i fanghi, pari al 22% del totale, è quindi sottratta da quella totale delle acque reflue.

Tabella 2.4.13 Emissioni di metano da trattamento delle acque reflue.

BOD totale	BOD fanghi	BOD trattato negli impianti	EF	Emissioni nette di metano
kg BOD (anno) <sup>-1</sup>	kg BOD (anno) <sup>-1</sup>	kg BOD (anno) <sup>-1</sup>	kg CH <sub>4</sub> (kg BOD) <sup>-1</sup>	kg CH <sub>4</sub> (anno) <sup>-1</sup>
8.727.241	1.968.920	6.758.321	0,06	405.499

Le emissioni di N<sub>2</sub>O sono invece associate alla degradazione dei composti azotati presenti nelle acque reflue, come ad esempio urea, nitrati e proteine. Emissioni dirette di N<sub>2</sub>O possono essere generate sia durante la nitrificazione che la denitrificazione dell'azoto presente, e questi processi possono avvenire sia all'interno dell'impianto di trattamento che nel corpo recettore delle acque depurate. Tipicamente le emissioni dirette che si sviluppano all'interno dell'impianto sono molto inferiori a quelle indirette che si generano nell'effluente dove sono scaricate le acque. La stima delle emissioni di protossido d'azoto dal trattamento delle acque reflue utilizza l'equazione IPCC 6.7 di seguito riportata, dove l'azoto scaricato nell'effluente è moltiplicato per lo specifico fattore di emissione e per il rapporto dei pesi molecolari di protossido d'azoto e azoto.

$$EmissioniN_2O = N_{effluente} \cdot FE_{effluente} \cdot 44,0128/28,0134$$

La quantità di azoto presente nell'effluente è stata calcolata utilizzando l'equazione IPCC 6.8, poiché non è stato possibile ottenere informazioni sulla concentrazione di azoto totale nell'effluente di tutti i depuratori (ma solamente per alcuni comuni che ricadono nell'ATO 4, mentre per gli altri è stato calcolato con una proporzione a partire dalla concentrazione di azoto in uscita dei dati dell'inventario del 2006).

$$N_{effluente} = (P \cdot proteine \cdot F_{NPR} \cdot F_{NC} \cdot F_{IND-COM}) - N_{fanghi}$$

dove:

P è la popolazione

Proteine è la quantità di proteine ingerite per persona, kg (persona\*anno)<sup>-1</sup>

F<sub>NPR</sub> è la frazione di azoto nelle proteine, valore di *default* 0,16 kg N (kg proteina)<sup>-1</sup>

F<sub>NC</sub> fattore per la quantità di proteine non consumate che finiscono nell'effluente

F<sub>IND-COM</sub> fattore per la stima delle proteine di origine industriale che finiscono nell'effluente

N<sub>fanghi</sub> è la quantità di azoto che è rimossa con i fanghi, kg N (anno)<sup>-1</sup>

I dati di attività utilizzati per la stima dell'azoto presente nelle acque di scarico sono gli abitanti, corretti per le presenze turistiche, e il consumo pro-capite di proteine. Mentre il primo è un dato ISTAT (Tabella 2.4.14), per il secondo è stato utilizzato il dato medio di consumo di

proteine al giorno che per l'OMS si attesta a 0,75 g di proteine per kg di peso. Considerando un uomo medio di 70 kg per 365 giorni si ottengono 19,16 kg per persona per anno. I parametri per la frazione di azoto nelle proteine, la frazione di proteine non consumate e la frazione di proteine di origine industriale, sono fattori di *default* IPCC.

Tabella 2.4.14 Confronto della popolazione e variazione percentuale tra il 2006 ed il 2007.

Popolazione	2006	2007	Variazione (2006-2007)
Abitanti	261.894	262.990	0,4%
Turisti al giorno	12.356	12.751	3,2%
<b>Totale</b>	<b>274.250</b>	<b>275.741</b>	<b>0,5%</b>

Le emissioni di protossido d'azoto generate nel processo di smaltimento delle acque reflue sono state calcolate a partire dal consumo di proteine pro-capite. La quantità stimata di azoto presente nell'effluente trattato è presentata in Tabella 2.4.15.

Tabella 2.4.15 Quantità di azoto totale che finisce nell'effluente.

Popolazione e + turisti	Consumo di proteine pro capite	Frazione di N nelle proteine	Fattore per le proteine non consumate	Fattore per le proteine di origine industriale o commerciale	Azoto totale nell'effluente (prima della depurazione)
	Kg (persona·anno) <sup>-1</sup>	kg N (kg proteine) <sup>-1</sup>			kg N (anno) <sup>-1</sup>
275.741	19,16	0,16	1,1	1,25	1.162.303

Rispetto all'anno 2006, caratterizzato dalla presenza di 1.156.018 kg N (anno)<sup>-1</sup> nell'effluente, il 2007 ha visto un aumento dell'azoto nelle acque di scarico pari allo 0,5%, quindi con una variazione percentuale irrilevante, nonostante l'aumento del 3% della presenza giornaliera dei turisti.

Dalla quantità totale di azoto nell'effluente trattato si è calcolato quello effettivamente scaricato considerando la frazione abbattuta nei depuratori. Per quanto riguarda l'ATO 4, si dispone del dato di azoto totale in ingresso. Per l'azoto in uscita dai depuratori, sono stati forniti dati relativi a soli due impianti (Ruoti - Chianciano Terme, 9,5 mg·l<sup>-1</sup> di azoto e Ribussolaia - Chianciano Terme, 14 mg·l<sup>-1</sup> di azoto), mentre tutti gli altri sono stati calcolati grazie ad una riproporzione al 2007 dei dati riportati sull'inventario del 2006, ipotizzando che il funzionamento dei depuratori sia rimasto identico. Moltiplicando i mg/l di azoto sia in ingresso che in uscita dai depuratori per i m<sup>3</sup> di acqua trattata abbiamo ottenuto la quantità di azoto totale che entra ed esce dai depuratori. E' stata infine stimata per i depuratori gestiti dall'ATO 4 una percentuale di abbattimento dell'azoto in entrata pari all'80%. Per l'ATO 2, invece, sono stati disponibili i dati che riguardano sia l'azoto in entrata che quello in uscita da tutti i depuratori utilizzati, stimando una percentuale di abbattimento pari all'84%. L'ATO 6 ha fornito

un valore medio sia dell'azoto in ingresso che di quello in uscita su tutti i depuratori provinciali, consentendo di calcolare una percentuale di abbattimento del 90%. Considerando i valori stimati per i differenti ATO, abbiamo ottenuto una media dell'88% dell'azoto abbattuto dagli impianti di depurazione operanti in Provincia di Siena nell'anno 2007. Questo dato può essere soggetto a grande incertezza poiché non si conosce l'efficienza reale di tutti i depuratori in provincia nell'abbattimento dell'azoto (a seconda, ad esempio, della presenza di un trattamento di denitrificazione delle acque prima dello scarico). Nell'inventario del 2006, invece, la quantità di azoto effettivamente scaricato era stata calcolata considerando solamente la frazione abbattuta nei depuratori dell'ATO 4, poiché si trattava dell'unica che aveva messo a disposizione il dato di azoto totale in ingresso ed in uscita, con valore medio di abbattimento pari all'80%. Per calcolare le emissioni di protossido d'azoto è stato utilizzato il fattore di emissione di *default* IPCC (Tabella 2.4.16.)

Tabella 2.4.16 Emissioni di protossido d'azoto da trattamento delle acque reflue.

N totale nell'effluente (prima della depurazione) kg N (anno) <sup>-1</sup>	N rimosso dai fanghi %	N totale nell'effluente (dopo la depurazione)	EF <i>effluente</i> kg N <sub>2</sub> O-N (kg N) <sup>-1</sup>	Fattore conversione	Emissioni totali di N <sub>2</sub> O kg N <sub>2</sub> O (anno) <sup>-1</sup>
1.162.303	0,88	142.595	0,005	44,0128/28,0134 1,57	1.120

Le emissioni complessive del settore rifiuti sono riportate per categoria di emissione e per gas serra emesso in Tabella 2.4.17. Nella Figura 2.4.4 si evince come lo smaltimento in discarica sia di gran lunga la fonte di emissione più importante del settore rifiuti (91%), seguito dalle emissioni di metano e protossido d'azoto dal trattamento delle acque reflue (8%), mentre l'1% è attribuibile alla selezione di compostaggio della frazione organica.

Tabella 2.4.17 Emissioni di GHG dal settore rifiuti per categoria di emissione e gas serra.

Categorie di emissione		t CO <sub>2eq</sub>
Gas	Sorgente di emissione	
CH <sub>4</sub>	Smaltimenti dei rifiuti in discarica	120.771
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	22
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	10.137
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	1.601
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	334
<b>Totale settore rifiuti</b>		<b>132.865</b>

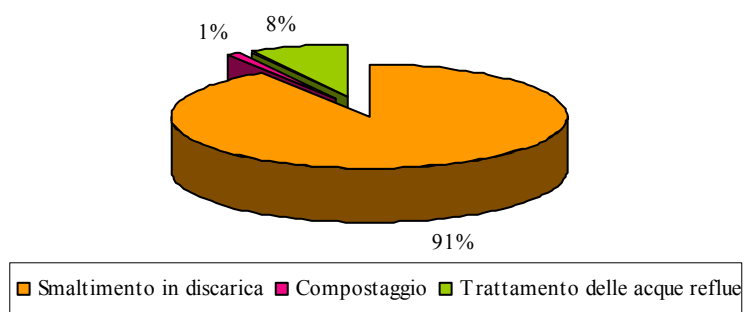


Figura 2.4.4 Responsabilità per processo di smaltimento (le percentuali sono in quantità di CO<sub>2eq</sub> sul totale).

In Tabella 2.4.18 è riportato il confronto delle emissioni in CO<sub>2eq</sub> per processo di smaltimento dei rifiuti e le variazioni percentuali rispetto al 2006; gli stessi dati sono visualizzabili anche in Figura 2.4.5. Lo smaltimento dei rifiuti in discarica è caratterizzato da una variazione percentuale positiva nelle emissioni di metano pari al 10%, seguito dal metano ed il protossido d'azoto rilasciato dal compostaggio della frazione organica (circa il 7%), mentre la gestione delle acque reflue ha visto una diminuzione nelle emissioni sia di metano (-24,5%) che di protossido d'azoto (-38,3%). Complessivamente il settore Rifiuti è caratterizzato da un aumento delle emissioni nei differenti processi di smaltimento pari al 6% circa.

Tabella 2.4.18 Confronto delle emissioni per processo di smaltimento delle emissioni del settore rifiuti e variazioni percentuali corrispondenti.

Sorgente di emissione	t di CO <sub>2eq</sub> - 2006	t di CO <sub>2eq</sub> - 2007	Variazione 2006-2007
Smaltimenti dei rifiuti in discarica (CH <sub>4</sub> )	109.978	120.771	9,8%
Compostaggio della frazione organica (CH <sub>4</sub> )	21	22	6,6%
Gestione delle acque reflue (CH <sub>4</sub> )	13.433	10.137	-24,5%
Compostaggio della frazione organica (N <sub>2</sub> O)	1.501	1.601	6,6%
Gestione delle acque reflue (N <sub>2</sub> O)	541	334	-38,3%
<b>Totale</b>	<b>125.475</b>	<b>132.865</b>	<b>5,9%</b>

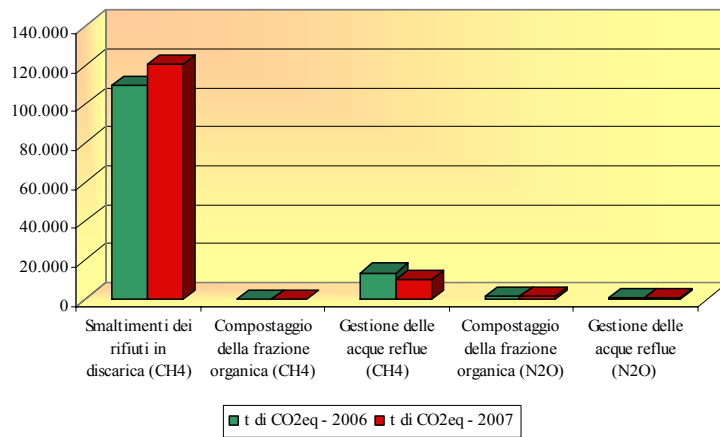


Figura 2.4.5 Confronto tra il 2006 del il 2007 delle emissioni per processo di smaltimento dei rifiuti.

## 2.5 SETTORE AGRICOLTURA, FORESTE E USO DEL SUOLO (AFOLU)

Il settore agricoltura, foreste e uso del suolo comprende le seguenti categorie di emissione:

- Variazione dello stock di carbonio;
- Allevamento degli animali;
- Attività agricole;

In questo settore, nella categoria di variazione dello stock di carbonio, è contabilizzato l'assorbimento di CO<sub>2</sub> delle foreste e delle colture perenni durante l'accrescimento annuale della biomassa.

I flussi di CO<sub>2</sub> tra l'atmosfera e gli ecosistemi sono controllati principalmente dall'assorbimento attraverso la fotosintesi e dal rilascio attraverso la respirazione, decomposizione e combustione della materia organica. Il N<sub>2</sub>O è emesso principalmente dai processi di nitrificazione e denitrificazione mentre il CH<sub>4</sub> è emesso durante la fermentazione enterica degli animali d'allevamento, la metanogenesi in condizioni anaerobiche nei suoli (coltivazione del riso), la gestione del letame e, in minor quantità, durante i processi di combustione condotti in carenza di ossigeno, ad esempio durante la pratica di bruciatura delle stoppie. In molti processi sono generati anche gas serra indiretti (es. combustione e lisciviazione). Nel settore AFOLU sono contabilizzate tutte le emissioni e le rimozioni che avvengono nelle aree che sono modificate dall'attività antropica, mentre non sono riportate quelle che avvengono in zone naturali non utilizzate dall'uomo. La scelta di utilizzare le aree gestite dall'uomo come *proxy* per gli effetti antropici è suggerita nelle linee guida IPCC "Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry" nel 2000 (IPCC, 2000). Questo è il quadro generale per le attività contabilizzate nel settore agricoltura, foreste e altri usi del suolo (Tabella 2.5.1).

Tabella 2.5.1 Categorie di emissione incluse nel settore AFOLU.

Gas serra	Categoria	Fonte dato di attività	Qualità FE
CO <sub>2</sub>	Assorbimento forestale e agricolo	IFR, IPCC, letteratura	IPCC
CO <sub>2</sub>	Utilizzazioni forestali	Dati corpo forestale	IPCC
CO <sub>2</sub>	Incendi	Dati corpo forestale	IPCC
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	ISTAT	IPCC
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	Camera di Commercio	MNFE
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	Camera di Commercio	MNFE
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	ISTAT	IPCC
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	ISTAT	IPCC
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	ISTAT	IPCC



### 2.5.1 Variazione dello stock di carbonio

Per valutare le variazioni degli stock di carbonio, ovvero per stimare il bilancio netto tra emissioni e assorbimento di CO<sub>2</sub>, la metodologia IPCC si basa sull'assunzione che i cambiamenti dello stock di carbonio in un ecosistema avvengano principalmente attraverso lo scambio di CO<sub>2</sub> tra superficie terrestre e l'atmosfera, assumendo, ad esempio, la lisciviazione trascurabile. In questo modo, un aumento dello stock di carbonio nel tempo equivale ad una rimozione netta di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera e una diminuzione dello stock ad un'emissione netta in atmosfera. Il calcolo delle emissioni connesse alla variazione degli stock di carbonio nella biomassa, nella materia organica morta e nel suolo, deve essere applicata ad ognuna delle sei categorie di uso del suolo individuate dalla metodologia IPCC, ovvero: 1) aree coperte di boschi e foreste, 2) aree coltivate, 3) prati e pascoli, 4) aree umide, 5) aree urbane, 6) altri tipi di uso del suolo. La metodologia IPCC prevede la contabilizzazione della variazione dello stock di carbonio per cinque delle sei categorie di uso del suolo come riportato in Figura 2.5.1 (non ci sono vere e proprie zone umide in Provincia di Siena).

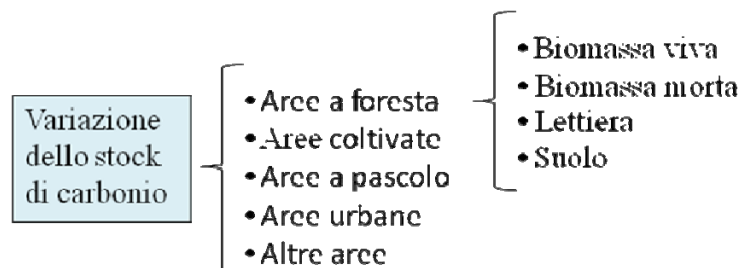


Figura 2.5.1 Struttura dell'inventario delle emissioni dovute alla variazione dello stock di carbonio.

Non è stato possibile valutare l'entità del cambiamento nell'uso del suolo nei 20 anni presi come periodo temporale di riferimento dalla metodologia IPCC (2000). Si è quindi valutato solamente l'assorbimento annuale di anidride carbonica delle aree forestali e di quelle coltivate con specie perenni. Inoltre, la variazione dello stock di carbonio è stata elaborata solamente per la biomassa viva, mentre non è stata stimata per la "necromassa", per la lettiera e per il suolo, a causa della carenza di dati sulla gestione della lettiera nei boschi e sul contenuto di carbonio organico nei suoli coltivati. Il supporto tecnico alle linee guida per i cambiamenti per l'uso del suolo (IPCC, 2003) prevede la possibilità di considerare nulla la variazione dello stock di sostanza organica contenuta nella lettiera, nel suolo e nella sostanza organica morta (Dead Organic Matter, DOM), purché tali componenti non rappresentino una fonte di immissione di carbonio in atmosfera. Tale assunzione, pur considerando i noti elementi di incertezza relativi alla valutazione di questi pool, è stata verificata da numerosi studi relativi all'ambiente forestale (Liski et al., 2002; Lasserre et al., 2006; Tognetti et al., 2006).

Questa assunzione costituisce sicuramente una sottostima del potenziale di assorbimento, poiché circa i due terzi del carbonio presente negli ecosistemi forestali a livello mondiale risiede nel suolo, nello specifico per le zone temperate questa percentuale è stimata nel 60%, in quelle boreali nell'80% e in quelle tropicali al 50% (Dixon et al., 1994). È stato utilizzato il metodo "Gain-Loss", il quale prevede che la variazione dello stock di carbonio sia calcolata sottraendo al carbonio fissato nella biomassa vegetale (durante l'accrescimento annuale), il carbonio della biomassa rimossa nell'anno dell'inventario (Eq. IPCC 2.7, Volume 4).

$$\Delta C_B = \Delta C_G - \Delta C_L$$

dove:

$\Delta C_B$  è la variazione annuale dello stock di C nella biomassa (epigea e ipogea), t C anno<sup>-1</sup>

$\Delta C_G$  è l'incremento annuale dello stock di C dovuto alla crescita della biomassa di ogni categoria di uso del suolo, t C anno<sup>-1</sup>

$\Delta C_L$  è il decremento annuale dello stock di C dovuto alla perdita della biomassa di ogni categoria di uso del suolo, t C anno<sup>-1</sup>

La stima della variazione dello stock di carbonio nella biomassa è stata effettuata per le categorie di uso del suolo *aree a foreste* e *aree coltivate*. Una volta ottenuta la variazione dello stock di carbonio come differenza tra il carbonio fissato e quello perso si possono ottenere le tonnellate di CO<sub>2</sub> moltiplicando il valore ottenuto per ± 44,0095/12,0107, con segno negativo se si tratta di un assorbimento, e positivo se si tratta di una rimozione.

In Tabella 2.5.2 è riportata l'evoluzione della superficie forestale negli ultimi 20 anni secondo i dati del primo Inventario Forestale Nazionale del 1985, dell'Inventario Forestale Regionale del 1999, della Carta delle Foreste della Provincia di Siena del 2003 e del suo recente aggiornamento al 2007.

Tabella 2.5.2 Evoluzione della superficie forestale in Provincia di Siena dal 1985 al 2007.

Fonte dati	Anno	ha superficie forestale
1° Inventario Forestale Nazionale	1985	130.401
Inventario Forestale Regionale Toscana	1999	143.424
Carta delle foreste della Provincia di Siena	2003 (costruita su una mappa dell'Uso del Suolo del 1999)	145.726
Carta delle foreste del 2003 aggiornata al 2007 (Università degli Studi di Siena)	2007	161.930

- *Aree a foresta*

La superficie forestale utilizzata nel calcolo dell'assorbimento annuale di CO<sub>2</sub> è stata stimata ricorrendo all'uso di ArcGIS, confrontando tra di loro le superfici boschive di due differenti mappe informative. La prima mappa utilizzata è quella che si riferisce alle aree forestali: da questa si può risalire alle superfici delle differenti tipologie di bosco presenti su tutto il territorio provinciale (per esempio, gli ettari di Bosco di Querce ed Olmi, Castagneto, Bosco di Pini, etc). Tale carta georeferenziata risale al 2003 ed è stata impiegata per la quantificazione degli ettari di bosco utilizzati per i calcoli dell'inventario dei gas serra del 2006. La seconda carta è derivata da ortofoto scattate nel 2007, rilasciate dal Consorzio Terrecastrate, ed è stata

sovrapposta e confrontata con la precedente. A causa della ristrettezza dei tempi abbiamo deciso di operare in prima approssimazione andando a stimare le differenze fra le due mappe. Inoltre i dati sono stati ottenuti tramite fotointerpretazione, senza l'ausilio di sopralluoghi diretti, mantenendo in generale le tipologie di bosco della mappatura precedente. A causa di queste approssimazioni abbiamo deciso di attenerci a stime prudenziali, calcolando la differenza di CO<sub>2eq</sub> assorbita (fra i dati elaborati per il 2006 ed il 2007) per poi detrarre l'errore ricavato dall'analisi di incertezza (circa 30%; vedi Capitolo 4). Ovviamente i dati saranno ricalcolati in seguito con maggiore precisione.

La suddivisione per forma di governo delle specie gestite sia a fustaia che a ceduo, perlopiù querceti, è stata effettuata utilizzando le proporzioni dell'Inventario Forestale Regionale (IFR, 1999). I tassi di incremento annuo della biomassa delle specie governate a fustaia sono valori medi in m<sup>3</sup> (ha)<sup>-1</sup> dei boschi produttivi dell'IFR, mentre i tassi di accrescimento del ceduo sono stati ottenuti dividendo il valore del *growing stock* (biomassa in crescita) specifico (dati IFR) per turno di taglio medio, considerato pari a 24 anni, secondo quanto riportato anche nelle indagini sullo stato delle foreste toscane (CRA, 2002; ARSIA, 2006). La tipologia forestale identificata come "ceduo" si riferisce a cedui di querceti misti. I parametri utilizzati in input per la stima dell'accrescimento della biomassa forestale sono riportati nella Tabella 2.5.3.

Riflettendo la situazione comune a tutto il territorio toscano, la maggior parte della superficie forestale della Provincia di Siena è costituita da querceti, dominati in prevalenza da cerro e roverella, governati a ceduo, che da soli ricoprono 123.275 ha della superficie forestale complessiva (Figura 2.5.2). In totale la variazione fra i dati utilizzati per l'inventario 2006 e quelli del 2007 ammonta a circa 16.000 ettari, con un incremento dell'11% (Tabella 2.5.4). Questa grande differenza si spiega con il fatto che il dato utilizzato per l'inventario 2006 era in realtà relativo all'anno 1999, ed elaborato nel 2003. Era all'epoca l'ultimo dato disponibile e, evidentemente, negli otto anni trascorsi da quel rilevamento, c'è stato un incremento cospicuo di area forestale.

Tabella 2.5.3 Dati utilizzati per la stima dell'accrescimento della biomassa forestale.

Tipo bosco	Superficie	Forma di governo	Incremento per ettaro	Growing stock
	ha		m <sup>3</sup> (ha·anno) <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> (ha) <sup>-1</sup>
Fonte del dato	Aggiornamento al 2007 della carta delle foreste del 2003	IFR*	IFR	IFR
Abete	310		17,90	381
Larice	5		17,90	381
Pino	9.833		10,30	245
Cipresso	66		14,00	128
Castagno F	644	F**	9,10	226
Castagno C	4.088	C**	7,00	170
Faggio F	784	F	9,90	288
Faggio C	451	C	7,00	206
Roverella F	1.624	F	4,70	109
Roverella C	38.548	C	3,21	77
Cerro F	3.429	F	6,40	157
Cerro C	58.041	C	4,42	106
Leccio F	1.083	F	5,80	190
Leccio C	26.687	C	5,42	130
Ceduo	10.328		4,42	106
Pioppo	2.539		10,00	227
Macchia arborea	3.031		1,80	103
Macchia arbustiva	440		1,5	22
<b>Totale</b>	<b>161.930</b>			

\* IFR: Inventario Forestale Regionale

\*\* F: Governo a fustaia C: governo a ceduo

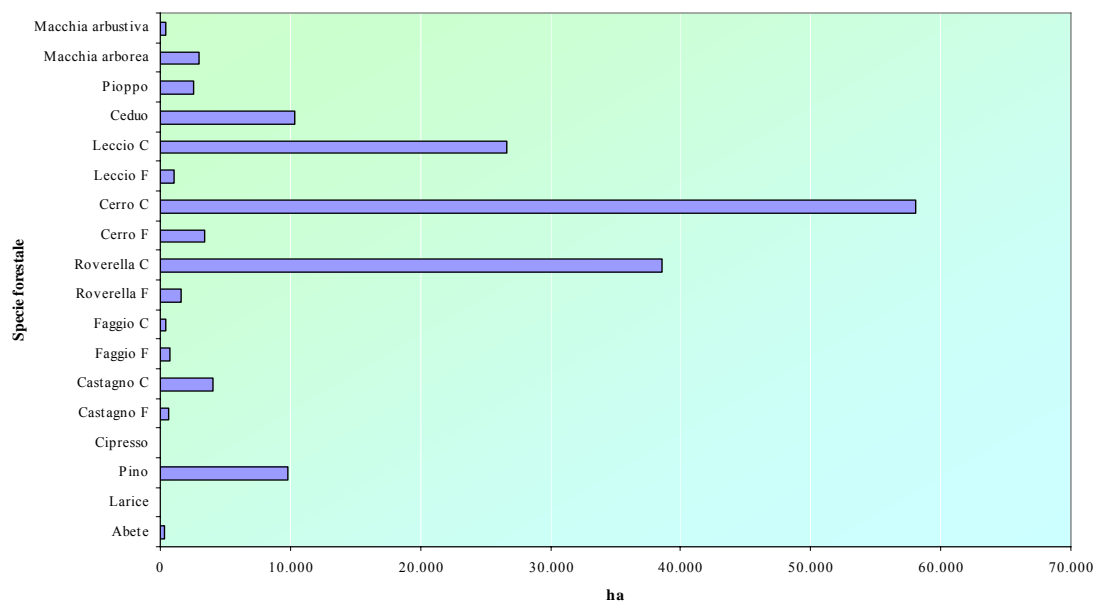


Figura 2.5.2 Composizione per specie forestale e forma di governo della superficie forestale.

Tabella 2.5.4 Confronto degli ettari della superficie forestale tra 2006 e 2007 con variazione percentuale.

Tipo di bosco	ha (2006)	ha (2007)	Variazione % (2006-2007)
Abete	285	310	8,6%
Larice	5	5	0,0%
Pino	9.340	9.833	5,3%
Cipresso	66	66	-0,5%
Castagno F	641	644	0,5%
Castagno C	4.069	4.088	0,5%
Faggio F	777	784	0,8%
Faggio C	447	451	0,8%
Roverella F	1.466	1.624	10,8%
Roverella C	34.795	38.548	10,8%
Cerro F	3.095	3.429	10,8%
Cerro C	52.390	58.041	10,8%
Leccio F	978	1.083	10,8%
Leccio C	24.089	26.687	10,8%
Ceduo	9.916	10.328	4,1%
Pioppo	314	2.539	707,8%
Macchia arborea	2.665	3.031	13,7%
Macchia arbustiva	387	440	13,7%
<b>Totale</b>	<b>145.726</b>	<b>161.930</b>	<b>11,1%</b>

La variazione dello stock di carbonio è stata elaborata utilizzando il metodo IPCC *Gain-Loss* secondo il quale la variazione annuale è data dall'incremento annuo della biomassa meno la quantità persa. L'incremento di carbonio include l'accrescimento della biomassa epigea e ipogea, mentre la perdita di carbonio deriva dalle utilizzazioni forestali e dalla biomassa persa nelle zone percorse dal fuoco.

### *Carbon gain*

L'incremento annuale della biomassa forestale è stato calcolato a partire dalla seguente equazione (Eq. IPCC 2.9, Vol 4):

$$\Delta C_G = \sum_i (A_i \cdot G_{total_i} \cdot CF_i)$$

dove:

A è l'area di una tipologia forestale, ha

$G_{total}$  è la crescita media della biomassa totale, t s.s. ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>

CF frazione di carbonio nella sostanza secca, t C (t s.s.)<sup>-1</sup>

i specie forestale

Sono stati utilizzati i valori di *default* della frazione di carbonio nella biomassa legnosa di conifere e latifoglie della Tabella IPCC 4.3, pari rispettivamente a 0,51 e 0,48 t C (t s.s.)<sup>-1</sup>.

L'incremento annuale medio della biomassa, come somma della biomassa aerea e radicale, è stato calcolato con la seguente equazione, utilizzando il Tier 2 (Eq. IPCC 2.10).

$$G_{total} = \sum \{ I_w \cdot BCEF_i \cdot (1 + R) \}$$

dove:

$I_w$  è l'incremento medio annuale per una specifica vegetazione, m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> anno<sup>-1</sup>

BCEF<sub>i</sub> è il fattore di conversione e espansione utilizzato per stimare la biomassa radicale, t biomassa aerea (m<sup>3</sup> di incremento)<sup>-1</sup>

R rapporto tra la biomassa radicale e quella aerea per una specifica vegetazione.

I valori del tasso di accrescimento annuo medio in  $\text{m}^3 (\text{ha})^{-1}$  delle specie forestali e del *growing stock* provengono dall'Inventario Forestale Regionale della Toscana (Tabella 2.5.3). Questi valori si riferiscono al tasso di accrescimento delle fustaie e dei boschi produttivi, mentre non sono disponibili valori per gli altri tipi di destinazione d'uso del bosco (protettivo e ricreativo) e per i cedui. La scelta di usare comunque questi valori è motivata dal fatto che i boschi produttivi costituiscono, nei dati dell'inventario regionale il 90% della superficie forestale provinciale.

Tabella 2.5.5 Fattori di conversione e espansione e rapporto biomassa ipogea/epigea utilizzati.

Tipo di bosco	<i>Growing stock</i> $\text{m}^3 (\text{ha})^{-1}$	Fattore di conversione e di espansione $\text{t} (\text{m})^{-3}$	Rapporto tra la biomassa ipogea e epigea $\text{t } b_i \text{ s.s.} (\text{t } b_e \text{ s.s.})^{-1}$
	IFR	BCEF <sub>i</sub>	R
Abete	381	0,60	0,20
Larice	381	0,60	0,20
Pino	245	0,69	0,29
Cipresso	128	0,53	0,40
Castagno F	226	0,48	0,46
Castagno C	170	0,60	0,46
Faggio F	288	0,48	0,46
Faggio C	206	0,48	0,46
Roverella F	109	0,60	0,30
Roverella C	77	0,90	0,30
Cerro F	157	0,60	0,30
Cerro C	106	0,60	0,30
Leccio F	190	0,60	0,30
Leccio C	130	0,60	0,30
Ceduo	106	0,60	0,30
Pioppo	227	0,48	0,24
Macchia arborea	103	0,90	0,30
Macchia arbustiva	22	1,30	0,46

\*  $b_i$  = biomassa ipogea;  $b_e$  = biomassa epigea

I valori del fattore di espansione della biomassa (BCEF<sub>i</sub>) e del rapporto radici/chioda (R) utilizzati sono di default IPCC. Per la scelta dei valori BCEF<sub>i</sub> si sono utilizzati i valori della Tabella IPCC 4.5 ricorrendo ai valori di *growing stock* contenuti nell'IFR (Tabella 2.5.5). Per la scelta dei valori del rapporto tra biomassa ipogea e epigea sono stati utilizzati i valori di default della Tabella IPCC 4.4 riferiti a zone con clima temperato, a partire dai valori di *growing stock* dell'IFR.

Tabella 2.5.6 Incremento annuale di C nei boschi della Provincia di Siena.

Superficie delle categorie inventariali del BOSCO	Superficie per tipo di bosco	Incremento annuo del volume della biomassa	Fattore di conversione ed espansione della biomassa	Rapporto tra la biomassa ipogea e epigea	Crescita media annua della biom. epigea e ipogea	Frazione di carbonio della materia secca	Totale C	Totale CO <sub>2</sub>
	ha	m <sup>3</sup> (ha·anno) <sup>-1</sup>	t biomassa (m <sup>-3</sup> )	t b <sub>i</sub> s.s. (t b <sub>e</sub> s.s.) <sup>-1</sup>	t s.s. (ha) <sup>-1</sup>	t C (t s.s.) <sup>-1</sup>	t C (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
Eq. e fonti			Default IPCC Tab. 4.5	Default IPCC Tab. 4.4	Eq. 2.10 Tier 2	Default IPCC Tab. 4.3	Eq. 2.9	
Eq. utilizzata					$G_{total} = I_v \cdot BCEF_I \cdot (1+R)$		$\Delta C = A \cdot G_{total} \cdot CF$	
	A	I <sub>v</sub>	BCEF <sub>I</sub>	R	G <sub>total</sub>	CF		
Abete	310	17,90	0,60	0,20	12,9	0,51	2.035	7.456
Larice	5	17,90	0,60	0,20	12,9	0,51	33	121
Pino	9.833	10,30	0,69	0,29	9,2	0,51	45.976	168.466
Cipresso	66	14,00	0,53	0,40	10,4	0,51	351	1.284
Castagno F	644	9,10	0,48	0,46	6,4	0,48	1.970	7.220
Castagno C	4.088	7,08	0,60	0,46	6,2	0,48	12.175	44.612
Faggio F	784	9,90	0,48	0,46	6,9	0,48	2.609	9.561
Faggio C	451	8,58	0,48	0,46	6,0	0,48	1.301	4.766
Roverella F	1.624	4,70	0,60	0,30	3,7	0,48	2.858	10.474
Roverella C	38.548	3,21	0,90	0,30	3,8	0,48	69.455	254.498
Cerro F	3.429	6,40	0,60	0,30	5,0	0,48	8.217	30.110
Cerro C	58.041	4,42	0,60	0,30	3,4	0,48	95.976	351.675
Leccio F	1.083	5,80	0,60	0,30	4,5	0,48	2.352	8.617
Leccio C	26.687	5,42	0,60	0,30	4,2	0,48	54.121	198.310
Ceduo	10.328	4,42	0,60	0,30	3,4	0,48	17.078	62.576
Pioppo	2.539	10,00	0,48	0,24	6,0	0,48	7.253	26.578
Macchia arborea	3.031	1,80	0,90	0,30	2,1	0,48	3.064	11.229
Macchia arbustiva	440	1,50	1,30	0,46	2,8	0,48	602	2.206
<b>Totale</b>	<b>161.930</b>				<b>109,8</b>		<b>327.428</b>	<b>1.199.758</b>

Utilizzando i dati ed i parametri riportati nelle Tabelle 2.5.3 e 2.5.5 per il calcolo dell'assorbimento forestale di ogni tipo di copertura boschiva presente nella Provincia di Siena, la quantità complessiva di carbonio fissata dalle specie forestali presenti è di 327.428 t di carbonio (Tabella 2.5.6), pari a 1.199.758 t di CO<sub>2</sub>.

In Tabella 2.5.7 è riportato il confronto tra i dati dell'inventario 2006 ed i dati 2007 del carbonio accumulato e della relativa CO<sub>2</sub> assorbita dalle differenti specie forestali nella Provincia di Siena.

Tabella 2.5.7 Assorbimento forestale e variazione percentuale tra il 2006 ed il 2007.

Tipo di bosco	Inventario 2006	Inventario 2006	2007	2007	Variazione 2006-2007
	t C	t CO <sub>2</sub>	t C	t CO <sub>2</sub>	%
Abete	1.763	6.466	2.035	7.456	15,3%
Larice	31	114	33	121	6,2%
Pino	41.100	150.701	45.976	168.466	11,8%
Cipresso	332	1.216	351	1.284	5,7%
Castagno F	2.084	7.640	1.970	7.220	-5,5%
Castagno C	12.875	47.208	12.175	44.612	-5,5%
Faggio F	2.750	10.082	2.609	9.561	-5,2%
Faggio C	1.371	5.026	1.301	4.766	-5,2%
Roverella F	2.741	10.052	2.858	10.474	4,2%
Roverella C	66.612	244.243	69.455	254.498	4,2%
Cerro F	7.881	28.896	8.217	30.110	4,2%
Cerro C	92.047	337.505	95.976	351.675	4,2%
Leccio F	2.255	8.270	2.352	8.617	4,2%
Leccio C	51.905	190.319	54.121	198.310	4,2%
Ceduo	17.423	63.883	17.078	62.576	-2,0%
Pioppo	954	3.498	7.253	26.578	659,8%
Macchia arborea	2.863	10.497	3.064	11.229	7,0%
Macchia arbustiva	562	2.062	602	2.206	7,0%
<b>Totale</b>	<b>307.549</b>	<b>1.127.679</b>	<b>327.428</b>	<b>1.199.758</b>	<b>6,4%</b>

### Carbon loss

La biomassa persa nell'anno dell'inventario è stata calcolata includendo quella combusta negli incendi e quella rimossa con le utilizzazioni forestali, facendo riferimento all'Eq. IPCC 2.11. Rispetto a questa equazione non è stata considerata la biomassa legnosa utilizzata come legna da ardere ( $L_{fuelwood}$ ), oltre a quella già compresa nelle utilizzazioni forestali.

$$\Delta C_L = L_{wood-removal} + L_{disturbances}$$

dove:

$L_{wood-removal}$  è la biomassa rimossa con le utilizzazioni forestali

$L_{disturbance}$  è la biomassa persa a causa degli incendi



### Biomassa arborea delle superfici percorse da incendio

La perdita di biomassa nelle aree percorse dal fuoco è stata contabilizzata utilizzando l'Eq. 2.14 della metodologia IPCC per la biomassa persa per disturbi all'ecosistema forestale. Non è stata considerata la combustione del carbonio contenuto nella lettiera e nel suolo. L'equazione utilizzata è la seguente:

$$L_{disturbance} = A_{disturbance} \cdot B_W \cdot (1+R) \cdot CF \cdot fd$$

dove:

A è l'area percorsa dal fuoco per specie forestale, ha

$B_W$  biomassa disponibile per la combustione, t ha<sup>-1</sup>

CF frazione di carbonio

Fd frazione della biomassa persa

R rapporto tra biomassa radicale e quella aerea per una specifica vegetazione.

I dati sulle superfici forestali percorse dal fuoco, suddivise per tipo di bosco, sono stati forniti dal Coordinamento Provinciale del Corpo Forestale. Per calcolare la biomassa epigea disponibile per la combustione ( $B_W$ ) sono stati utilizzati i dati di *growing stock* per tipo di bosco per ettaro, contenuti nell'Inventario Forestale Regionale, moltiplicati per i rispettivi valori di densità basale di *default* IPCC.

Poiché le categorie delle superfici forestali percorse dal fuoco non sono dettagliate per specie forestale prevalente si è deciso di riportare ad una specie forestale presente nelle tabelle IPCC, per poter utilizzare i parametri dell'inventario forestale. Le approssimazioni utilizzate sono riportate in Tabella 2.5.8.

Tabella 2.5.8 Dati utilizzati per il calcolo della biomassa disponibile per la combustione.

Aree boscate	<i>Growing stock</i>	Dato utilizzato	Densità basale	Dato utilizzato
ha	m <sup>3</sup> (ha) <sup>-1</sup>		t d.m. (m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup>	
Forestale	IFR	IFR	Default IPCC Tab 4.14	Default IPCC Tab 4.14
Altofusto resinose	245	Pino	0,32	<i>Pinus strobus</i>
Altofusto latifoglie	170	Castagno	0,58	<i>Fagus sylvatica</i>
Altofusto misto	170	Castagno	0,58	<i>Fagus sylvatica</i>
Ceduo semplice e matricinato	106	Cerro	0,58	<i>Quercus spp.</i>
Ceduo composto	106	Cerro	0,58	<i>Quercus spp.</i>
Boschi radi e fort. degradati	103	Macchia mediterranea	0,58	<i>Quercus spp.</i>
Macchia mediterranea	103	Macchia mediterranea	0,58	<i>Quercus spp.</i>

La biomassa disponibile per ettaro è stata moltiplicata per gli ettari di ogni tipo di bosco in modo da ottenere la biomassa totale per tipo di bosco. Dalla biomassa epigea è stata ricavata quella ipogea utilizzando il rapporto tra la biomassa ipogea/epigea (R), utilizzando i valori di *default* IPCC. La quantità di biomassa totale combusta è stata moltiplicata per la frazione di carbonio (0,51 per le conifere e 0,48 per le latifoglie) e poi per la frazione della biomassa

effettivamente distrutta dall'incendio, che è stata considerata pari al 100%, utilizzando un approccio conservativo.

La quantità di carbonio contenuta nella biomassa persa a causa degli incendi è riportata in Tabella 2.5.9. Come è possibile notare dai dati riportati in questa tabella, si è potuto assistere ad una diminuzione del numero di incendi che ha portato ad una perdita di carbonio nel 2007 praticamente uguale a quella dell'anno precedente (29 ha e 28 ha rispettivamente).

Tabella 2.5.9 Calcolo delle emissioni provocate dalla perdita di biomassa forestale a seguito degli incendi di aree boscate verificatesi nel 2007, secondo i dati del Corpo Forestale Provinciale. Si è considerato che l'incendio distrugga il 100% della biomassa presente, senza intaccare il suolo e la lettiera, approccio considerato valido nella metodologia IPCC per incendi non distruttivi

Tipo di area	Area percorsa dal fuoco	<i>Growing stock</i> (incremento annuo del fusto e dei rami grossi)	Densità basale	Biomassa epigea	Rapporto tra la biomassa ipogea e epigea	Frazione di carbonio	Frazione di biomassa persa	Perdita annuale di carbonio per incendio
	ha	m <sup>3</sup> (ha) <sup>-1</sup>	t s.s. m <sup>-3</sup>	t s.s.	t b <sub>i</sub> s.s. (t b <sub>e</sub> s.s.) <sup>-1</sup>	t C (t s.s.) <sup>-1</sup>		t C anno <sup>-1</sup>
Eq. e fonti	Forestale	IFR	Default IPCC					Eq. 2.14
Equazione utilizzata			Tab. 4.14	BW= G.S. • D.B.	Default IPCC Tab. 4.4	Default IPCC Tab. 4.3	Default	$L_{dist}=A_{dist} \cdot B_W \cdot (1+R) \cdot CF \cdot fd$
	<i>A<sub>disturbance</sub></i>	<i>G.S.</i>	<i>D.B.</i>	<i>B<sub>W</sub></i>	<i>R</i>	<i>CF</i>	<i>fd</i>	<i>L<sub>disturbance</sub></i>
<b>Aree boscate</b>								
Altofusto resinose	3,03	245,00	0,32	78,40	0,20	0,51	1,00	145,57
Altofusto latifoglie	0,02	170,00	0,58	98,60	0,24	0,48	1,00	1,17
Altofusto misto	0,06	170,00	0,58	98,60	0,24	0,48	1,00	3,64
Ceduo semplice e matricinato	2,73	106,00	0,58	61,48	0,30	0,48	1,00	104,84
Ceduo composto	1,84	106,00	0,58	61,48	0,30	0,48	1,00	70,77
Boschi radi e fort. degradati	21,60	103,00	0,58	59,74	0,30	0,48	1,00	805,20
Macchia mediterranea	0,00	103,00	0,58	59,74	0,46	0,48	1,00	0,00
<b>Totale</b>	<b>29,29</b>							<b>1.131</b>

### *Biomassa rimossa con le utilizzazioni forestali*

Sono stati elaborati due scenari per la contabilizzazione delle emissioni legate alle utilizzazioni forestali, dei quali il primo utilizza la stessa metodologia dell'inventario nazionale, mentre il secondo considera la destinazione di impiego dei prodotti legnosi. I due scenari possono essere così schematizzati:

1. Il carbonio contenuto nelle utilizzazioni forestali è stato detratto completamente da quello dell'accrescimento annuo della biomassa forestale, indipendentemente dall'uso del legname tagliato.
2. Le utilizzazioni forestali sono state distinte per tipologia di uso, e le emissioni sono state attribuite al sistema territoriale dove il legname è utilizzato.

Nel secondo scenario le utilizzazioni legnose di conifere sono state considerate utilizzate completamente per prodotti durevoli (mobili, edilizia, etc.) e quindi non ne sono state contabilizzate le emissioni. Per quel che riguarda le utilizzazioni di specie forestali di latifoglie, da informazioni raccolte presso il Coordinamento Provinciale del Corpo Forestale, si è appreso che la quasi totalità del legname tagliato viene utilizzato come legna da ardere, e di questa circa l'80% viene esportata fuori dal territorio della Provincia di Siena. Proprio per questo si è deciso di addebitare le emissioni relative alla frazione esportata al territorio dove la legna è effettivamente consumata, responsabilizzando i territori rispetto all'uso dell'energia. Quindi per questo scenario solamente il 20% della biomassa legnosa da latifoglie è stato detratto dall'accrescimento annuo della biomassa forestale, quella bruciata localmente.

Il metodo utilizzato per stimare la quantità di carbonio perso con la rimozione di biomassa legnosa dai boschi attraverso le utilizzazioni forestali parte dall'equazione elaborata a partire dall'eq. IPCC 2.12.

$$L_{\text{wood-removals}} = \{Q \cdot CF\}$$

dove:

$L_{\text{wood-removals}}$  quantità di C perso a causa della rimozione della biomassa, t C anno<sup>-1</sup>

Q biomassa delle utilizzazioni forestali t s.s. anno<sup>-1</sup>

CF frazione di carbonio nella sostanza secca, t C (t s.s.)<sup>-1</sup>

I dati sulle utilizzazioni forestali sono stati forniti dal Corpo Forestale in tonnellate di legname di conifere e di latifoglie. La quantità di legname fresco tagliato è stata trasformata in tonnellate di materia secca moltiplicando il dato in input per 0,5, ipotizzando un contenuto in acqua pari al 50% del peso fresco.

In Tabella 2.5.10 sono presentate le quantità di biomassa persa per le utilizzazioni forestali secondo i due scenari, illustrati sopra.

Tabella 2.5.10 Scenari di contabilizzazione del carbonio contenuto nella biomassa rimossa con le utilizzazioni forestali. Nello scenario I sono state considerate tutte le utilizzazioni forestali di latifoglie e conifere. Nello scenario II si sono considerate solamente le utilizzazioni che si stima siano utilizzate entro i confini principali, ovvero solamente il 20% delle latifoglie, utilizzate come legna da ardere.

Scenario I	Quantità di biomassa rimossa	Quantità di biomassa	Frazione di carbonio	C perso per rimozione della biomassa	Totale CO <sub>2</sub>
	t	t s.s.	t C (t s.s.) <sup>-1</sup>	t C (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
Eq. e fonti	Forestale		CF	$L_{\text{wood-removals}} = t \cdot CF$	
Latifoglie	63.539	31.770	0,48	15.249	55.877
Conifere	3.971	1.986	0,51	1.013	3.710
<b>Totale</b>	<b>67.510</b>	<b>33.755</b>		<b>16.262</b>	<b>59.587</b>
Scenario II	Quantità di biomassa rimossa	Quantità di biomassa	Frazione di carbonio	C perso per rimozione della biomassa	Totale CO <sub>2</sub>
	t	t s.s.	[t C (t s.s.) <sup>-1</sup> ]	t C (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
Eq. e fonti	Forestale		CF	$L_{\text{wood-removals}} = t \cdot CF$	
Latifoglie	12.708	6354	0,48	3.050	11.175
Conifere	0	0	0,51	0	0
<b>Totale</b>	<b>12.708</b>	<b>6354</b>		<b>3.050</b>	<b>11.175</b>

Di seguito sono riportati il confronto tra il 2006 ed il 2007 di questi due differenti scenari di contabilizzazione delle utilizzazioni forestali e la variazione percentuale tra i due anni studiati (Tabella 2.5.11).

Tabella 2.5.11 Confronto dei due scenari di contabilizzazione della biomassa rimossa con le utilizzazioni forestali e variazione percentuale tra il 2006 ed il 2007.

Scenario I	2006	2007	Variazione 2006-2007
	t C (anno) <sup>-1</sup>	t C (anno) <sup>-1</sup>	%
Latifoglie	37.038	15.249	-58,8%
Conifere	826	1.013	22,6%
<b>Totale</b>	<b>37.865</b>	<b>16.262</b>	<b>-57,1%</b>
Scenario II	2006	2007	Variazione 2006-2007
	t C (anno) <sup>-1</sup>	t C (anno) <sup>-1</sup>	%
Latifoglie	7.408	3.050	-0,6
Conifere	0	0	---
<b>Totale</b>	<b>7.408</b>	<b>3.050</b>	<b>-0,6</b>

Come si può notare nel 2007 è fortemente diminuito il taglio dei boschi rispetto al 2006, registrando una diminuzione del 57% nel primo scenario (anche se è caratterizzato dall'aumento di circa il 23% delle utilizzazioni forestali di conifere), mentre il secondo scenario vede una diminuzione percentuale dello 0,6% rispetto al 2006.

#### *Aree coltivate*

La quantità di carbonio immagazzinato o rilasciato dalla biomassa di colture permanenti dipende dal tipo di coltura, dalle pratiche agricole, dal suolo e dal clima di un determinato territorio. Ad

esempio le colture annuali (es. cerealicole ed orticole) sono raccolte, appunto, ogni anno; in questo modo non si ha un accumulo di carbonio nella biomassa. Al contrario, le colture arboree, quali frutteti, vigneti e oliveti, possono immagazzinare quantità significative di carbonio nella biomassa legnosa. E' stato considerato quindi l'accumulo di carbonio nella biomassa legnosa delle specie arboree coltivate, quali vigneti, utilizzando i dati ISTAT di superficie coltivata a specie legnose.

Utilizzando i dati di letteratura validi per il Centro Italia (Centro di Ricerca sulle Biomasse, Università di Perugia) per i valori di residui colturali che è possibile ottenere da frutteti, oliveti e vigneti si è poi ipotizzato che questi corrispondano all'80% della crescita totale annuale della pianta e che quindi il 20% dell'accrescimento rimanga sulla pianta. Questa quantità è stata moltiplicata per il valore di umidità medio del legno per ottenere le tonnellate di sostanza secca per ettaro. Questo valore è stato poi moltiplicato per gli ettari di coltura legnosa e per la frazione di carbonio tipica delle colture legnose agricole, pari a 0,5 t C per tonnellata di sostanza secca.

Utilizzando i dati delle superfici coltivate a specie pluriennali arboree forniti dall'ISTAT si è potuto contabilizzare anche l'assorbimento di CO<sub>2</sub> legato alle specie agrarie. Queste hanno, in Provincia di Siena un certo rilievo, specialmente per quel che riguarda vigneti e oliveti.

Nella Tabella 2.5.12 è presentato il calcolo per l'incremento in carbonio della biomassa agraria effettuato in un anno dagli ettari coltivati con colture arboree. L'incremento netto delle colture perenni o arboree nel 2007 è di 4.073 tonnellate di carbonio, che rispetto a quello forestale riveste un'importanza minore, anche se non trascurabile.

Tabella 2.5.12 Incremento annuale di carbonio nelle colture arboree e assorbimento in CO<sub>2</sub>.

Coltura legnosa	Area a coltivazioni legnose	Residui colturali	Biomassa totale	Biomassa sulla pianta	Umidità	Biomassa	Incremento annuo della biomassa	Frazione di carbonio nella biomassa	Totale C	Assorbimento di CO <sub>2</sub>
	ha	t (ha) <sup>-1</sup>	t (ha) <sup>-1</sup>	t (ha) <sup>-1</sup>	%	t s.s. (ha) <sup>-1</sup>	t s.s.	t C (t s.s.) <sup>-1</sup>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
	A	RC	$RC/80 \cdot 100$	$B_{20\%} = B_{tot}/100 \cdot 20$	U	$B_{ss} = B_{20\%} \cdot U$	$B = A \cdot B_{ss}$	CF	$\Delta C_B = B \cdot CF$	
Frutteto	89	2,6	3,25	0,65	0,50	0,33	28,9	0,5	14	53
Vigneto	18.812	2,9	3,63	0,73	0,35	0,25	4773,5	0,5	2387	8.746
Oliveto	15.200	2,2	2,75	0,55	0,40	0,22	3344,0	0,5	1672	6.127
<b>Totale</b>	<b>34.101</b>								<b>4.073</b>	<b>14.925</b>

La variazione percentuale della diminuzione del carbonio assorbito dalle colture arboree è pari a -0,8%, ad indicare che le superfici di frutteti, vigneti ed oliveti sono rimasti pressoché uguali tra il 2006 ed il 2007.

Il bilancio del carbonio compreso l'assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte delle specie legnose è riportato nella Tabella 2.5.13.

Tabella 2.5.13 Bilancio del carbonio forestale e agricolo nell'anno 2007.

<i>Gain - loss method</i>	Equazione 2.7 (metodologia IPCC, 2006)	
	SCENARIO I	SCENARIO II
<b>Carbon Gain</b>	$\Delta C_G$ t C (anno) <sup>-1</sup>	$\Delta C_G$ t C (anno) <sup>-1</sup>
Assorbimento forestale	327.428	327.428
Assorbimento specie agrarie	4.073	4.073
<i>Total Gain</i>	331.501	331.501
<b>Carbon Loss</b>	$\Delta C_L$ t C (anno) <sup>-1</sup>	$\Delta C_L$ t C (anno) <sup>-1</sup>
Aree forestali percorse da fuoco	1.131	1.131
Utilizzazioni forestali	16.262	3.050
<i>Total Loss</i>	17.393	4.181
<b>Variazione annuale dello stock di C nella biomassa</b>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>
		314.108
	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
		1.150.952
		327.320
		1.199.363

Nella Tabella 2.5.14 è riportato il confronto tra il 2006 ed il 2007 della variazione annuale dello stock di carbonio nella biomassa nei due scenari di contabilizzazione studiati. Si può notare una variazione rispetto al 2006 del 15% per il primo scenario e dell'8% per il secondo, mostrando, in entrambi i casi, un aumento dell'assorbimento di carbonio nella biomassa legnosa, nonostante la diversità nella metodologia di calcolo per l'attribuzione della responsabilità delle emissioni dovute alle utilizzazioni forestali.

Tabella 2.5.14 Confronto tra il 2006 ed il 2007 della variazione dello stock di carbonio.

	SCENARIO I	SCENARIO II
<b>2006</b>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>
		272.595
	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
		999.517
<b>2007</b>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>	$\Delta C_B$ t C (anno) <sup>-1</sup>
		314.108
	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>
		1.150.952
<b>Variazione % (2006-2007)</b>	15,2%	7,9%

Ritenendo di dover contabilizzare queste emissioni con un approccio legato al consumo effettivamente realizzato entro i confini provinciali è stato scelto per il bilancio delle emissioni il secondo scenario.

## 2.5.2 Emissioni delle attività agricole

Le emissioni di gas serra strettamente legate alle attività agricole si possono dividere in due grandi categorie secondo la sorgente di emissione: l'attività zootecnica, fonte di emissioni di metano (CH<sub>4</sub>) da fermentazione enterica di bovini, ovini, suini e equini e da gestione del letame; l'aggiunta di azoto al suolo, apportata da fertilizzanti sintetici, ammendanti organici e residui colturali. Oltre a generare CH<sub>4</sub>, il letame è responsabile di emissioni di protossido di azoto in piccola entità, che possono risultare rilevanti visto l'elevato potenziale serra che ha questo gas.

### *Emissioni da attività zootecnica: fermentazione enterica*

Il metano è prodotto negli erbivori come un co-prodotto della fermentazione enterica, il processo digestivo che vede i carboidrati aggrediti dalla flora microbica e ridotti in molecole più semplici. La quantità di CH<sub>4</sub> prodotta con la fermentazione enterica degli animali allevati dipende principalmente dal numero di capi, dal tipo di sistema digestivo e dal cibo consumato. Bovini, bufalini e ovini costituiscono le specie principali per le emissioni di CH<sub>4</sub> enterico.

Per il calcolo di questa categoria di emissioni sono stati utilizzati dati di attività locali (n° capi allevati) e fattori di emissioni nazionali, utilizzando una metodologia di Tier 1, ovvero non è stata effettuata una caratterizzazione della popolazione e dell'alimentazione degli animali allevati. I dati relativi ai capi allevati in Provincia di Siena nel 2007 sono stati ricavati dalle statistiche dell'Anagrafe Zootecnica Nazionale per quel che riguarda i bovini e dalla Camera di Commercio di Siena per tutti gli altri. In Tabella 2.5.15 sono presentati i fattori di emissione, tratti dal Manuale Nazionale dei Fattori di Emissione (MNFE), in kg di CH<sub>4</sub> per capo per anno. La stima delle emissioni prodotte è stata effettuata utilizzando l'equazione IPCC 10.19, dove il numero di capi è moltiplicato per il rispettivo fattore di emissione.

Tabella 2.5.15 Fattori di emissione del metano da fermentazione enterica per differenti capi allevati.

Tipo di capo allevato	Fattore di emissione (MNFE)
	kg CH <sub>4</sub> (capo*anno) <sup>-1</sup>
	FE
Bovini da carne	53,6
Bovini da latte	117,6
Ovini	8,0
Caprini	5,0
Equini	18,0
Suini	1,5

L'attività zootecnica in Provincia di Siena è basata principalmente, almeno stando al numero di capi, sull'allevamento ovino e suino, mentre l'allevamento bovino, pur presentando elementi di pregio, quali ad esempio l'allevamento della razza chianina, ha un ruolo secondario. Nonostante



i fattori di emissione dei bovini (in kg di metano prodotto in un anno per capo) siano molto più elevati di quelli delle altre specie, specialmente per i bovini da latte, le emissioni maggiori sono comunque prodotte dall'allevamento ovino (Figura 2.5.3). Le emissioni da fermentazione enterica degli animali allevati sono riportate in Tabella 2.5.16, nella quale è presentato anche il confronto tra il 2006 ed il 2007, sia del numero dei capi allevati che delle emissioni di CH<sub>4</sub> da fermentazione enterica con relative variazioni percentuali. Complessivamente, nel 2007 si può notare un aumento delle emissioni di metano da fermentazione enterica pari al 3.6% rispetto al 2006.

Tabella 2.5.16 Emissioni di metano da fermentazione enterica (confronto tra i dati al 2006 e 2007).

Tipo di capo allevato	2006	2007	2006	2007	Variazione 2006-2007
	n° capi	n° capi	kg CH <sub>4</sub>	kg CH <sub>4</sub>	%
Bovini da carne	11.125	10.161	596.300	544.630	-8,7%
Bovini da latte	1.847	2.470	217.207	290.472	33,7%
Ovini	114.864	119.905	918.912	959.240	4,4%
Caprini	1.638	1.974	8.190	9.870	20,5%
Equini	4.307	5.173	77.526	93.114	20,1%
Suini	45.690	38.111	68.535	57.167	-16,6%
<b>Totale</b>	<b>179.471</b>	<b>177.794</b>	<b>1.886.670</b>	<b>1.954.492</b>	<b>3,6%</b>

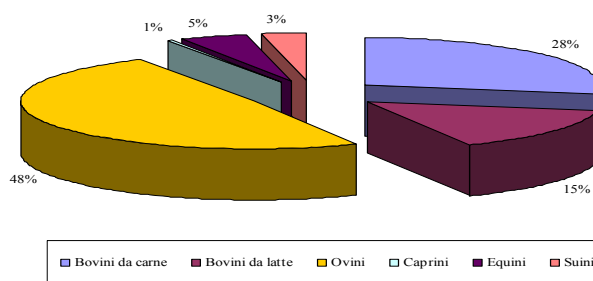


Figura 2.5.3 Emissioni di metano da fermentazione enterica per specie allevata.

#### *Emissioni di metano da gestione del letame*

L'allevamento degli animali è fonte di emissioni di gas serra anche per quel che riguarda la gestione e lo smaltimento delle deiezioni prodotte. Lo stoccaggio e il trattamento del letame negli allevamenti industriali e la deposizione del letame degli animali al pascolo sono fonte di emissioni di metano e di protossido d'azoto. Sono stati utilizzati come dati di attività il numero di capi allevati e come fattori di emissione in kg di metano per capo da gestione del letame prodotto i valori riportati nel MNFE, utilizzando una metodologia di livello Tier 1 (Eq. IPCC 10.22). I fattori di emissione per le emissioni di metano sono presentati in Tabella 2.5.17.

Tabella 2.5.17 Fattori di emissione del metano dovute alla gestione del letame prodotto negli allevamenti.

Tipo di capo allevato	Fattore di emissione (MNFE) kg CH <sub>4</sub> (capo anno) <sup>-1</sup>
	FE
Bovini da carne	11,80
Bovini da latte	20,00
Ovini	0,19
Caprini	0,12
Equini	1,40
Suini	8,24

Le emissioni di metano dovute alla gestione del letame prodotto sono riportate in Tabella 2.5.18, nella quale c'è, anche, il confronto con l'anno precedente ed i rispettivi valori percentuali delle differenze. Si può notare una diminuzione delle emissioni del 10,3% rispetto all'anno di riferimento. Questo dato è in controtendenza rispetto al precedente sulle emissioni da fermentazione enterica in quanto qui il ruolo dominante è giocato dall'allevamento suino che ha visto una diminuzione dal 2006 al 2007.

Tabella 2.5.18 Emissioni di metano dovute alla gestione del letame prodotta dagli animali allevati (confronto 2006-2007 e variazioni percentuali)

Tipo di capi allevati	2006 kg CH <sub>4</sub>	2007 kg CH <sub>4</sub>	Variazione 2006-2007 %
Bovini da carne	131.275	119.900	-8,7%
Bovini da latte	36.940	49.400	33,7%
Ovini	21.824	22.782	4,4%
Caprini	197	237	20,5%
Equini	6.030	7.242	20,1%
Suini	376.486	314.035	-16,6%
<b>Totale</b>	<b>572.751</b>	<b>513.595</b>	<b>-10,3%</b>

#### *Emissioni di protossido d'azoto da gestione del letame prodotto*

In questa sezione sono contabilizzate le emissioni di protossido d'azoto prodotte direttamente o indirettamente dallo stoccaggio e dalla gestione del letame prodotto dagli animali allevati, prima che questo sia applicato al suolo. Le emissioni dirette di N<sub>2</sub>O sono prodotte dai processi di nitrificazione e denitrificazione dell'azoto contenuto nel letame, durante i processi di stoccaggio e trattamento; le emissioni indirette sono generate dalle perdite di NO<sub>x</sub>. Le emissioni di N<sub>2</sub>O sviluppate dal letame prodotto dagli animali al pascolo saranno considerate nella prossima sezione sulle emissioni da addizione di azoto al suolo, mentre sono considerate le emissioni dagli allevamenti a stabulazione fissa.

Si è considerato che l'allevamento dei bovini da latte sia condotto in stabulazione fissa per l'80% degli animali, mentre il restante 20% sia in allevamento estensivo, attenendoci ai dati forniti dall'Associazione Senese Allevatori. I bovini da carne risultano invece allevati per il 50% in stabilimenti a stabulazione fissa mentre l'altra metà è al pascolo.

Per i suini è stata utilizzata la recente classificazione della Camera di Commercio dove sono divisi tra “suini” (razze locali come la cinta senese) ed “altri suini” (allevamenti industriali). In accordo con questa classificazione è stato ipotizzato che l’85% del totale dei suini sia a stabulazione fissa. Gli equini e gli ovini sono per lo più allevati al pascolo. Nell’inventario del 2006, invece, era stato supposto che l’allevamento dei bovini, sia da latte che da carne, fosse condotto in stabulazione fissa per il 95% degli animali; sul totale dei suini allevati soltanto gli “altri suini” erano ritenuti a stabulazione fissa, mentre gli equini e gli ovini erano tutti al pascolo.

E’ stato utilizzato un livello di Tier 2 della metodologia, impiegando l’equazione IPCC 10.25, propria del Tier 1, ma utilizzando come tassi di escrezione dell’azoto i valori nazionali (Regione Emilia-Romagna, 2007).

La quantità di azoto che è applicato al suolo con il letame, è calcolato a partire dall’equazione IPCC 10.34, nella quale all’azoto totale escreto vengono sottratte le frazioni perse in emissioni dirette e indirette.

Le emissioni dirette di azoto sono state stimate a partire dal tasso di escrezione annuo, moltiplicato per il fattore di emissione IPCC di  $0,002 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N escreto)}^{-1}$ , e questo a sua volta moltiplicato per il fattore di conversione, in massa, da azoto a protossido di azoto ( $44,0128/28,0134$ ). E’ stato inoltre considerato l’apporto di azoto da parte dei giacigli degli animali allevati considerando le quantità per capo riportate in Tabella 2.5.19, da dati di *default* IPCC.

Tabella 2.5.19 Azoto contenuto nei giacigli degli animali allevati in stabulazione fissa.

Azoto contenuto nel giaciglio	$N_{\text{beddingMS}}$
	kg N (capo anno) <sup>-1</sup>
Bovini da latte	7
Bovini da carne	4
Suini	0,8

In Tabella 2.5.20 sono presentate le emissioni dirette di protossido d’azoto generate durante la gestione del letame prodotto dagli animali allevati in stabulazione fissa. Nel 2007 le emissioni dirette di protossido d’azoto da gestione del letame sono state 4.339 kg di  $\text{N}_2\text{O}$ , quindi con una variazione percentuale di -28,4% se confrontato con le emissioni del 2006 (6.061 kg di  $\text{N}_2\text{O}$ ).

Tabella 2.5.20 Emissioni dirette di N<sub>2</sub>O per gestione del letame prodotto negli allevamenti in stabulazione fissa.

Capo allevato in stabulazione fissa	n° capi	Azoto escreto	Totale N escreto	Tipo di smaltimento	Quantità di N perso per emissione diretta	Emissioni dirette di N <sub>2</sub> O da gestione del letame
		kg N (capo anno) <sup>-1</sup>	kg N tot			kg N <sub>2</sub> O
	n°	N <sub>ex</sub>	N <sub>ex tot</sub> =N*N <sub>ex</sub>	EF <sub>3</sub>		
Bovini da latte	1.976	110,20	217.755	0,002	436	684
Bovini da carne	5.081	48,50	246.404	0,002	493	774
Suini	32.394	28,30	916.760	0,002	1.834	2.881
<b>Totale</b>	<b>39.451</b>		<b>1.380.920</b>		<b>2.762</b>	<b>4.339</b>

Le emissioni indirette sono causate dalle perdite per volatilizzazione dell'azoto che avviene principalmente in forma di NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>x</sub>. A partire dai dati di attività e di conversione utilizzati fino ad ora è stato possibile utilizzare una metodologia di Tier 2.

La stessa quantità di azoto totale prodotto utilizzata per il calcolo delle emissioni dirette è stata anche adottata per calcolare la quantità di emissioni indirette prodotte dalla volatilizzazione, valendosi del fattore di emissione IPCC di 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N escreto)<sup>-1</sup>. Il valore della frazione che volatilizza è di *default* IPCC (30%) (Tabella 2.5.21).

Tabella 2.5.21 Emissioni indirette di protossido d'azoto per gestione del letame prodotto dagli animali allevati.

Capi allevato in stabulazione fissa	n° capi	Azoto escreto	Totale N escreto	Frazione che volatilizza come NH <sub>3</sub> e NO <sub>x</sub>	Azoto perso per volatilizzazione	EF <sub>4</sub>	Emissioni indirette di N <sub>2</sub> O
		kg N (capo anno) <sup>-1</sup>	kg N tot	%	kg N (anno) <sup>-1</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N	kg N <sub>2</sub> O
	n°	N <sub>ex</sub>	N <sub>ex tot</sub> =N*N <sub>ex</sub>	Frac <sub>gas</sub>	N <sub>vol</sub> =N <sub>ex tot</sub> *Frac <sub>gas</sub>	EF <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>vol</sub> =N <sub>vol</sub> *EF <sub>4</sub> *44,0128/28,0134
Bovini da latte	1.976	110,20	217.755	0,30	65.327	0,01	1.026
Bovini da carne	5.081	48,50	246.404	0,30	73.921		1.161
Suini	32.394	28,30	916.760	0,30	275.028		4.321
<b>Totale</b>	<b>39.451</b>		<b>1.380.920</b>		<b>414.276</b>		<b>6.509</b>

Nel 2007 le emissioni indirette di protossido d'azoto da gestione del letame prodotto dagli animali allevati a stabulazione fissa sono state pari a 6.509 kg di N<sub>2</sub>O e quindi si è avuta una diminuzione del 28,4% delle emissioni rispetto al 2006 (9.091 kg di N<sub>2</sub>O).

Le emissioni indirette per volatilizzazione e lisciviazione dell'azoto escreto dagli animali al pascolo sono contabilizzate nella sezione successiva. La restante quantità di azoto contenuta nel letame è utilizzata per il calcolo delle emissioni di protossido d'azoto dal suolo, dopo aver aggiunto al totale dell'azoto prodotto anche la quantità di azoto contenuta nel giaciglio degli animali (dati di *default* IPCC) (Tabella 2.5.22).

Tabella 2.5.22 Azoto contenuto nei giacigli.

Animale allevato	N contenuto nel giaciglio kg N
Bovini da latte	12.283
Bovini da carne	42.275
Suini	34.558
<b>Totale</b>	<b>89.116</b>

#### *Emissioni dirette da applicazione di azoto al suolo*

Le emissioni provenienti da input antropici possono derivare direttamente dal suolo fertilizzato o indirettamente dalla volatilizzazione dei fertilizzanti in forma di  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_x$ , i quali per successiva rideposizione e attraverso la lisciviazione e il run-off possono essere di  $\text{N}_2\text{O}$ .

L'attività agricola è, nel contempo, la principale fonte di emissioni di  $\text{N}_2\text{O}$ . Questo gas, in realtà, è prodotto naturalmente nel suolo in seguito ai processi microbici e di nitrificazione e denitrificazione. Il protossido d'azoto è il prodotto intermedio gassoso nella sequenza di reazioni che portano alla denitrificazione ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ ) ed è co-prodotto della nitrificazione che esce dalle cellule microbiche per finire nel suolo e infine in atmosfera. Uno dei principali fattori di controllo in questa reazione è la disponibilità di azoto inorganico nel suolo, che può aumentare in modo considerevole nei suoli agricoli. La metodologia IPCC permette di stimare le emissioni di  $\text{N}_2\text{O}$  attraverso la quantità di N distribuito al suolo dall'uomo, considerando quindi le attività di uso di fertilizzanti sintetici e di origine organica (letame), deiezioni degli animali al pascolo e i residui colturali. In questo modo aumenta l'azoto disponibile per i processi microbici e in definitiva aumenta la quantità di  $\text{N}_2\text{O}$  emesso. Sono inoltre fonte di  $\text{N}_2\text{O}$  la mineralizzazione di N nei terreni torbosi e la conversione di terreni a pascolo, forestali o urbani a terreni agricoli che non sono stati considerati nell'inventario.

#### *Emissioni dirette*

Le fonti d'azoto considerate per la stima delle emissioni dirette sono quindi:

- Fertilizzanti sintetici;
- Fertilizzanti organici;
- Deiezioni degli animali al pascolo;
- Residui colturali.

Non è stata inclusa la mineralizzazione di azoto associata alla perdita di sostanza organica. L'equazione IPCC di riferimento è la 11.1, sono stati utilizzati dati di attività provenienti dalle statistiche nazionali riferite alla scala provinciale dell'ISTAT e fattori di emissione di *default* che riportano la stima a un livello di Tier 1.

### *Azoto applicato al suolo con i fertilizzanti sintetici*

I dati di attività relativi all'applicazione di fertilizzanti sintetici al suolo derivano dalle statistiche annuali provinciali (ISTAT, 2007) di fertilizzanti azotati distribuiti.

In Tabella 2.5.23 è riportata la quantità di azoto applicata al suolo con i fertilizzanti azotati.

Tabella 2.5.23 Quantità di azoto distribuita con i fertilizzanti.

Tipo di fertilizzante	Quantità di fertilizzante distribuita		Quantità di azoto distribuita	
	tonnellate		tonnellate	
	2006	2007	2006	2007
Primari	16.754	17.920	5.123	5.666
Binari	4.875	4.721	889	862
Ternari	3.225	3.179	484	477
<b>Totale</b>	<b>24.854</b>	<b>25.820</b>	<b>6.495</b>	<b>7.005</b>

Rispetto ai dati pubblicati sull'inventario relativo al 2006, è possibile notare una variazione percentuale della quantità totale di fertilizzante utilizzata, e quindi di azoto distribuita al suolo, pari circa al 4% e all'8% rispettivamente.

### *Azoto applicato al suolo con i fertilizzanti organici*

Per i fertilizzanti organici è stato utilizzato l'apporto di azoto totale calcolato nella sezione precedente, come letame prodotto dagli animali allevati in stabulazione fissa. Non è stato invece considerato l'apporto di azoto organico da uso del compost poiché si conosce la quantità prodotta in Provincia di Siena ma non si dispone di stime di quella effettivamente applicata al suolo.

Fra 2006 e 2007 c'è stata una diminuzione dell'erogazione di fertilizzanti organici al suolo con una variazione percentuale rispetto al 2006 pari a -28,7%, poiché durante l'anno di riferimento sono stati applicati 1.435 t di azoto da fertilizzanti organici mentre nel 2007 solamente 1.024 t.

### *Azoto applicato al suolo dagli animali al pascolo*

L'azoto prodotto dagli animali al pascolo è calcolato a partire dal dato di attività degli animali allevati in modo estensivo e dal fattore di emissione di *default* IPCC, utilizzando un Tier 2 poiché si utilizzano fattori nazionali di escrezione di azoto per capo (Regione Emilia-Romagna, 2007), riportati in Tabella 2.5.24. Come detto in precedenza si è stimato che un 20% dei bovini da latte ed il 50% di quelli da carne fosse allevato al pascolo; inoltre sono contabilizzate le emissioni di suini (15%), equini, ovini e caprini. L'equazione utilizzata è la 11.5 IPCC.

Tabella 2.5.24 Fattore di emissioni del protossido d'azoto degli animali allevati al pascolo.

Azoto organico applicato al suolo dagli animali al pascolo	Azoto escreto kg N (capo anno) <sup>-1</sup>
Bovini da latte	110
Bovini da carne	49
Suini	28
Ovini	5
Equini	38

In Tabella 2.5.25 sono contabilizzate le emissioni di protossido di azoto generate dagli animali allevati al pascolo. Visto che nel 2006 erano stati prodotti dagli animali al pascolo 847.814 kg di azoto, nel 2007 c'è stato un incremento percentuale pari al 49%

Tabella 2.5.25 Azoto prodotto dagli animali al pascolo.

Azoto organico applicato al suolo	n° capi	Azoto prodotto dagli animali al pascolo
		kg N anno
	n°	$F_{PRP} = N \cdot N_{ex}$
Bovini da latte	494	54.439
Bovini da carne	5.081	246.404
Suini	5.717	161.781
Ovini	121.879	603.301
Equini	5.173	196.315
<b>Totale</b>	<b>138.343</b>	<b>1.262.241</b>

Si può notare come i più alti fattori di emissione siano da attribuire ai bovini da latte, anche se il maggior contributo proviene dagli ovini per il numero di animali al pascolo (Figura 2.5.4).

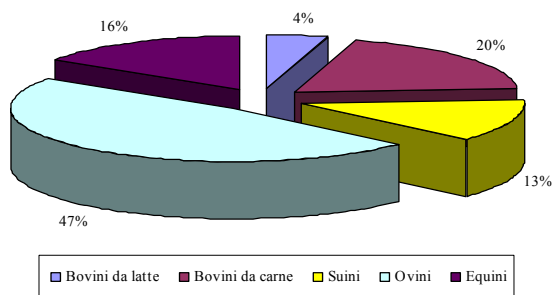


Figura 2.5.4 Ripartizioni delle emissioni di protossido d'azoto per specie allevata.

### Azoto applicato al suolo con i residui colturali

E' stato considerata l'applicazione di azoto al suolo da parte dei residui colturali che ritornano al suolo annualmente, considerando sia la biomassa epigea che ipogea. La produzione delle colture coltivate in Provincia di Siena è stata ottenuta da dati ISTAT. Dalla quantità prodotta è stata calcolata la sostanza secca utilizzando valori di *default* IPCC.

Per il calcolo dell'azoto apportato con i residui colturali si è utilizzata l'equazione IPCC 11.6 riportata di seguito:

$$F_{CR} = \sum_T \left\{ Crop_{(T)} \cdot Area_{(T)} \cdot Frac_{renew(T)} \left[ R_{AG(T)} \cdot N_{AG(T)} \cdot (1 - Frac_{remove(T)}) + R_{BG(T)} \cdot N_{BG(T)} \right] \right\}$$

Dove:

$F_{CR}$  quantità annuale di azoto nei residui colturali che ritorna al suolo ogni anno, kg N (anno)<sup>-1</sup>

$Crop$  resa in sostanza secca per ettaro per coltura coltivata, kg s.s. (ha)<sup>-1</sup>

$Area$  è l'area coltivata sottoposta a taglio della biomassa, ha (anno)<sup>-1</sup>

$Frac_{renew}$  frazione dell'area totale della coltura T che è rinnovata

$R_{AG}$  rapporto tra residui della biomassa ipogea e quantità della coltura raccolta kg s.s. (kg s.s.)<sup>-1</sup>

$N_{AG}$  contenuto in azoto dei residui colturali ipogei kg N (kg s.s.)<sup>-1</sup>

$Frac_{remove}$  frazione dei residui colturali epigea rimossa annualmente kg N (kg crop-N)<sup>-1</sup>

$R_{BG}$  rapporto tra i residui colturali ipogei e la quantità raccolta per coltura kg N (kg s.s.)<sup>-1</sup>

$N_{BG}$  contenuto di azoto dei residui colturali ipogei, kg N (kg s.s.)<sup>-1</sup>

T tipo di coltura o foraggio

Si è ipotizzato inoltre che per le colture cerealicole sia rinnovato ogni anno il 100% dell'area, come consigliato nelle linee guida per le specie annuali, mentre per le superfici a colture foraggere temporanee è considerata una durata di 3 anni e per quelle permanenti di 10 anni.

Sono stati usati i valori di *default* IPCC per il calcolo della biomassa epigea e ipogea e per il contenuto di azoto, mentre sono stati usati valori medi nazionali (Bonciarelli, 1999) per la frazione della biomassa epigea rimossa. I fattori di emissione utilizzati per le emissioni dirette di azoto al suolo sono di *default* IPCC e pari a 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N input)<sup>-1</sup> per l'azoto proveniente da fertilizzanti, letame e residui colturali e due fattori di emissione per l'azoto proveniente dalle deiezioni al pascolo a seconda della tipologia animale allevata, 0,02 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N input)<sup>-1</sup> per bovini e suini 0,01 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N input)<sup>-1</sup> per ovini ed equini.

Durante la raccolta delle produzioni agricole una quantità variabile di biomassa per specie coltivata rimane nei campi. Questa frazione apporta un notevole contributo in azoto, che deve essere valutato ai fini delle emissioni di produzione di azoto. Di seguito sono riportati i calcoli che hanno permesso di stimare le emissioni, a partire dai dati ISTAT di superfici coltivate e produzione raccolta (Tabella 2.5.26).



Tabella 2.5.26 Produzioni agricole con residui colturali considerati.

Coltura coltivata	Produzione raccolta	Area coltivata	Produzione totale	Frazione di sostanza secca	Produzione raccolta totale
	t (ha) <sup>-1</sup>	ha	t	%	t s.s
Cereali	3,75	51.346	192.507	0,88	169.407
Radici e tuberi	28,67	3	86	0,22	19
Foraggere temporanee	7,34	31.411	230.400	0,90	207.360
Foraggere permanenti	2,98	6.068	18.100	0,90	16.290

La produzione totale di sostanza secca vede nel 2007 un aumento dell'11,7% rispetto al 2006, passando da una produzione di materia organica pari a 352.014 t ad una di 393.075 t nel 2007.

La quantità di azoto apportato con i residui colturali è stimata in Tabella 2.5.27, mentre le emissioni di protossido d'azoto sono presentate in Tabella 2.5.28. Rispetto al 2006, nell'attuale inventario l'azoto apportato dai residui colturali ha visto un aumento del 30%, mentre le emissioni di N<sub>2</sub>O dirette dal suolo sono caratterizzate da una variazione percentuale pari al 15% rispetto all'anno di riferimento.

Nella Figura 2.5.5, che riporta l'importanza relativa di ogni fonte di azoto, si evidenzia come il contributo maggiore (51%), sia da addebitare all'uso di fertilizzanti sintetici ed in secondo luogo ai residui colturali (29%).

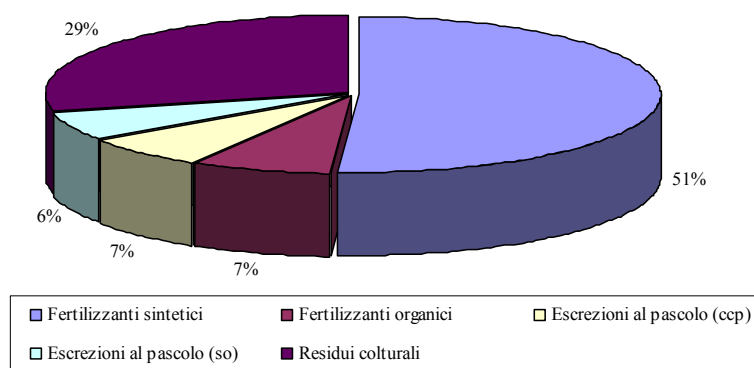


Figura 2.5.5 Emissioni di protossido d'azoto da addizione al suolo di azoto.

Tabella 2.5.27 Azoto applicato al suolo con i residui colturali.

Emissioni da residui colturali	Resa	Area	Frazione area rinnovata	Residui colturali epigei	Rapporto residui epigei/coltur a raccolta	Contenuto N dei residui colturali epigei	Frazione dei residui epigei rimossa	Rapporto tra i residui ipogei e la quantità raccolta	Rapporto tra i residui ipogei e la quantità raccolta	Contenuto N dei residui colturali ipogei	Quantità di azoto nei residui colturali
	kg s.s..	ha	%	t (ha) <sup>-1</sup>	kg s.s. (kg s.s.) <sup>-1</sup>	kg N (kg s.s.) <sup>-1</sup>	%	%	kg s.s.	kg N (kg s.s.) <sup>-1</sup>	kg N anno
	R	A	Frac <sub>Renew</sub>	AG	R <sub>AG</sub> = AG/R	N <sub>ag</sub>	Frac <sub>remove</sub>	R <sub>BG-BIO</sub>	R <sub>BG</sub> = R <sub>BG-BIO</sub> *(AG*1000*R)/R	N <sub>BG</sub>	F <sub>CR</sub>
Cereali	3.299	51.346	1	4,5	1,357	0,006	0,6	0,220	0,518	0,009	1.342.113
Radici e tuberi	6.307	3	1	7,8	1,230	0,019	0,7	0,200	0,446	0,014	251
Foraggiere temporanee	6.602	31.411	0,3	8,1	1,223	0,027	0,8	0,400	0,889	0,022	1.628.039
Foraggiere permanenti	2.685	181.000	0,1	3,8	1,418	0,015	0,8	0,540	1,306	0,012	967.964
<b>Totale</b>	<b>18.892</b>	<b>263.760</b>									<b>3.938.368</b>

Tabella 2.5.28 Emissioni dirette di protossido d'azoto da applicazione di azoto al suolo.

Emissioni dirette dal suolo	Input N	FE per N in input	N <sub>2</sub> O-N input	Emissioni dirette di N <sub>2</sub> O dal suolo
	kg N (anno) <sup>-1</sup>	kg N <sub>2</sub> O-N (kg N input) <sup>-1</sup>	kg N-N <sub>2</sub> O (anno) <sup>-1</sup>	kg
	N <sub>2</sub> O-N <sub>input</sub>	EF <sub>1</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>direct-N</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>Dirette</sub>
Fertilizzanti sintetici	7.005.057	0,01	70.051	110.059
Fertilizzanti organici	1.023.951	0,01	10.240	16.088
Escrezioni al pascolo (ccp)*	462.624	0,02	9.252	14.537
Escrezioni al pascolo (so)*	799.616	0,01	7.996	12.563
Residui colturali	3.938.368	0,01	39.384	61.877
<b>Totale</b>	<b>13.229.617</b>		<b>136.922</b>	<b>215.123</b>

\* ccp: bovini da carne, da latte e suini  
so: ovini ed equini

### Emissioni indirette da applicazione di azoto al suolo

Le emissioni indirette di N<sub>2</sub>O sono dovute alla volatilizzazione e la successiva deposizione di NH<sub>3</sub> e NO<sub>x</sub>, gas originati dall'applicazione dei fertilizzanti. Le deposizioni atmosferiche fertilizzano a loro volta il suolo, aumentando la produzione biogenica di N<sub>2</sub>O. Una considerevole parte dell'azoto contenuto nei fertilizzanti è inoltre perso dai suoli agricoli attraverso i processi di lisciviazione e run-off agricolo. Questa frazione entra nelle acque sotterranee, nei fiumi e nelle aree umide fino a raggiungere il mare. Questo azoto aumenta l'attività biologica nelle acque che trasforma l'azoto attraverso i processi di nitrificazione e denitrificazione. Le emissioni indirette costituiscono una frazione minoritaria ma non trascurabile delle emissioni di N<sub>2</sub>O e sono una diretta conseguenza dell'utilizzo dei fertilizzanti. Sono stati impiegati come dati di attività i dati di distribuzione dei fertilizzanti sintetici semplici e composti (ISTAT, 2007) e come fattori di emissione i valori di *default* IPCC, utilizzando quindi una metodologia di livello Tier 1.

E' stata utilizzata l'equazione 11.9 per la stima delle emissioni indirette da volatilizzazione.

Partendo dall'azoto applicato al suolo dai fertilizzanti sintetici e organici si sono utilizzati come fattori di emissione rispettivamente 0,1 kg e 0,2 kg N<sub>2</sub>O-N (kg N applicato)<sup>-1</sup>. Si è assunto che il 30% dell'azoto sia lisciviato (Bonciarelli, 1999) ed è stato utilizzato il fattore di emissione di 0,0075 kg N<sub>2</sub>O-N (kg di azoto lisciviato)<sup>-1</sup>.

In Tabella 2.5.29 sono presentate le emissioni indirette di protossido d'azoto per volatilizzazione dei fertilizzanti e in Tabella 2.5.30 quelle dovute alla lisciviazione.

Tabella 2.5.29 Emissioni indirette di protossido d'azoto per volatilizzazione dei fertilizzanti.

Azoto in input da fertilizzanti	Input N	Frazione che gasifica	FE per azoto che volatilizza	Azoto che volatilizza	Emissioni indirette di N <sub>2</sub> O da volatilizzazione
	kg N (anno) <sup>-1</sup>	kg (kg N) <sup>-1</sup>	kg N-NH <sub>3</sub> +N-NO <sub>x</sub> v.	kg N <sub>2</sub> O-N	kg N <sub>2</sub> O
	N <sub>2</sub> O-N <sub>input</sub>	FRAC <sub>GASF</sub>	EF <sub>4</sub>		
Fertilizzanti sintetici	7.005.057	0,1	0,01	7.005	11.006
Fertilizzanti organici	1.023.951	0,2	0,01	2.048	3.218
Escrezioni al pascolo	1.262.241	0,2	0,01	2.524	3.966
<b>Totale</b>	<b>9.291.249</b>				<b>18.190</b>

Tabella 2.5.30 Emissioni indirette di protossido d'azoto per lisciviazione dei fertilizzanti.

Tipo di input di azoto	Input N	Frazione che liscivia	FE per azoto che liscivia	Azoto che liscivia	Emissioni indirette di N <sub>2</sub> O da lisciviazione
	kg N (anno) <sup>-1</sup>	Kg (kg N) <sup>-1</sup>	kg N-NH <sub>3</sub> +N-NO <sub>x</sub> v.	kg N <sub>2</sub> O-N	kg N <sub>2</sub> O
	N <sub>2</sub> O-N <sub>input</sub>	FRAC <sub>GASF</sub>	EF <sub>4</sub>		
Fertilizzanti sintetici	7.005.057	0,3	0,0075	15.761	24.763
Fertilizzanti organici	1.023.951	0,3	0,0075	2.304	3.620
Escrezioni al pascolo	1.262.241	0,3	0,0075	2.840	4.462
Residui colturali	3.938.368	0,3	0,0075	8.861	13.922
<b>Totale</b>	<b>13.229.617</b>			<b>29.767</b>	<b>46.767</b>

Le emissioni indirette, per l'anno 2006, per volatilizzazione e per lisciviazione dei fertilizzanti sintetici applicati al suolo erano state rispettivamente 17.382 kg e 41.728 kg di protossido d'azoto, che indicano, per il 2007, un aumento delle emissioni pari al 4,6% ed il 12%.

Le emissioni d'azoto complessive generate dall'applicazione al suolo di azoto sono riportate nella Tabella 2.5.31.

Tabella 2.5.31 Emissioni complessive di protossido d'azoto da addizione di azoto al suolo.

Sorgente di emissione	kg N <sub>2</sub> O (2006)	kg N <sub>2</sub> O (2007)	Variazioni 2006-2007
Emissioni dirette	187.150	215.123	14,9%
Emissioni indirette	59.110	64.957	9,9%
<b>Emissioni totali</b>	<b>246.260</b>	<b>280.081</b>	<b>13,7%</b>

#### *Emissioni di CO<sub>2</sub> da applicazione di urea*

L'urea, oltre ad essere fonte di emissioni di protossido di azoto come gli altri fertilizzanti sintetici, è anche fonte di anidride carbonica che viene rilasciata durante la degradazione della molecola.

L'utilizzo di urea come fertilizzante porta al rilascio della CO<sub>2</sub> che era stata fissata nel processo di produzione industriale del fertilizzante. L'urea (CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>) è convertita in ammonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), ione idrossile (OH<sup>-</sup>) e bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), in presenza di acqua e dell'enzima ureasi. Seguendo le stesse reazioni che si verificano con l'applicazione di calce, dal carbonato che si forma si sviluppa CO<sub>2</sub> e acqua. Questa categoria di emissione è inclusa perché la rimozione della CO<sub>2</sub> dall'atmosfera durante il processo industriale di produzione è a sua volta contabilizzata, presso il sito dove questa avviene. Il fattore di emissione utilizzato, di *default* IPCC, è di 0,2 t di carbonio per tonnellata di urea applicata, ed è equivalente al contenuto in carbonio nell'urea. Si stima quindi il massimo delle emissioni, poiché è possibile che non tutta la CO<sub>2</sub> si sviluppi nell'anno dell'applicazione. Il dato di attività è sempre da fonte ISTAT (2007).

In Tabella 2.5.32 sono riportate le tonnellate di urea applicate al suolo e le emissioni di anidride carbonica messe a confronto tra il 2006 ed il 2007, mostrando un aumento della variazione percentuale del 17%.

Tabella 2.5.32 Confronto delle emissioni di anidride carbonica da uso di urea.

2006	2007	2006	2007	Variazione 2006-2007
t urea (anno) <sup>-1</sup>	t urea (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>	t CO <sub>2</sub> (anno) <sup>-1</sup>	%
6.873	8.039	5.040	5.891	16,9%

In Tabella 2.5.33 ed in Figura 2.5.6 è riportato il confronto delle emissioni legate al settore AFOLU per ogni settore di attività sopra trattato, mettendo in risalto principalmente una forte decrescita delle emissioni di CO<sub>2</sub> dovute alle utilizzazioni forestali.

Tabella 2.5.33 Confronto delle emissioni del Settore AFOLU e variazioni percentuali rispetto al 2006.

Emissioni Settore AFOLU per settore di attività	t di CO <sub>2eq</sub> - 2006	t di CO <sub>2eq</sub> - 2007	Variazione 2006-2007
Uso di urea (CO <sub>2</sub> )	5.040	5.891	16,9%
Utilizzazioni forestali (CO <sub>2</sub> )	27.162	11.175	-58,9%
Incendi (CO <sub>2</sub> )	4.385	4.145	-5,5%
Fermentazione enterica degli animali allevati (CH <sub>4</sub> )	47.167	48.862	3,6%
Gestione del letame (CH <sub>4</sub> )	14.319	12.840	-10,3%
Diretto da suoli agricoli (N <sub>2</sub> O)	55.771	64.107	14,9%
Indiretto da suoli agricoli (N <sub>2</sub> O)	17.615	19.357	9,9%
Gestione del letame (N <sub>2</sub> O)	3.859	3.233	-16,2%
<b>Totale</b>	<b>175.316</b>	<b>169.610</b>	<b>-3,3%</b>

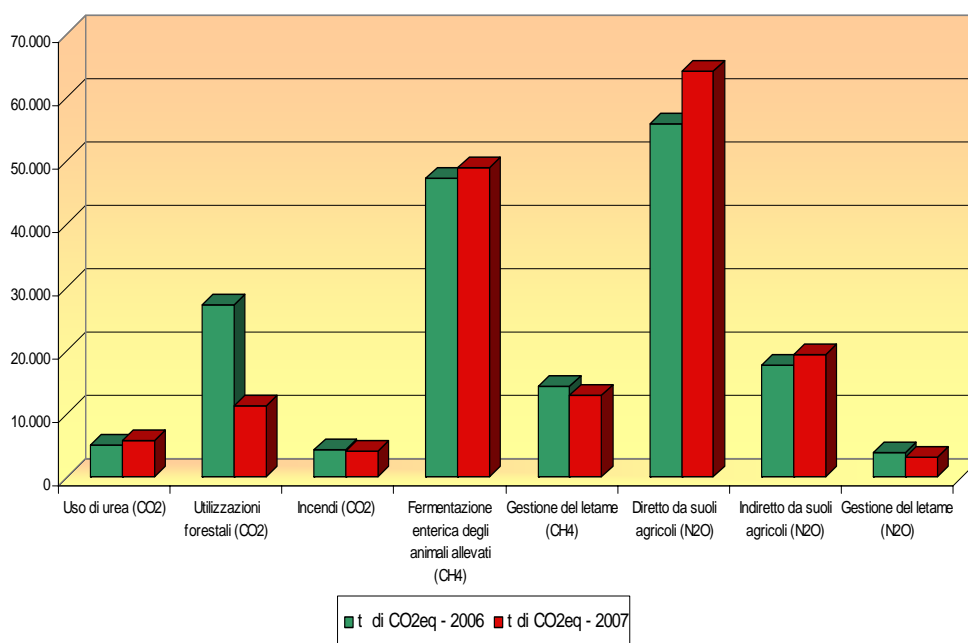


Figura 2.5.6 Confronto tra il 2006 del il 2007 delle emissioni per settore di attività del settore AFOLU.

Il bilancio complessivo delle emissioni e degli assorbimenti di gas serra del settore AFOLU è riportato in Tabella 2.5.34

Tabella 2.5.34 Emissioni di Gas serra dal settore AFOLU per categoria di emissione e gas serra.

Categorie di emissione			
Gas	Sorgente di emissione	t CO <sub>2</sub> eq	Riferimento Tab.
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	5.891	Tabella 2.5.32
CO <sub>2</sub>	Assorbimento forestale e agricolo	-1.214.684	Tabella 2.5.13
CO <sub>2</sub>	Utilizzazioni forestali	11.175	Tabella 2.5.10
CO <sub>2</sub>	Incendi	4.145	Tabella 2.5.9
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	48.862	Tabella 2.5.16
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	12.840	Tabella 2.5.18
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	64.107	Tabella 2.5.28
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	19.357	Tabella 2.5.29 + Tabella 2.5.30
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	3.233	Tabella 2.5.20 + Tabella 2.5.21
<b>Totale settore AFOLU</b>		<b>-1.045.073</b>	

### 3. Key category analysis e analisi dell'incertezza

La metodologia IPCC raccomanda, come buona pratica (IPCC, 2000), l'identificazione delle *key categories* di un inventario. Una *key category* è definita come una fonte di emissione che ha un'influenza significativa sull'inventario del territorio sotto analisi, rispetto alle emissioni totali o rispetto al trend delle emissioni. Il concetto di *key category* è nato escludendo le categorie LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry) ma può essere applicato anche a queste categorie. È importante individuare le *key categories* in un inventario, poiché queste categorie saranno quelle sulle quali accentrare l'attenzione per un miglioramento della metodologia applicata, della qualità del dato di attività e del fattore di emissione. Esistono due approcci per identificare le *key categories*, il Tier 1 e il Tier 2. Utilizzando il Tier 1, le *key categories* sono definite come quelle sorgenti di emissione che rientrano nel 95% delle emissioni cumulative, ordinate per importanza relativa in ordine decrescente. L'approccio del Tier 2 è basato sul Tier 1, ma è più dettagliato e permette di calcolare l'incertezza complessiva di un inventario, calcolando l'incertezza delle stime delle emissioni a livello di categoria. In questo modo le *key categories* sono quelle che rientrano nel 95% dell'incertezza cumulativa delle categorie, che sono state precedentemente ordinate per incertezza relativa decrescente. In questo inventario sono state individuate le *key categories* con Tier 1 e 2 escludendo le categorie LULUCF, seguendo le linee guida IPCC 2000, e successivamente includendo anche queste categorie.

#### TIER1

Per poter individuare le *key categories* è necessario attribuire il livello d'importanza (*level assessment*) delle categorie di emissione o rimozione considerate rispetto al valore dell'intero inventario. Il *level assessment* è calcolato come riportato nelle linee guida IPCC, 2000:

$$LevelAssessment = \frac{|Categoria\ di\ emissione\ o\ rimozione|}{Contributo\ totale}$$

In Tabella 3.1 e Tabella 3.2 sono presentate le *key categories*, rispettivamente escludendo e includendo il settore LULUCF. Quelle al di sopra della doppia linea sono le *key categories* che risultano essere 7 sia includendo il settore LULUCF che escludendolo.

Tabella 3.1. Risultati dell'analisi delle *key categories* secondo il Tier 1 escludendo il settore LULUCF.

Gas	Categorie	Dati di emissione e rimozi	Level assessment	Percentuale cumulativa
		t CO <sub>2eq</sub>		
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	686.461	0,467	0,47
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	399.987	0,272	0,74
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	120.771	0,082	0,82
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	64.107	0,044	0,86
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	48.862	0,033	0,90
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	42.383	0,029	0,93
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	23.572	0,016	0,94
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	19.357	0,013	0,96
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	13.722	0,009	0,96
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	13.143	0,009	0,97
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	12.840	0,009	0,98
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	10.137	0,007	0,99
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	5.891	0,004	0,99
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	3.233	0,002	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	2.444	0,002	1,00
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	1.601	0,001	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	1.025	0,001	1,00
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	596	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	334	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	271	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	195	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	54	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	28	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	22	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	9	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	0	0,000	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	0	0,000	1,00

Tabella 3.2 Risultati dell'analisi delle *key categories* secondo il Tier 1 includendo il settore LULUCF.

Gas	Categorie	Dati di emissioni e rimozi	Level assessment	Percentuale cumulativa
		t CO <sub>2eq</sub>		
CO <sub>2</sub>	Assorbimento forestale e agricolo	1.214.684	0,450	0,45
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	686.461	0,254	0,70
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	399.987	0,148	0,85
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	120.771	0,045	0,90
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	64.107	0,024	0,92
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	48.862	0,018	0,94
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	42.383	0,016	0,95
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	23.572	0,009	0,96
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	19.357	0,007	0,97
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	13.722	0,005	0,98
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	13.143	0,005	0,98
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	12.840	0,005	0,98
CO <sub>2</sub>	Utilizzazioni forestali	11.175	0,004	0,99
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	10.137	0,004	0,99
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	5.891	0,002	0,99
CO <sub>2</sub>	Incendi	4.145	0,002	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	3.233	0,001	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	2.444	0,001	1,00
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	1.601	0,001	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	1.025	0,000	1,00
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	596	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	334	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	271	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	195	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	54	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	28	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	22	0,000	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	9	0,000	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	0	0,000	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	0	0,000	1,00



## TIER 2

Utilizzare il Tier 2 per individuare le *key categories* significa calcolare in primo luogo l'incertezza associata ad ogni categoria di emissione.

Per valutare l'incertezza associata alla stima delle emissioni/rimozioni di ogni categoria considerata si è valutata l'incertezza associata al dato di attività e al fattore di emissione utilizzato per ogni categoria. Nel caso dei fattori di emissione per i quali sono stati adottati valori di *default* si è utilizzato il valore di incertezza suggerito dalle linee guida IPCC, 2006. Per gli altri dati si è deciso di attribuire l'incertezza in funzione dell'affidabilità del dato di attività. Per dati provenienti dagli annali statistici nazionali o regionali (ISTAT, APAT, IFN, IFR) si è stimata un'incertezza di basso livello, come anche considerato dall'APAT nell'Inventario Nazionale dei Gas Serra del 2005. Per dati provenienti da medie europee, si è applicato un livello medio di incertezza, per dati medi mondiali o qualitativi si è considerato un grado di incertezza alto (Tabella 3.3)

Tabella 3.3 Livelli di incertezza considerati per l'analisi dell'incertezza.

Grado di incertezza	%	NOTE:
Basso	3-5	Dati su pubblicazioni di statistiche nazionali, regionali
Medio	5-20	Dati su pubblicazioni con riferimento alla scala sopranazionale
Alto	20-50	Dati di medie mondiali, estrapolati o qualitativi

L'incertezza combinata della stima delle emissioni di una categoria è stata calcolata utilizzando l'eq. IPCC 3.1 (Vol.1). L'incertezza dei vari termini è espressa in forma di percentuale.

$$U_{totale} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}$$

dove:

$U_{totale}$  è la percentuale di incertezza del prodotto delle quantità

$U_i$  è la percentuale di incertezza associata ad ogni termine

Per calcolare invece l'incertezza associata all'intero inventario è stata utilizzata l'eq. IPCC 3.2, da usare quando è necessario combinare l'incertezza di termini che si sommano, come nel caso delle incertezze delle categorie di emissione.

$$U_{totale} = \frac{\sqrt{(U \cdot x_1)^2 + (U \cdot x_2)^2 + \dots + (U \cdot x_n)^2}}{|x_1 + x_2 + \dots + x_n|}$$

dove:

$U_{totale}$  è la percentuale di incertezza nella somma delle quantità

$x_i$  e  $U_i$  sono rispettivamente la quantità di incertezza e la percentuale di incertezza associata ad ogni termine

Dopo aver calcolato l'incertezza combinata è possibile procedere con l'analisi delle *key categories* secondo il Tier 2, ovvero ordinando le categorie per incertezza combinata

decescente, considerate come *key categories* quelle categorie che coprono il 95% dell'incertezza cumulativa. A partire dell'incertezza combinata e dalle emissioni di ogni categoria, si è stimata l'incertezza relativa all'intero inventario.

L'analisi di Tier 2, basata sull'incertezza associata ad ogni categoria, è riportata in Tabella 3.4 e 3.5 (escludendo ed includendo il settore LULUCF rispettivamente). Le categorie chiave secondo il Tier 2 sono riportate in Tabella 3.6 e 3.7. Sono 10 le categorie di emissione che coprono il 95% dell'incertezza associata alla stima delle emissioni escludendo il settore LULUCF.

Tabella 3.4 Incertezza combinata associata alle categorie di emissione senza LULUCF.

Gas	Categorie	Incertezza dato di attività	Incertezza FE	Incertezza combinata
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	3	3	0,042
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	5	30	0,304
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	3	50	0,501
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	3	30	0,301
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	5	5	0,071
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	3	50	0,501
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	20	3	0,202
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	3	30	0,301
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	10	30	0,316
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	3	50	0,501
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	20	20	0,283
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	3	20	0,202
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	3	50	0,501
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	5	3	0,058
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	10	30	0,316
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	3	20	0,202
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	5	20	0,206
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	3	3	0,042
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	10	30	0,316

Tabella 3.5 Incertezza combinata associata alle categorie di emissione con il LULUCF.

Gas	Categorie	Incertezza dato di attività	Incertezza FE	Incertezza combinata
CO <sub>2</sub>	Assorbimento forestale e agricolo	3	30	0,301
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	3	3	0,042
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	5	30	0,304
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	3	50	0,501
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	3	30	0,301
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	5	5	0,071
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	3	50	0,501
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	20	3	0,202
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	3	30	0,301
CO <sub>2</sub>	Utilizzazioni forestali	10	5	0,112
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	10	30	0,316
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	3	50	0,501
CO <sub>2</sub>	Incendi	10	20	0,224
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	20	20	0,283
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	3	20	0,202
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	3	50	0,501
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	5	3	0,058
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	10	30	0,316
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	3	20	0,202
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	3	20	0,202
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	5	20	0,206
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	3	3	0,042
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	3	3	0,042
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	10	30	0,316

Includendo quest'ultimo le categorie chiave si riducono a 6, poiché la sola categoria dell'assorbimento di CO<sub>2</sub> da parte degli ecosistemi forestali copre il 69% dell'incertezza.

La lunghezza delle rotazioni nei cedui e il tasso annuo di incremento della biomassa sono i principali fattori di incertezza, mentre per l'area boschiva l'incertezza è sicuramente minore. L'assorbimento della CO<sub>2</sub> è quindi la categoria dove l'incertezza è in assoluto più alta e quella nella quale è necessario intervenire con maggiori sforzi per la riduzione dell'incertezza totale dell'inventario. L'incertezza complessiva dell'inventario ammonta al 4,2% escludendo il settore LULUCF e al 13,8% includendolo.

Tabella 3.6 Risultati dell'analisi delle *key categories* secondo il Tier 2 escludendo il settore LULUCF.

Gas	Categorie	Level assessment	Incertezza combinata	Level assessment e incert.	Level assessment relativo	Incertezza % cumulate
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	0,082	0,304	0,025	0,23	0,23
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	0,044	0,501	0,022	0,20	0,43
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	0,467	0,042	0,020	0,18	0,61
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	0,272	0,042	0,012	0,11	0,71
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	0,033	0,301	0,010	0,09	0,81
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	0,013	0,501	0,007	0,06	0,87
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	0,009	0,301	0,003	0,02	0,89
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	0,007	0,316	0,002	0,02	0,91
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	0,004	0,501	0,002	0,02	0,93
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	0,009	0,202	0,002	0,02	0,95
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	0,009	0,202	0,002	0,02	0,96
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	0,029	0,042	0,001	0,01	0,97
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	0,016	0,071	0,001	0,01	0,98
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	0,002	0,283	0,001	0,01	0,99
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	0,001	0,501	0,001	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	0,002	0,202	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	0,000	0,316	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	0,001	0,042	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	0,000	0,058	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	0,000	0,206	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	0,000	0,042	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	0,000	0,042	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	0,000	0,316	0,000	0,00	1,00

Tabella 3.7 Risultati dell'analisi delle *key categories* secondo il Tier 2 includendo il settore LULUCF.

Gas	Categorie	Level assessment	Incertezza combinata	Level assessment e incert.	Level assessment relativo	Incertezza % cumulate
CO <sub>2</sub>	Assorbimento forestale e agricolo	0,450	0,301	0,136	0,69	0,69
CH <sub>4</sub>	Smaltimento dei rifiuti in discarica	0,045	0,304	0,014	0,07	0,76
N <sub>2</sub> O	Diretto da suoli agricoli	0,024	0,501	0,012	0,06	0,82
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto su strada	0,254	0,042	0,011	0,06	0,88
CO <sub>2</sub>	Combustione per il riscaldamento	0,148	0,042	0,006	0,03	0,91
CH <sub>4</sub>	Fermentazione enterica degli animali allevati	0,018	0,301	0,005	0,03	0,94
N <sub>2</sub> O	Indiretto da suoli agricoli	0,007	0,501	0,004	0,02	0,96
CH <sub>4</sub>	Gestione del letame	0,005	0,301	0,001	0,01	0,96
CH <sub>4</sub>	Gestione delle acque reflue	0,004	0,316	0,001	0,01	0,97
CO <sub>2</sub>	Uso di urea	0,002	0,501	0,001	0,01	0,97
CO <sub>2</sub>	Industria ceramica e laterizi	0,005	0,202	0,001	0,01	0,98
N <sub>2</sub> O	Combustione per il trasporto su strada	0,005	0,202	0,001	0,01	0,98
CO <sub>2</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	0,016	0,042	0,001	0,00	0,99
CO <sub>2</sub>	Consumo di energia elettrica importata	0,009	0,071	0,001	0,00	0,99
CO <sub>2</sub>	Utilizzazioni forestali	0,004	0,112	0,000	0,00	0,99
CO <sub>2</sub>	Incendi	0,002	0,224	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione del letame	0,001	0,283	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Compostaggio della frazione organica	0,001	0,501	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il trasporto su strada	0,001	0,202	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Gestione delle acque reflue	0,000	0,316	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per il riscaldamento	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per il trasporto aereo	0,000	0,042	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per il riscaldamento	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Industria vetro e cristallo	0,000	0,058	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per uso commerciale e industriale	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per uso commerciale e industriale	0,000	0,202	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Compostaggio della frazione organica	0,000	0,206	0,000	0,00	1,00
N <sub>2</sub> O	Combustione per trasporto aereo	0,000	0,042	0,000	0,00	1,00
CH <sub>4</sub>	Combustione per trasporto aereo	0,000	0,042	0,000	0,00	1,00
CO <sub>2</sub>	Combustione per produzione di energia elettrica da rifiuti	0,000	0,316	0,000	0,00	1,00

#### 4. Emissioni totali e bilancio dei gas serra

Le emissioni lorde complessive di gas serra per la Provincia di Siena al 2007 sono riportate, per settore di emissione, in Tabella 4.1.

Tabella 4.1 Emissioni complessive lorde suddivise per attività di emissione.

Attività	t CO <sub>2eq</sub>	% sul totale
<b>Settore Energia</b>	1.169.571	78,7
<i>Trasporto</i>	703.082	47,3
<i>Riscaldamento</i>	400.452	26,9
<i>Industriale</i>	42.466	2,9
<i>Energia elettrica</i>	23.572	1,6
<b>Settore industria</b>	14.318	1,0
<b>Settore Rifiuti</b>	132.865	8,9
<i>Discarica</i>	120.771	8,1
<i>Acque reflue</i>	10.471	0,7
<i>Compostaggio</i>	1.623	0,1
<b>Settore Agricoltura</b>	169.610	11,4
<i>Perdita di C</i>	15.320	1,0
<i>Uso urea</i>	5.891	0,4
<i>Fermentazione enterica</i>	48.862	3,3
<i>Gestione letame</i>	16.073	1,1
<i>Addizione N al suolo</i>	83.464	5,6
<b>Totale Emissioni</b>	<b>1.486.364</b>	<b>100</b>

Nonostante la diminuzione complessiva dei consumi, il trasporto rimane di gran lunga il settore che incide di più sulle emissioni provinciali, seguito dal riscaldamento. Insieme si confermano come i settori che danno luogo a circa i tre quarti del totale delle emissioni.

In Tabella 4.2 e in Figura 4.1 si può vedere il confronto delle emissioni lorde tra l'anno di riferimento e il 2007. Come è possibile notare le emissioni sono diminuite nel 2007 rispetto all'anno precedente del 6,8% ed il maggiore responsabile di questa decrescita è stato il settore Energia. Infatti la CO<sub>2</sub>, il principale gas ad effetto serra, costituisce quasi la totalità delle emissioni del settore energia, dove metano e protossido d'azoto hanno un ruolo molto minore.

Tabella 4.2 Confronto delle emissioni lorde tra il 2006 ed il 2007 con relative variazioni percentuali.

Settore di emissione	t CO <sub>2eq</sub> - 2006	t CO <sub>2eq</sub> - 2007	Variazione 2006-2007
Settore ENERGIA	1.281.602	1.169.571	-8,7%
Settore INDUSTRIA	11.973	14.318	19,6%
Settore RIFIUTI	125.475	132.865	5,9%
Settore AFOLU	175.316	169.610	-3,3%
<b>Totale</b>	<b>1.594.365</b>	<b>1.486.364</b>	<b>-6,8%</b>

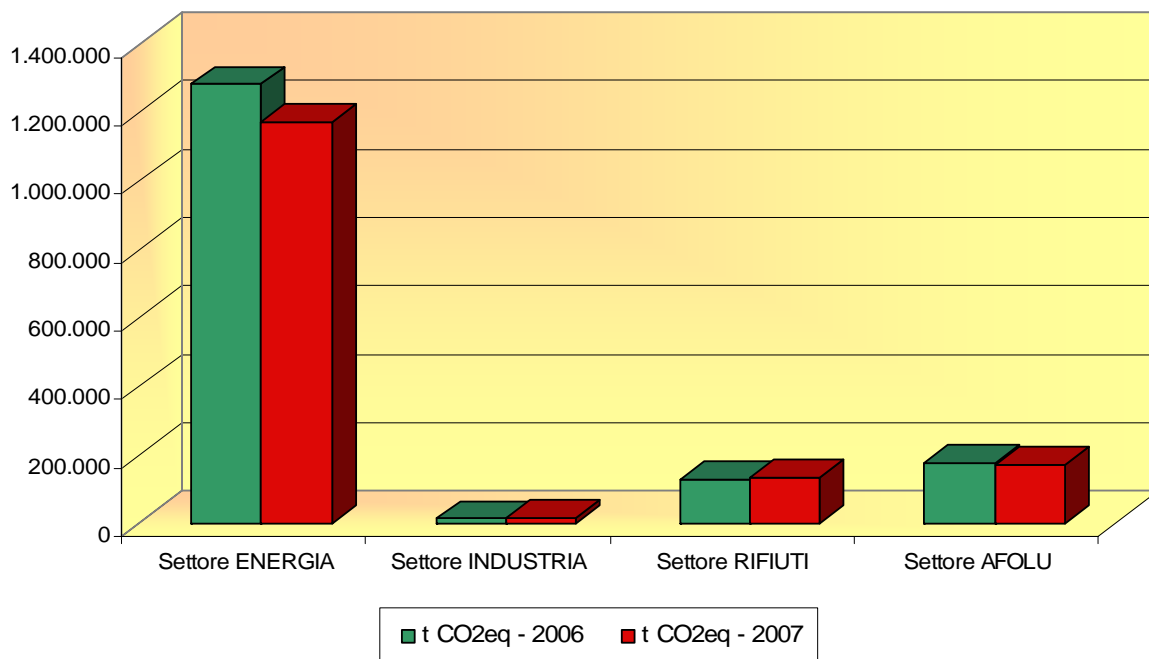


Figura 4.1 Confronto delle emissioni lorde tra l'anno di riferimento ed il 2007 per i quattro settori dell'inventario.

Vista l'incertezza sul dato dell'assorbimento (-1.214.684 tCO<sub>2eq</sub>) dovuta alla procedura di calcolo, abbiamo preferito mantenere un approccio conservativo e diminuire del 30% (l'errore stimato sugli assorbimenti) il dato della differenza fra gli assorbimenti stimati nel report 2006 e quelli del 2007: il dato che proponiamo in questo report per la captazione di carbonio da parte delle aree forestali e delle colture perenni è quindi -1.193.100 tCO<sub>2eq</sub>.

Nella Tabella 4.3 è riportato il bilancio dei gas serra per la Provincia di Siena al 2007 e la percentuale di abbattimento, che si attesta sull'80%, con circa 294.000 tCO<sub>2eq</sub> di emissioni nette.

Tabella 4.3 Bilancio delle emissioni.

Bilancio	tonnellate CO <sub>2eq</sub>
Emissioni lorde	1.486.364
Assorbimento forestale	-1.193.100
Emissioni nette	293.264
<b>% abbattimento sul totale</b>	<b>-80,2%</b>

Il bilancio tra le emissioni lorde complessive e l'assorbimento di anidride carbonica da parte delle foreste e delle colture arboree della Provincia di Siena è riportato in Figura 4.2.

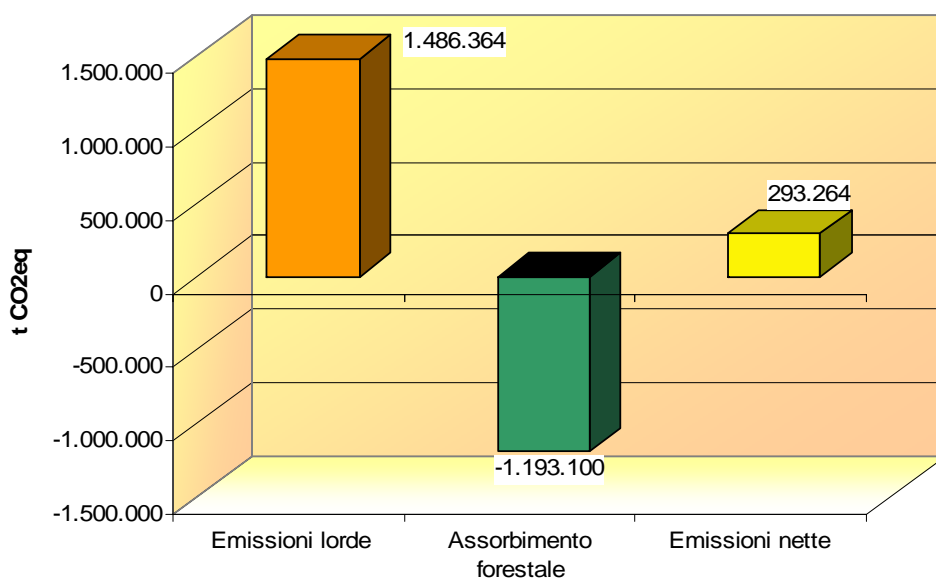


Figura 4.2 Bilancio delle emissioni di gas serra in Provincia di Siena al 2007.

Confrontando gli indicatori ottenuti nei due inventari elaborati per la Provincia di Siena con quelli dell'Inventario Nazionale al 2007 ed al 2005 (Tabella 4.4), si può notare come il valore delle emissioni per abitante della Provincia di Siena sia migliorato per l'anno 2007 rispetto al 2006 e come sia molto inferiore al valore nazionale.

Tabella 4.4 Indicatore delle emissioni per abitante.

Emissione per abitante	t CO <sub>2</sub> eq (abitante) <sup>-1</sup>
Emissioni pro-capite LORDE Siena 2007	5,7
Emissioni pro-capite NETTE Siena 2007	1,1
Emissioni pro-capite LORDE Siena 2006	6,1
Emissioni pro-capite NETTE Siena 2006	1,7
Emissioni pro-capite LORDE Italia 2007	9,3
Emissioni pro-capite NETTE Italia 2007	8,1
Emissioni pro-capite LORDE Italia 2005	9,9
Emissioni pro-capite NETTE Italia 2005	8,0

## 5. Conclusioni

I dati finali del bilancio delle emissioni di gas ad effetto serra per il territorio della Provincia di Siena calcolati per l'anno 2007 presentano un risultato assolutamente eccezionale che vede passare la percentuale di riassorbimento complessivo del sistema dal 74% del 2006 all'80%.

E' un dato eccellente che va comunque preso con tutte le cautele del caso in quanto da una parte conferma la validità del sistema di assorbimento "Siena" dall'altra dimostra quanto il sistema delle emissioni sia sensibile agli scostamenti delle filiere di produzione dei gas climalteranti, a qualunque causa imputabili.

Per l'anno 2007 non possiamo che prendere atto che tali scostamenti sono dovuti al concatenarsi di più effetti, in buona parte esogeni al sistema "Siena" e legati alla congiuntura economica complessiva come:

- il forte aumento del prezzo del petrolio ed il deciso calo dei consumi dei combustibili utilizzati per la mobilità dei mezzi di trasporto rispetto all'anno precedente
- una temperatura media invernale più alta in media di 5° rispetto alla media degli ultimi dieci anni
- la crisi economica che dal secondo semestre ha iniziato a farsi sentire anche sul nostro territorio segnando concretamente la riduzione dei consumi di energia dei vari settori produttivi.

Ma anche endogeni e riferibili all'attuazione di politiche positive quali:

- un incremento del 9% dell'energia elettrica prodotta da fonte rinnovabile
- un sensibile miglioramento dell'attendibilità dei dati geografici e topografici riferiti alle superfici boschive che sono pertanto aumentate di ben 16000 ettari: (il dato utilizzato per il 2006 era stato calcolato nel 2003 e si riferiva al 1999)
- la diminuzione delle aree soggette nell'anno a taglio dei boschi.

Quindi, con tutte le cautele possibili, sempre di dati positivi si parla, per questo anno 2007 a Siena. Ed è positivo anche il riscontro sul sistema di misurazione che diventa sempre più affidabile anche se non dovranno mancare nei prossimi anni ulteriori sforzi ed attività tesi a migliorarne ulteriormente le prestazioni e l'affidabilità al fine di poter costruire un sistema di valutazione e conduzione che permetta di verificare gli effetti di ogni azione in termini di CO<sub>2</sub> evitata.

Forse, l'attività di ricerca tesa a migliorare i risultati degli inventari è uno dei pochi possibili percorsi che potrà effettivamente portare al raggiungimento dell'ambizioso obiettivo fissato come riferimento per l'anno 2015: "Siena prima provincia carbon free".



## Bibliografia di riferimento

- Anagrafe Nazionale Zootechnica, 2007. Statistiche ([www.izs.it](http://www.izs.it)).
- APAT, 2001. Linee guida agli inventari locali delle emissioni in atmosfera. Centro Tematico nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni in Aria.
- APAT, 2002. Manuale dei fattori di emissione nazionali. Centro Tematico Nazionale Atmosfera Clima ed Emissioni in Aria. Aggiornamenti su (<http://www.sinanet.apat.it/it/inventaria/disaggregazione-2000/db>).
- APAT, 2007. Il rapporto rifiuti 2006. Roma.
- APAT, 2008. Il rapporto rifiuti 2007. Roma.
- APAT, 2008. Italian Greenhouse Gas Inventory 1990-2005. National Inventory Report 2007.
- Ármansson, h., 2005. CO<sub>2</sub> emissions from geothermal power plants and natural geothermal activity in Iceland. *Geothermics*, 34, 286-296.
- ARSIA, 2006. Rapporto sullo stato delle foreste in Toscana. Firenze.
- Bonciarelli, F., 1999. Fondamenti di agronomia generale. Ed agricole. Bologna.
- Böttcher, H, Freibauer, A., Obersteiner, M., Schulze, E.D., 2008. Uncertainty analysis of climate change mitigation options in the forestry sector using a generic carbon budget model. *Ecol. Model.*, 213, 45-62.
- Casarini, S., 2007. Convegno Inventario emissioni gas serra in Italia 1990-2005. Conferenza Nazionale Cambiamenti Climatici 2007. Brindisi, 20 luglio 2007.
- CRA, 2002. Selvicoltura sostenibile nei boschi cedui. Progetto Arsia-Regione Toscana. *Annali Istituto Sperimentale Selvicoltura*, 33, 2002-2004.
- D.G.E.R.M., 2007. Bollettino delle vendite petrolifere (<http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/>).
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J., 1994. Carbon pools and fluxes of global forest ecosystems, *Science* 263, 185-190.
- Dondi, M., Marsigli, M., Venturi, I., 2006. Comportamento in cottura delle argille italiane per laterizi. Banca dati ricerca dell'Andil Assolaterizi.
- EEA, 2009. Annual European Community greenhouse gas inventory 1990-2007 and inventory report 2009 Submission to the UNFCCC Secretariat. Copenhagen.
- EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook, 2007. UNECE/EMEP Task Force on Emissions Inventories and Projections. EEA.
- ENEA, 2008. Riduzione delle emissioni e sviluppo delle rinnovabili: quale ruolo per stato e regione? Atti del Workshop 18 Aprile 2008, Roma.
- Fuglestad, J.S., Berntsen, T.K., Godal, O., Skodvin, T., 2000. Climate implications of GWP-based reductions in greenhouse gas emissions. *Geophys. Res. Lett.*, 27(3), 409-412, doi: 10.1029/1999GL010939.
- IFR, 1999. Inventario Forestale Regionale.
- Industrie Laterizi Riunite, 1997. I laterizi. Faenza Editrice spa per Unimorando.
- IPCC, 2000. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories.
- IPCC, 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme, Technical Support Unit. IGES, Hayama, Kanagawa, Japan.

- IPCC, 2006. 2006 IPCC Guideline for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report dell'IPCC.
- ISPRA, vari anni. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (<http://www.isprambiente.it/site/it-IT/>).
- ISTAT, vari anni. Annuario Statistico Italiano. Istituto Nazionale di Statistica ([www.istat.it](http://www.istat.it)).
- Lasserre, B., Tognetti, R., Marchetti, M., 2006. Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea. *Forest@ 3* (4), 542-554.
- Liski, J., Perruchoud, D., Karjalainen, T., 2002. Increasing carbon stocks in the forest soils weatern Europe. *Forest Ecology and Management* 169, 159-175.
- Marmo, L., 2008. Eu strategies and policies on soil and waste management to offset greenhouse gas emissions. *Waste Management*, 28(4), 685-689.
- O'Neil, B.C., 2003. Economics, national science, and the costs of global warming potentials. *Clim. Change*, 58, 251-260.
- Provincia di Siena, 2008. Relazione sullo Stato dell'Ambiente della Provincia di Siena. A cura di MICROCOSMOS Onlus.
- Regione Emilia-Romagna, 2007. Attuazione del Programma d'Azione per le Zone Vulnerabili ai nitrati da fonte agricola. Allegato 4 Tabelle con parametri di calcolo e codifiche di riferimento.
- Regione Toscana, 2000. Rapporto sullo Stato dell'Ambiente. Regione Toscana, Maggio 2000.
- Regione Toscana, 2003. Inventario Regionale delle sorgenti di emissione I aria ambiente (IRSE). Aggiornamento all'anno 2003. *Direzione Generale delle Politiche Territoriali e Ambientali Settore "Qualità dell'aria, rischi industriali, prevenzione e riduzione integrata dell'inquinamento"*.
- Regione Toscana, 2008. Analisi dell'andamento delle precipitazioni, delle temperature, dei livelli piezometrici e delle portate registrate in Toscana nell'anno 2007. Servizio Idrologico Regionale ([www.cfr.toscana.it](http://www.cfr.toscana.it))
- Ridolfi, R., Kneller, M., Donati, A., Pulselli, R.M., 2008. The greenhouse gas inventory of the Province of Siena. *Journal of Environmental Management*, 82(2), 365-371.
- Sienambiente, 2001. I quaderni di Sienambiente, Maggio 2001. Gli impianti.
- Sienambiente, 2007. Carta dei servizi 2007 ([www.sienambiente.it](http://www.sienambiente.it)).
- Sira, 2004. Depuratori (<http://sira.arpat.toscana.it/sira/dep/DEPS.htm>).
- Smith, S.J., Wigley, T.M.L., 2000. Global warming potentials: 2. Accuracy. *Clim. Change*. 44, 459-469.
- Terna, 2007. Dati statistici sulla produzione di energia elettrica in Italia nel 2007. Gestore rete Trasmissione Nazionale ([www.terna.it](http://www.terna.it)).
- Tognetti, R., Marchetti, M., 2006. Influenza dei cambiamenti d'uso del suolo e delle strategie di gestione del bosco sull'allocatione del carbonio nel suolo negli ecosistemi forestali. *L'Italia Forestale e Montana* 1, 5-51.