

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PARMA

FACOLTA' DI SCIENZE AMBIENTALI

Dottorato di Ricerca in Ecologia

XX Ciclo

TESI DI DOTTORATO

**Analisi Multi-metodo e Multi-scala (Energia, Emergenza,
MFA, Impronta Ecologica) di Ecosistemi Urbani**

RELATORE

Chiar. Prof. Paolo Menozzi

CONTRORELATORI

Chiar. Prof. Giulio Alessandro De Leo-CORDINATORE

Chiar. Dott. Antonio Bodini

Chiar. Dott. Andrea Pasteris

RELATORI ESTERNI-TUTOR

Chiar. Prof. Luigi Campanella

Chiar. Dott. Sergio Ulgiati

CANDIDATO

Dott. Marco Ascione

A Mia Madre e a Mio Padre

INDICE

<i>INTRODUZIONE</i>	pag. 6
---------------------	--------

Capitolo 1 LA CITTA'

1.1 Nascita delle città	pag. 8
1.2 La città greca e romana	pag. 8
1.3 La città dal Medioevo a oggi	pag. 9
1.4 La città contemporanea	pag. 10
1.5 Il futuro della città	pag. 11
1.6 Ambiente urbano e qualità della vita	pag. 11
1.7 La città come sistema auto-organizzante	pag. 12
1.8 Controurbanizzazione e “ciclo di vita” della città	pag. 14

Capitolo 2 METODICA UTILIZZATA: ANALISI MULTI-METODO E MULTI-SCALA

2.1 Introduzione	pag. 16
2.2 Il valore aggiunto di un'Analisi Multi-Metodo e Multi-Scala	pag. 17
2.3 Metodiche utilizzate	pag. 18
2.3.1 Descrizione dei flussi di massa e bilancio di massa locale	pag. 18
2.3.2 Material Flow Accounting e categorie di intensità materiale	pag. 18
2.3.2.1 <i>Punti di forza e di debolezza della metodica MFA</i>	pag. 19
2.3.3 Descrizione dei flussi di energia	pag. 19
2.3.4 Embodied Energy Analysis	pag. 19
2.3.4.1 <i>Punti di forza e di debolezza dell'embodied energy analysis</i>	pag. 20
2.3.5 L'Ecological Footprint (Impronta Ecologica)	pag. 20
2.3.5.1 <i>Punti di forza e di debolezza dell'ecological footprint</i>	pag. 21
2.3.6 L'Analisi Emergetica	pag. 21
2.3.6.1 <i>Punti di forza e di debolezza dell'analisi emergetica</i>	pag. 23
2.4 Emissioni atmosferiche e impatto relativo	pag. 23

2.5 Stato dell'arte nella valutazione delle città	pag. 24
---	---------

<i>APPENDICE al Capitolo 2</i>	pag. 27
--------------------------------	---------

2.1 Aspetti computazionali in Material Flow Accounting	pag. 27
--	---------

2.1.1 Algebra della Material Flow Accounting	pag. 28
--	---------

2.2 Embodied Energy Analysis	pag. 28
------------------------------	---------

2.3 Ecological Footprint	pag. 29
--------------------------	---------

2.4 Energia	pag. 29
-------------	---------

2.4.1 Algebra energetica	pag. 30
--------------------------	---------

2.5 Schema del funzionamento del codice di calcolo	pag. 30
--	---------

Capitolo 3 IL COMUNE DI ROMA

3.1 Aspetti generali	pag. 34
----------------------	---------

3.2 Organizzazione territoriale	pag. 38
---------------------------------	---------

3.3 Vie di comunicazione	pag. 40
--------------------------	---------

3.4 Periferie	pag. 41
---------------	---------

3.5 Il dimensionamento	pag. 43
------------------------	---------

Capitolo 4 FLUSSI DI MASSA E DI ENERGIA

4.1 Inventario dei Flussi di Massa e di Energia su scala locale e globale	pag. 45
---	---------

4.1.1 Risultati della Ecological Footprint e della Analisi Energetica	pag. 52
---	---------

4.2 Domanda insostenibile di risorse	pag. 56
--------------------------------------	---------

4.3 Vantaggi di una valutazione multi-metodo	pag. 57
--	---------

4.4 Fattori di scala	pag. 61
----------------------	---------

<i>APPENDICE al Capitolo 4</i>	pag. 62
--------------------------------	---------

Capitolo 5 EVOLUZIONE TEMPORALE DEGLI INDICATORI

5.1 Introduzione	pag. 65
------------------	---------

5.2 Indicatori di massa	pag. 66
-------------------------	---------

5.3 Indicatori energetici	pag. 71
---------------------------	---------

5.4 Indicatori di ecological footptint	pag. 73
--	---------

5.5 Indicatori energetici	pag. 76
---------------------------	---------

5.6 Indicatori di emissione	pag. 81
-----------------------------	---------

<i>APPENDICE al Capitolo 5</i>	pag. 87
--------------------------------	---------

Capitolo 6 COMPLESSITA' E SISTEMI ANTROPICI

6.1 Introduzione	pag. 112
6.2 Complessità negli organismi	pag. 113
6.3 Influenza reciproca tra disponibilità delle risorse e complessità	pag. 116
6.4 Componenti e relazioni	pag. 116
6.5 Relazioni di tipo lavorativo e valore aggiunto	pag. 118
6.6 Indice di complessità σ	pag. 120
6.7 Calcolo alternativo di H'	pag. 127

Capitolo 7 COMPLESSITÀ DEL SISTEMA ANTROPICO OGGETTO DI STUDIO

7.1 Introduzione	pag. 128
7.2 Flussi di risorse in input	pag. 131
7.2.1 Andamento dei materiali, dei combustibili, dell'energia elettrica e dell'acqua	pag. 131
7.2.2 Andamento del cemento, dell'acciaio e dell'asfalto	pag. 137
7.2.3 Andamento degli input di tipo alimentare	pag. 139
7.3 Discussione e verifica della prima ipotesi	pag. 142
7.3.1 Verifica dell'ipotesi escludendo alcune categorie	pag. 142
7.3.2 Verifica dell'ipotesi considerando tutte le categorie	pag. 143
7.3.3 Conclusioni	pag. 143
7.4 Verifica della seconda ipotesi	pag. 144

<i>CONCLUSIONI</i>	pag. 149
--------------------	----------

BIBLIOGRAFIA	pag. 152
--------------	----------

APPENDICE A	pag. 166
-------------	----------

INTRODUZIONE

Il tipo di analisi realizzata mediante il presente lavoro di ricerca, focalizzata sul sistema urbano di Roma, ha come obiettivi:

- Lo studio delle interazioni tra sistema urbano ed ambiente esterno, inteso come scambio di flussi di materia ed energia, sia in termini quantitativi che qualitativi;
- Lo studio della variazione di complessità del sistema urbano in relazione al cambiamento delle sue dimensioni ed in dipendenza del mutamento nell'apporto delle risorse provenienti dall'esterno;
- Il perfezionamento di una procedura di valutazione multi-metodo e multi-scala (SUMMA, SUsustainability Multiscale Multimethod Assessment, Ulgiati et al., 2006), originariamente sviluppata per applicazioni a processi e settori produttivi, in modo da renderla idonea a valutare sistemi territoriali ecologico-economici, per loro natura più complessi e bisognosi di strumenti di indagine capaci di cogliere tale complessità.

L'approvvigionamento delle risorse necessarie a supportare il metabolismo di una città nonché i prodotti di scarto delle sue attività pesano sugli equilibri esistenti all'interno e all'esterno del sistema in maniera variabile. Ferma restando la sensibilità degli ambienti coinvolti, la pressione esercitata su di essi è tanto più alta quanto maggiore è la quantità di materia e di energia prelevata e/o immessa. L'entità delle alterazioni è altresì dipendente dalla tipologia delle risorse prelevate, dal tipo di inquinanti prodotti e nondimeno dalla qualità dei processi coinvolti (tipo di processo, efficienza del processo, ecc). Gli impatti che l'esistenza di un sistema urbano è in grado di determinare sull'ambiente esterno (dalla scala locale a quella globale), sono numerosi e di vario tipo. La complessità dei fenomeni coinvolti e delle conseguenze sul sistema e sull'ambiente è tale che un solo indicatore può a malapena descrivere alcuni aspetti o uno solo tra essi su una singola scala spazio-temporale (ad esempio, il consumo energetico oppure le emissioni di prodotti chimici acidificanti). Per una valutazione più complessiva della qualità, della stabilità e della sostenibilità di un sistema complesso è indispensabile fare ricorso ad una molteplicità integrata di indicatori di stato e di prestazione, i quali possano consentire la valutazione delle dinamiche coinvolte, pur senza pretendere di cogliere l'intera complessità del sistema indagato. E' anche indispensabile che tali indicatori siano compatibili tra loro, ossia si basino su concetti scientifici reciprocamente non contraddittori e sullo stesso insieme di dati empirici del sistema. In tal modo sarà possibile evitare che i risultati non siano compatibili tra loro, come spesso accade quando si confrontano analisi condotte sullo stesso sistema, ma sulla base di un unico indicatore ricavato da database o assunzioni differenti.

Il presente studio si propone pertanto di analizzare le interazioni esistenti tra sistema antropico ed ambiente esterno, mediante il ricorso a differenti strumenti di analisi tra di essi complementari (Material Flow Accounting, Embodied Energy Analysis, ed Emergy Analysis), scelti tra quelli che compongono il sistema SUMMA. Sono stati esclusi alcuni metodi (analisi energetica, analisi economica) perché ritenuti poco interessanti per le finalità

del presente studio, mentre invece è stata inclusa l'Ecological Footprint, ritenuta capace di fornire interessanti informazioni specialmente relative all'ambito territoriale. L'utilizzo congiunto dei metodi indicati - ciascuno noto in letteratura per una propria specifica prospettiva nello studio del rapporto tra azioni antropiche e impatti ambientali - risulta essere particolarmente utile poiché capace di fornire una visione più completa e poliedrica delle conseguenze che l'attività di una città così eterogenea come Roma può avere nel generare alterazioni all'interno e all'esterno del proprio territorio.

Uno studio effettuato con un simile approccio può assumere un carattere ancor più interessante se ripetuto più volte nell'ambito di un intervallo temporale relativamente lungo. Dunque il presente studio oltre ad essere stato sviluppato per un determinato anno di riferimento abbastanza recente (2002) è stato ripetuto con cadenza decennale per altre quattro annualità precedenti, in modo da coprire l'arco di tempo che va dal 1962 al 2002. Ciò ha permesso lo studio dell'evoluzione degli indicatori, facendo così luce sulle modalità di variazione degli stessi rispetto alle dinamiche di sviluppo che hanno caratterizzato il sistema urbano di Roma nell'arco di tempo di quaranta anni.

A partire dalla teoria della complessità (Odum. E., 1983), con particolare riferimento alla tesi secondo cui un sistema che non aumenta più nelle dimensioni, ma continua in maniera crescente ad importare risorse dall'esterno, finisce – in particolari condizioni - per aumentare la propria complessità, ci prefiggiamo di valutare, per lo stesso intervallo di tempo sopra considerato, l'eventuale variazione di complessità del sistema urbano di Roma. L'indagine è stata condotta attraverso lo studio delle funzioni rappresentative degli apporti di risorse al sistema, ed alla luce della valutazione della variazione delle dimensioni del sistema nel tempo.

Intendiamo verificare due ipotesi:

- a) se la velocità con cui il sistema reperisce risorse dall'esterno aumenti progressivamente nel tempo, ovvero se la derivata prima delle funzioni rappresentative del reperimento delle risorse nel tempo (ammesso che siano crescenti), mostri un andamento di tipo crescente;
- b) avendo costruito un indice di complessità valido per i sistemi antropici, ci prefiggiamo di studiarne l'andamento temporale nel caso in studio, al fine di verificare se la funzione rappresentativa della variazione di complessità del sistema nel tempo sia di grado superiore a quello delle funzioni che descrivono l'approvvigionamento delle risorse nel tempo (ammesso che entrambe le categorie di funzioni siano di tipo polinomiale).

Capitolo 1

LA CITTÀ

1.1 Nascita delle città

I cinquemila anni di storia documentata della città, per non parlare dei più antichi fenomeni di stanziamento temporaneo di cui testimoniano le grotte del Paleolitico e i villaggi agricoli del neolitico, iniziano con lo sviluppo tecnologico della coltivazione dei campi, attraverso il quale la società nomade tendeva a diventare sempre più stabile. I più antichi ruderi urbani a noi noti risalgono intorno al 3000 a.C., epoca in cui secondo gli antropologi e gli storici, si verificò una rivoluzione tecnologica, in termini di slancio in avanti, forse paragonabile a quella del secolo XX: la scrittura¹, la matematica e l'astronomia congiunte alla lavorazione del rame all'uso del tornio, dell'imbarcazione a vela e del telaio². Le prime città sorsero in Mesopotamia, in corrispondenza del bioma a prateria temperata, che non essendo caratterizzato da ambienti boschivi, forniva ampi spazi per la coltivazione. La notevole disponibilità di acqua che caratterizzava le grandi valli fluviali del Tigri e dell'Eufrate rese possibile l'utilizzo sistematico della pratica agricola ed allo stesso tempo la facilità di comunicazioni commerciali per via d'acqua. Sebbene la zona dell'attuale Egitto possedesse invece un clima molto poco piovoso, l'enorme quantità d'acqua assicurata dai cicli alluvionali del Nilo, rese possibile anche in questi luoghi, le stesse favorevoli condizioni per la nascita di alcune fra le più antiche città. Alcune tra le prime città conosciute come ad esempio: Ur, Uruk, Khorsabad, Assur, Ninive e Babilonia, peraltro di assai difficile ricostruzione archeologica, presentavano una superficie che sembra variasse dai 90 ettari di Ur ai 900 di Ninive, e la loro popolazione tra i 300 ed i 500 abitanti per ettaro. In ogni caso la città dei primordi raramente si sviluppò oltre i limiti di spazio raggiungibili a piedi.

1.2 La città greca e romana

Le città della civiltà egea, Karphi, Crosso, Lato, Thera, Sykknos, sono ancora poco note: si sa che ospitarono case assai evolute ed impianti tecnologici paragonabili a quelli delle città

¹ Gli sviluppi archeologici, tuttavia, sembrerebbero retrodatare la nascita della scrittura, classicamente collocata tra il 3200 ed il 3100 a.C. Infatti precedenti alla scrittura mesopotamica di origine sumera, ci sarebbero, oltre ad evidenti testi egizi datati tra il 3400 ed il 3200 a.C., alcune iscrizioni su ceramiche appartenenti alla civiltà di *Harappa*, rinvenute nella valle dell'Indo e datate intorno al 3500 a.C. Ma la cosa più interessante sono gli esempi di scrittura su terrecotte della antica civiltà europea dei *Vinča*, sviluppatasi intorno al Danubio, precedentemente all'ingresso delle popolazioni indoeuropee. Tali scritture si datano dal 5400 al 4000 a.C. Ad ogni modo, è molto probabile che la scrittura si sia sviluppata indipendentemente in civiltà differenti e per motivazioni differenti. Ad esempio: nella cultura *Vinča* e nell'antico Egitto la scrittura era legata a forme di culto, mentre in Mesopotamia si sviluppò da esigenze di commercio e contabilità.

² Anche se secondo *Mumford* la prima vera e propria sintesi della città si ebbe con la monarchia, in seguito ad un accordo di fondo raggiunto tra il potere politico, quello economico e quello religioso.

moderne, ma la documentazione frammentaria non consente di ricostruire un'immagine urbana adeguata a quella architettonica. Nella Grecia classica la città assunse caratteri originali, basati sulla sintesi di organizzazione comunitaria, di rituale religioso e di vita politica democratica. L'*agorà*, il santuario, il ginnasio, il teatro sono i nuclei che ne contraddistinguono l'ordinamento spaziale. Le funzioni sociali dello spazio all'aperto si affermano nell'area mediterranea intorno al secolo VI a.C. e si può dire che non ne scompaiono più. La città greca aveva estensione variabile tra i 15 e i 40 ettari ed una popolazione che assai raramente raggiungeva i 30 mila abitanti dell'Atene di Pericle. L'impianto geometricamente rigoroso che la tradizione attribuisce ad Ippodamo di Mileto è assente in quasi tutte le città del periodo classico: Atene si sviluppa in modo assolutamente irregolare intorno all'Acropoli. La geometria del tracciato s'impone nella città ellenistica: l' "eleganza irreggimentata" di Alessandria rappresenta, nel secolo III a.C. il prototipo dilatato dello schema di Ippodamo, con eccezionali larghezze stradali, altezze edilizie inconsuete e spazi pubblici sempre più ampi. Quasi vetrina del potere dinastico, la città ellenistica proietta i suoi canoni nell'urbanistica romana, in cui i simboli visibili dell'impero - gli acquedotti, i viadotti, gli archi trionfali, i portici, i fori, i templi, gli anfiteatri e le vie consolari che spianano valli e colline - si compongono in un quadro ambientale aperto e coerente con il clima politico omogeneizzante della *Pax romana*. Le cinte murarie rettangolari della tradizione etrusca che rivive nel *castrum* crollano e l'urbe avanza liberamente nelle campagne colonizzare da *villae rusticae* e *domus culate*, lottizzate e distribuite ai veterani come un'immensa città, un territorio per la prima volta nella storia, completamente urbanizzato e disegnato dall'uomo. Il controllo politico e militare esercitato da Roma su tutto il territorio allora conosciuto diffuse impianti di città standardizzati, impostati su due assi ortogonali: *cardine* e *decumano*, esportati in Renania, in Gallia, in Britannia, in Spagna ed anche in Africa e nel Vicino Oriente.

1.3 La città dal Medioevo a oggi

Il progressivo sfaldamento della compagine politica, militare ed amministrativa dell'impero romano dette un duro colpo al sistema delle città romane, ciascuna delle quali iniziò nell'Alto Medioevo, una propria vita "locale". Il sistema politico-territoriale un tempo unitario si frantumò: emergono quali nuovi centri di potere, talvolta in competizione tra loro, le città di Aquisgrana, Ravenna, Pavia e numerosissime città minori, centri di autorità locale che riutilizzano, trasformano, ampliano o riducono, a seconda delle esigenze contingenti, l'impianto urbano romano greco, dando luogo a quella che si potrebbe definire l'urbanistica "frammentaria" della città Alto Medievale. La contrazione dell'area urbanizzata e il riuso per necessità elementari quali la difesa o la residenza dei grandi edifici pubblici (teatri, anfiteatri, spesso usati anche come cava di pietre squadrate) contrassegnano i principali interventi. Parallelamente al riuso della città romana si sviluppa con sempre maggior frequenza nei secoli X-XIV, la città di fondazione, su di un crinale o in cima a un colle o in riva al mare secondo tipologie estremamente variabili, che seguono assai da vicino l'andamento del terreno. Caratterizzano la città medievale la piazza del mercato, la cattedrale, il castello, e spesso il palazzo comunale. Nell'ambito della struttura feudale sorge una nuova vita comunitaria che trova nella ridotta dimensione della città le proprie realizzazioni più suggestive e ancor oggi ricche di insegnamento civile: Assisi, Gubbio, Firenze, Ferrara, Chioggia, Orvieto, San Gimignano, Montagnana, Siena, Perugia, Urbino, Venezia, Verona in Italia; Avignone, Carcassonne, Chartres, Poitiers, Reims, Troyes in Francia; Aquisgrana, Augusta, Heidelberg, Lubecca, Norimberga, Rothenburg, Wurzburg in Germania. Lungo itinerari terrestri e fluviali, preferiti dal commercio internazionale ed Intercontinentale (la via delle spezie, la via del sale) si forma nel tardo Medioevo un complesso sistema urbano alimentato dalle nuove spinte

produttive dell'agricoltura e dell'artigianato. Sulle coste del Mediterraneo si è frattanto diffusa, per effetto della conquista araba, la città islamica che si caratterizza con alcune varianti rispetto alla città medievale occidentale: sviluppo limitato della componente corporativa, assenza delle libertà comunali, forte concentrazione del potere civile e religioso, alta densità abitativa, sviluppo apparentemente confuso della rete stradale, murazione ricca di torri e fortezze. Esempari di questo tipo urbano sono riconoscibili in alcune città spagnole (Granata, Toledo), nel casbe di Algeri, Tunisi, Sousse e nei quartieri antichi di Istanbul, con poche varianti rispetto all'assetto originario. Nella cultura occidentale, il Medioevo ha prodotto una diffusione ed un'innovazione urbane così profonde ed estese che la città rinascimentale e la città barocca, ancorché morfologicamente differenziate per l'architettura, possono considerarsi come sviluppi maturi di una città medievale che quasi sempre preesisteva. La modifica sostanziale interviene soltanto con la formazione dei grandi stati nazionali, che provocano l'accentramento delle funzioni di governo in poche città capitali. Così la città del Rinascimento e del Barocco sviluppa programmi figurativi di grande impegno, cui non sono mai estranei anche problemi demografici, commerciali, produttivi in genere. La stessa trasformazione del potere da locale in statale attiva una classe di finanzieri, di banchieri, di mercanti, che danno luogo a città fondate sull'intenso commercio marittimo e sugli scambi con il nuovo mondo: Anversa, Amsterdam, Amburgo e Londra. Lo sviluppo degli imperi coloniali olandese, inglese, francese, spagnolo e portoghese ha ripercussioni notevoli nella storia della città: non soltanto è responsabile dell'accrescimento e dell'arricchimento delle grandi capitali europee, ma è altresì incentivo alla formazione, fra i secoli XVI e XVIII di città nuove, derivate dalla città europea di cui spesso riprendono il nome (Nuova Amsterdam, New York, New Orleans, ecc). Qui ritorna la pianta a scacchiera, dettata dall'urgenza di lottizzare con regolarità il terreno da distribuire ai coloni. Ma anche in Europa i piani barocchi di ampliamento ed abbellimento delle città regie o comunque sede di corti fastose (Mannheim, Versailles, Karlsruhe, Caserta) vengono delineati con estrema regolarità secondo lo schema radiocentrico che offre la convergenza delle prospettive sul palazzo reale. Tra questi abbellimenti, il più tardo ma forse il più significativo è quello realizzato a Londra con la costruzione di Regent Street (1840). Scartata nei fatti, l'ipotesi radicale dell'utopia urbana del primo ottocento (Owen, Fourier, Cabet, Richardson) sotto l'impatto del capitalismo industriale l'impianto della città occidentale subiva una trasformazione profonda dei suoi connotati non soltanto fisici. Operazioni poco rispettose del tessuto sociale e del patrimonio ambientale furono attuate a Parigi con il piano realizzato da Hausmann ed ispirato da Napoleone III a Colonia e a Vienna con la sistemazione del *Ring*, a Lione e a Marsiglia, a Firenze e a Napoli, ecc. La città ne uscì rinnovata nell'impianto morfologico risultante dagli "sventramenti imposti sia sull'ambiente storicamente stratificato, sia al corpo sociale; nel campo dei lavori pubblici, la città ottocentesca venne dotata di infrastrutture e di attrezzature di grande impegno tecnico e finanziario, che tuttora costituiscono il sistema portante della sua funzionalità, almeno nelle aree centrali delle metropoli europee. La città si vede oggi travagliata dai postumi irrisolti della rivoluzione "industriale" e "terziaria" che si diffonde con rapidità nei primi cinquant'anni del novecento in tutto il mondo civilizzato.

1.4 La città contemporanea

La città contemporanea è caratterizzata da un fenomeno di diffusione urbana (urbanesimo) che ha in gran parte annullato le differenze morfologiche e sociali tra la città ed il territorio che la circonda e sul quale si estende la sua influenza culturale. Nondimeno, la città è tuttora caratterizzata dalla centralità rispetto al territorio servito, dalla presenza delle sedi del potere decisionale, dall'accessibilità a consumi di livello superiore, dalla possibilità di erogare

servizi rari e di offrire alla fruizione valori storici, monumentali, artistici ed ambientali che la parte più antica di essa ancora conserva. Lo sviluppo dei mezzi di comunicazione di massa e delle moderne tecnologie, ancorché ridurlo, aumentano il potere attrattivo della città. In tal senso, Essa è incline a divenire piuttosto un centro di servizio anziché un luogo di residenza secondo una linea di tendenza inaugurata dal mondo anglosassone a decentrare verso l'esterno della città il luogo dell'abitazione, riservando il centro la cosiddetta *City* al commercio e agli affari. Così si giunge a snaturare il senso originario della città come sede di una comunità, creando uno dei maggiori problemi di alienazione della città contemporanea, sempre meglio servita da servizi tecnici ma sempre più priva di "cuore" e di calore umano. Questo problema è complicato da altre difficoltà quali l'aumento delle barriere alla comunicazione faccia a faccia tra i cittadini; la congestione del traffico veicolare; il peggioramento della qualità della vita, dovuto all'inquinamento atmosferico, acustico ed al ritmo stressante; il dilagare dei fenomeni di delinquenza. Tali inconvenienti si riscontrano in misura più o meno grave in tutte le grandi città, nei paesi tecnologicamente avanzati ed in quelli in via di sviluppo. La città comunemente intesa è un agglomerato di una certa consistenza demografica, con una densità di popolazione raramente inferiore ai 100 abitanti per ettaro di superficie urbanizzata, la cui popolazione attiva è dedicata prevalentemente ad attività secondarie e soprattutto terziarie, dotato di infrastrutture tecnologiche e servizi molto diversificati. Dal punto di vista amministrativo, la città è in genere sede di un Comune che di norma comprende anche porzioni di territorio non urbanizzato ed insediamenti minori (frazioni) ed è amministrato da un consiglio, da una giunta e da un sindaco. Un'altra caratteristica della città è quella di essere scomponibile in unità minori, i quartieri, i quali risultano spesso dalla stratificazione storica della città oppure dalla sua suddivisione in zone, avvenuta spontaneamente o dettata dal piano regolatore.

1.5 Il futuro della città

Se fino agli anni '60 le *funzioni urbane* si organizzavano soprattutto attorno all'impresa industriale e ai suoi stabilimenti, negli ultimi decenni questa, nei paesi economicamente più sviluppati, ha subito un forte regresso, a vantaggio di certe funzioni terziarie e quaternarie, definite come attività che orientano, dirigono e controllano gli sviluppi della società e dell'economia. La presenza di funzioni terziarie avanzate (servizi per le imprese) e quaternarie è ciò che distingue oggi la metropoli dalla semplice città, e in particolare caratterizza le *città globali* (o mondiali) dove si concentrano le attività terziarie e quaternarie di massimo livello (New York, Londra, Tokyo, Parigi, ecc). Nelle metropoli si osserva una crescente *polarizzazione sociale* attorno a due tipi di popolazione: quella cosmopolita e molto ricca, che deriva i suoi redditi da attività terziarie avanzate e quaternarie e quelle a basso reddito, formate in buona parte da immigrati da paesi meno sviluppati, dedicata a lavori precari o mal retribuiti nel settore dei servizi banali o anche nell'industria "sommersa".

1.6 Ambiente urbano e qualità della vita

Recentemente è stata proposta una concezione della città come *ecosistema urbano*, cioè come un sistema i cui elementi, naturali e artificiali sono organizzati attraverso relazioni che consistono in flussi di materia energia e informazione. Tuttavia la città è un sistema aperto, in costante squilibrio energetico con un ambiente esterno che oggi corrisponde all'intero pianeta, e ciò spiega anche perché non esistono limiti alla crescita dimensionale delle città. Non solo, ma è proprio il continuo superamento dei vecchi limiti che rende la città un sistema sempre più energivoro. Inoltre, il consumo di energia e di materiali comporta la produzione di rifiuti che, accumulandosi, minaccia il blocco dell'ecosistema urbano. La concezione ecosistemica delle città è dunque particolarmente utile per definire e calcolare la *sostenibilità* dello

sviluppo urbano. A esso si collega il problema della *qualità dell'ambiente* e della qualità della vita nelle città. Gli indicatori più usati sono: le *condizioni abitative* (qualità della casa esposizione, luminosità, vista, affollamento residenziale, accesso ai servizi); le *condizioni fisiche* (viabilità pedonale, illuminazione pubblica, cogestione del traffico, rumori, inquinamento atmosferico); le *condizioni di vicinato* (segregazione etnica, criminalità devianza, solidarietà e controllo sociale); il *paesaggio* (qualità architettonica, urbanistica e paesistica, arredo urbano, ecc).

1.7 La città come sistema auto-organizzante

Anticamente una città nasceva a partire da un nucleo, formatosi in un luogo, per esigenze di natura pratica. Infatti una determinata ubicazione piuttosto che un'altra era dovuta alla presenza di favorevoli condizioni per lo più strategiche e climatiche (per una dato gruppo di individui), ma ancor più rifletteva la necessità di una buona fruibilità delle risorse disponibili. La disponibilità d'acqua nonché di spazio, essenziali per la pratica dell'agricoltura che ha dato origine alle città, hanno influenzato più di ogni altra risorsa l'ubicazione dei primi insediamenti urbani. Ma anche successivamente una posizione capace di garantire una migliore accessibilità alle risorse, ha sempre contraddistinto il sorgere delle città. Si pensi a città come ad esempio Parigi e Londra sorte intorno ai crocevia di importanti strade per il transito militare e commerciale in epoca romana. La stessa New York, fondata dagli olandesi (inizialmente chiamata New Amsterdam), era sede di scambi commerciali internazionali tra vecchio e nuovo mondo che col tempo si intensificarono sempre di più. L'organizzazione spontanea delle città intorno a fenomeni legati all'agricoltura, al commercio, all'industria, ed oggi sempre di più ai servizi, è stata, nella storia, la causa della nascita e delle continue e profonde trasformazioni delle città. A definire la città concorrono oltre alla complessità dei rapporti sociali ed economici le qualità spaziali, la morfologia variata a seguito delle vicende storiche, della dislocazione delle attività di residenza, lavoro, svago, dei costumi e delle abitudini degli abitanti, dello sviluppo tecnologico delle reti di servizi e delle comunicazioni, e infine, del modo in cui tende a configurarsi il rapporto tra luogo pubblico e privato, a sua volta espressione del rapporto tra sfera pubblica comunitaria e sfera privata familiare. Alla base dell'attuale concezione della città esiste l'idea che essa sia l'effetto di un inesauribile processo di trasformazione. Partecipano a tale processo in varia misura tutti i cittadini con il loro quotidiano comportarsi. Per cui la città può dirsi in generale creazione collettiva, nell'ambito di uno stesso luogo, che, pur variando per estensione, dislocazione e qualità ambientali, resta pur sempre il termine di riferimento culturale e simbolico della comunità. La città deriva dalla secolare consuetudine di una "comunità" con un "luogo": la presenza di entrambi i principi (quello sociale-comunitario e quello fisico-spaziale) sembra indispensabile alla sussistenza di essa. I tentativi di creare dal nulla la città non sono mancati: ma, se frutto di ambizione politica e di presunzione tecnica, hanno quasi sempre fallito lo scopo. La città non si crea né si distrugge. La città si auto-organizza. Secondo il geografo *Pierre George*, essendo impossibile una definizione geografica di città, l'unico carattere comune presente in tutte le forme di civiltà urbana è quello di *organismo socio-culturale* basato sulla *nozione sociologica di comunità* e sul concetto di cultura in senso antropologico. Come fatto di cultura la città nasce quando una comunità sente di appartenere a un luogo. Essa costituisce quindi un patto fra cittadini che conferisce a ogni città il suo tipico carattere ambientale. Intendendo la forma, il colore degli edifici, le pavimentazioni stradali, l'arredo, ma anche una estesa gamma di connotati visivi, tattili, auditivi e olfattivi, che sull'osservatore producono un'impressione globale sintetica, con la quale si tende ad identificarne l'individualità. Se allora per la sua complessità la città diviene oggetto di analisi, per la sua individualità è soggetto di sintesi. Così se ne definiscono i principali modi di approccio. L'uno analitico deduttivo, tipico della

scienza. L'altro sintetico induttivo tipico dell'arte. Sullo spartiacque delle esperienze scientifica e artistica sembra collocarsi anche la disciplina che studia la città e la modifica tramite il progetto e la gestione.

Non si può concludere un discorso sulla città senza un breve accenno al suo essere una struttura "dissipativa" (Prigogine, 1967; Dyke, 1988) e una struttura gerarchica (Odum et al., 1993). Una struttura dissipativa è una struttura capace di ricevere input a bassa entropia (materie prime), trasformarne una parte in prodotti e una parte in materiale di scarto, magari accumulandone un'altra parte al proprio interno sotto forma di stock temporaneo. Quando gli input di risorse vengono accumulati all'interno della città, essi diventano parte integrante della sua struttura: cemento e altri materiali da costruzione, strutture in legno, librerie, strade, e così via, il cui mantenimento richiede, come per tutte le strutture dissipative, il supporto di un flusso di risorse dall'esterno, con tempi di "turn over" e costi di manutenzione anche molto differenti, da caso a caso. I prodotti possono essere destinati al consumo immediato oppure immagazzinati per un consumo graduale o futuro, mentre gli scarti – materiale ad alta entropia – vengono rilasciati nell'ambiente circostante. In generale, maggiore è il flusso delle risorse disponibili e maggiore è la struttura che può essere sostenuta e più grande la produzione di entropia. E' anche vero che quanto più la struttura cresce e si organizza, tanto più diviene capace di attrarre nuove risorse, utilizzarle e degradarle, donde il nome di "struttura dissipativa". Lotka (1922) e Odum (1983) hanno suggerito che la capacità di auto-organizzazione e dissipazione delle risorse sia di fatto un meccanismo di selezione naturale, ossia una espressione della competizione per la base di risorse disponibile (Maximum Power Principle). L'auto-organizzazione introduce il discorso della gerarchia interna del sistema. L'organizzazione gerarchica dei sistemi naturali è stata descritta molto chiaramente da diversi autori (tra cui: Odum E.P., 1983; O'Neill et al., 1986), mentre molto più recente è l'interesse per lo studio dello sviluppo gerarchico dei sistemi antropici (città, economia, nazione). Una struttura dissipativa, infatti, si auto-costruisce secondo livelli gerarchici finalizzati alla specializzazione interna nell'acquisizione e trasformazione delle risorse. Una città è, ad esempio, organizzata con molti differenti settori collegati tra loro in una rete di scambio delle risorse e dell'informazione. Non è difficile metterne in rilievo alcune, tutte "finalizzate" a stabilizzare il sistema-città nel suo insieme:

- individui, famiglie, condominii, distretti, intera città;
- piccole botteghe artigiane, piccole industrie, settore commerciale, consumatori;
- scuole per la prima infanzia, scuole elementari, scuole medie, scuole superiori, università
- consigli di circoscrizione, consiglio comunale, sindaco, e così via.

La comprensione del ruolo e della posizione gerarchica di ciascuna componente è fondamentale se vogliamo elaborare un criterio di sostenibilità del sistema nel suo insieme, poiché la stabilità del sistema non può essere assicurata dalla stabilità di un solo componente, ma richiede la simultanea stabilità dinamica a tutti i livelli della gerarchia. A sua volta, la struttura gerarchica si basa sulla quantità e qualità dei flussi di risorse, che possono anche essere variabili nel tempo. Di conseguenza, anche la struttura potrà variare, seguendo l'evoluzione dei flussi di risorse. Valutare l'andamento temporale di tali flussi, misurati in maniera da rendere conto della loro quantità e qualità, può essere la via per prevedere possibili cambiamenti strutturali nel sistema in esame, sia esso una città, un settore produttivo, o una intera economia.

Le risorse in ingresso e le risorse accumulate internamente sono solo una parte del discorso.

Le risorse degradate, i residui e i rifiuti vengono rilasciati nell'ambiente circostante, o per mezzo di uno scarico diretto nei corsi d'acqua (fiumi e rete fognaria urbana) o mediante rilascio in atmosfera. I rifiuti solidi sono esportati per mezzo di autocarri fino alla discarica cittadina o al centro di trattamento dei rifiuti. A volte, alcuni co-prodotti indesiderati restano

per un certo tempo all'interno del confine urbano. A volte, essi sono prodotti a una velocità maggiore di quella con cui vengono smaltiti o diluiti. In generale, il loro accumulo può generare problemi alla struttura della città. Finché essi rimangono all'interno del sistema, cioè dentro la "superficie gaussiana" virtuale che la circonda, contribuiscono a distruggere la sua informazione macroscopica (ad esempio, corrodendo i monumenti) e microscopica (ad esempio, inducendo malattie o alterazioni genetiche degli organismi). Quando poi tali prodotti escono dalla città essi possono creare problemi al sistema più vasta con cui la città interagisce. Alla fine, è possibile tentare di individuare un criterio di stabilità della struttura stessa in termini della sua capacità di scaricare all'estero il disordine generato dalla trasformazione ed uso delle risorse. Ciò è ben descritto da Dyke (1988): "Since we seem to see ourselves getting more and more wealthy, as individuals and collectively, over the course of time, it is hard to think of the flow in non-equilibrium thermodynamics terms – e.g., as requiring a sink as well as a source. Trash, soot, and sludge seem an annoying and inconvenient by-product of our lives and activities rather than a necessary feature of them. But without a gradient down which material flow can cascade, non dissipative structures cannot remain stable".

Si tratta perciò di valutare tre differenti aspetti del processo di vita di una città, che ne determinano nei fatti la dimensione stessa e la dinamica:

- 1) creazione di complessità e struttura, alimentata da un input di risorse (energia e materia);
- 2) diminuzione o distruzione di complessità e struttura, dovute alla interazione con i rifiuti creati dall'attività del sistema urbano;
- 3) esistenza di matrici di scarico dei rifiuti, onde evitare che la struttura cittadina collassi sotto il peso dei suoi stessi prodotti di scarto.

1.8 Controurbanizzazione e "ciclo di vita" della città

Nei prossimi decenni oltre l'85% della crescita demografica mondiale avverrà nelle aree urbane dei paesi sottosviluppati o in via di sviluppo. La crescita della popolazione urbana continua a essere alimentata sia dal suo incremento naturale che dall'immigrazione dalle aree rurali. Si rafforza il gigantismo urbano, che si presenta associato a tre condizioni: le caratteristiche demografiche complessive, il livello di sviluppo economico, l'antichità del popolamento e delle civiltà urbane. Ai mutamenti quantitativi si accompagnano trasformazioni qualitative rilevanti nell'organizzazione e nella forma della città. Già nel XIX secolo nei paesi industrializzati la città aveva cessato di essere un organismo territoriale nucleare, per diventare un'entità areale più o meno estesa: agglomerazione, conurbazione, area metropolitana, città-regione. Dalla fine degli anni '60 del secolo scorso, viene meno anche la caratteristica della concentrazione areale. Tale fenomeno di deconcentrazione è stato descritto come controurbanizzazione e messo in relazione alle trasformazioni avvenute nelle società più ricche e tecnologicamente avanzate. Dopo una fase più marcata, la deconcentrazione urbana si presenta negli anni '90 soprattutto come crescente densificazione intorno alle aree metropolitane e lungo gli assi che le uniscono. Secondo il modello del "ciclo di vita delle città" ogni agglomerazione passerebbe successivamente e ciclicamente attraverso 4 fasi: urbanizzazione, suburbanizzazione, disurbanizzazione, riurbanizzazione. Tale modello è stato verificato nelle città europee e nordamericane per quanto riguarda le prime 3 fasi. Mentre per la quale non vi sono per ora evidenze significative. Controurbanizzazione e ciclo di vita della città, pur ponendosi da due punti di vista diversi, convergono sulla recente tendenza al declino demografico o alla stasi delle maggiori città dei paesi industrializzati, dopo una lunga fase di crescita concentrata. In seguito a queste trasformazioni sempre meno si parla di città come spazio costruito continuo. Dal punto di vista della forma si è imposta la nuova categoria descrittiva della città diffusa o reticolare. Dal punto di vista funzionale l'espressione

che oggi tende a fondere quest'insieme di concetti, è quella di sistema territoriale urbano. Esistono casi in cui più sistemi territoriali urbani contigui, sono collegati tra loro da relazioni funzionali preferenziali. E ciò dà luogo a un ispessimento particolare dei flussi distribuiti su un'area di dimensioni macroregionale. In alcuni casi le interconnessioni tra sistemi urbani contigui, sono così forti da considerarli come in un unico mega-sistema, detto *megapololi*. Altre forme di connessione tra sistemi urbani, sono quelle a rete. Si parla di "reti di città" tutte le volte che tra determinati sistemi urbani (nodi della rete) si hanno interazioni stabili che possono essere di vario tipo. Si distinguono reti urbane *gerarchiche* (ad albero, a stella) e reti urbane *interconnesse*. Tra queste ultime ve ne sono di basate su relazioni di prossimità, altre su relazioni di complementarità funzionale a scala planetaria (reti urbane *globali*).

Capitolo 2

METODICA UTILIZZATA: ANALISI MULTI-METODO E MULTI-SCALA (ENERGIA, EMERGIA, MFA, IMPRONTA ECOLOGICA)

2.1 Introduzione

Le procedure di valutazione fino ad ora proposte da molti autori sono state applicate a differenti finestre di interesse spazio-temporale e finalizzate ad obiettivi scientifici e di programmazione energetico-ambientale molto differenti tra loro e spesso non sovrapponibili (Szargut et al., 1988; Odum, 1988, 1996; Herendeen, 1998; Ayres, 1998; Giampietro et al., 1998; O'Connor, 1998; Valero, 1998; Foran e Crane, 1998). Molte di esse hanno offerto stimoli interessanti nella comprensione e nella descrizione di diversi aspetti della conversione e uso delle risorse nei sistemi ambientali ed economici. Tuttavia, senza una effettiva integrazione tra i differenti punti di vista degli strumenti di indagine con impostazione bio-chimico-fisica, è molto difficile che essi possano essere utilmente accoppiati a quelli di pianificazione economica, così da supportare una politica di sviluppo economico e produttivo che sia al tempo stesso rispettosa dell'ambiente.

La domanda per l'integrazione delle metodiche in analisi energetica e ambientale è stata enorme nello scorso decennio. Precedenti studi compiuti negli anni settanta e ottanta, cioè subito dopo l'introduzione dei primi concetti di analisi energetica (Odum, 1971), sono stati particolarmente dedicati a valutare e dimostrare la superiorità di un dato approccio rispetto ad altri oppure a codificarne le procedure (per esempio, IFIAS, 1974 e Slesser, 1998). Con lo sviluppo di nuove concezioni scientifiche è emerso chiaramente che la sinergia tra approcci differenti è molto spesso richiesto dalla natura stessa dei problemi affrontati.

Il livello di sostenibilità risulta essere legato alle caratteristiche delle risorse e del sistema utilizzatore, in termini di disponibilità, capacità, efficienza nell'uso, equità nella distribuzione in termini spaziali e temporali, e alle loro relazioni con le dinamiche e i vincoli ambientali. Gli approcci di valutazione debbono essere capaci di tenere conto di tutti questi aspetti.

In questo contesto si inserisce l'Analisi Multi-Metodo e Multi-Scala, che viene utilizzata in questo lavoro nella versione SUMMA – Sustainability Multimethod Multiscale Assessment, Ulgiati et al, 2006), Figura 2.1. Essa utilizza ed integra tra loro Material Flow Accounting (Bargigli et al, 2003a, Hinterberger et al., 1998, Ritthof et al., 2002), Embodied Energy Analysis (Herendeen, 1998; Brown and Herendeen, 1999; Slesser, 1998), Ecological Footprint (Wackernagel and Rees, 1995), Emergy Accounting (Odum, 1996; Brown and Ulgiati, 2004) e altri metodi, in modo da fornire un quadro il più possibile dettagliato sotto diversi punti di vista.

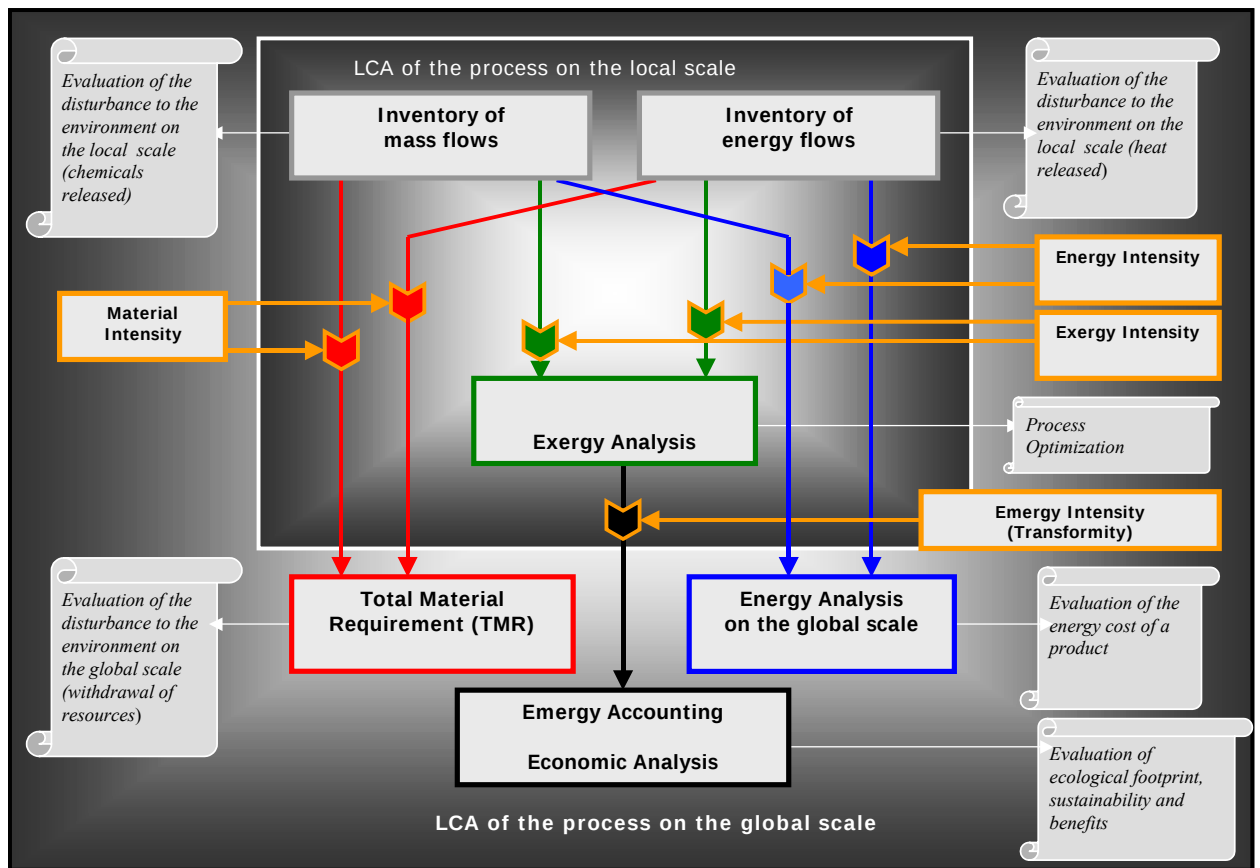


Figura 2.1

Schema del metodo di valutazione integrata SUMMA – Sustainability Multimethod Multiscale Assessment, Ulgiati et al. (2006).

2.2 Il valore aggiunto di un'Analisi Multi-Metodo e Multi-Scala

I vantaggi di una valutazione multi-criteriale sono molteplici e facilmente intuibili:

- A) Il principale vantaggio è una maggiore comprensione del problema, da più punti di vista e su diverse scale spazio-temporali. Ciascuna metodica infatti ha una scala di applicazione spazio-temporale ottimale mentre le esigenze dell'analista o dell'utente (manager, pianificatore politico, etc.) possono prevedere la necessità di un cambiamento di scala o di osservare il problema da varie angolazioni.
- B) Inoltre, se pure efficace nel sottolineare un aspetto del problema, un singolo metodo può non fornire informazioni altrettanto valide su altri aspetti, o, addirittura, trascurarne l'esistenza. Ai punti di forza dei vari metodi si affiancano infatti spesso delle carenze, sia di tipo teorico che computazionale, che possono a volte rischiare di inficiare la validità dell'analisi se i singoli metodi vengono applicati da soli.
- C) Infine, l'applicazione congiunta di più metodiche costringe ad un più attento controllo dei dati a disposizione e dei risultati ottenuti, permettendo in ultima analisi di avere non solo una più esauriente visione del sistema ma anche una maggiore attendibilità dei risultati, sulla base dei quali, è bene ricordarlo, viene poi basata la parte politico-decisionale. Purtroppo la presentazione dei risultati in questi casi perderà di semplicità: non un solo numero a riassumere il tutto bensì vari indicatori, ognuno relativo ad un certo aspetto del problema.

Un processo può infatti avere indicatori più favorevoli in certe categorie e meno in altre (Bargigli et al. 2003), e la scelta tra varie opzioni tecnologiche deve soppesare bene ciascun

punto. Dunque, a seconda dello scopo finale dell'analisi, si può attribuire maggiore importanza ad un aspetto del problema rispetto ad un altro.

In sintesi possiamo dunque dire che l'approccio multicriteriale permette di dare risposte articolate a problemi complessi cercando di suggerire caso per caso la migliore soluzione al problema, ovvero il miglior compromesso tra i pro e i contro di ogni soluzione. Nell'ambito di questo lavoro di tesi abbiamo cercato di valorizzare i vantaggi dell'integrazione ogni volta che questo è stato possibile.

2.3 Metodiche utilizzate

2.3.1 Analisi dei flussi di massa e bilancio di massa.

La redazione di un bilancio dei flussi di massa in ingresso e in uscita dal sistema è un pre-requisito ineludibile per ogni valutazione di processo. La materia si conserva secondo una fondamentale legge di natura, quando non intervengono reazioni nucleari. La massa di ogni elemento è conservata nel processo e la massa totale dei reagenti deve uguagliare la massa dei prodotti di reazione. Se questo è accuratamente considerato sia per via stechiometrica che per via analitica, i processi possono, in linea di principio³, essere descritti adeguatamente ed è possibile accertarsi se si sta trascurando qualche importante specie chimica in uscita che potrebbe ancora essere vantaggiosamente usata o che avrebbe dovuto essere smaltita in forma controllata. Inoltre, quando si espande la scala dell'indagine, ci si rende conto del fatto che ogni flusso di materia fornito al processo è stato a sua volta estratto e lavorato altrove. Ciò vuol dire che una ulteriore quantità di materia è trasferita da un luogo ad un altro, lavorata e poi smaltita. Pertanto, la descrizione dei flussi di materia non può limitarsi ai soli flussi che entrano ed escono localmente nel processo, ma deve considerare anche i flussi indiretti o nascosti, ossia i prelievi di risorse e l'emissione di risorse degradate che avvengono prima che il processo abbia luogo e, di solito, lontano da esso. Ciò comporta lo spostamento dell'attenzione dal bilancio di massa locale alla contabilità complessiva dei flussi di massa necessari al processo.

2.3.2 Material Flow Accounting e categorie di intensità materiale.

La quantificazione dei flussi materiali coinvolti nell'intera catena di processi in esame è stata suggerita come misura del disturbo ambientale indotto dal processo stesso (analisi dei flussi di massa – Schmidt-Bleek 1993 e 1998, Hinterberger e Stiller, 1998). L'analisi dei flussi di massa (Material Flow Accounting) è nata in Germania, presso il Wuppertal Institut, a metà del decennio 1990-2000 ed è stata rapidamente accettata e inserita in molte contabilità sia nazionali (es. ISTAT), che sovranazionali (es. Unione Europea). Ad oggi è ampiamente usata da un nutrito gruppo di istituti ed enti di ricerca a livello europeo (Wuppertal Institute, IIASA, SERI, Factor 10 Institute, ecc.) ed extraeuropeo (World Watch Institute, 2003).

L'intensità materiale associata ad un prodotto è calcolata sull'intero ciclo di vita di questo e somma insieme tutti gli input di materiali che è stato necessario movimentare, estrarre, utilizzare e trasformare per la produzione di una unità di prodotto (Material Input Per unit of Product – MIPP o MIT- Material Input per Ton) o per fornire un dato servizio (Material Input Per unit of Service – MIPS). L'intensità materiale è detta anche “zaino ecologico” di un prodotto. Ulteriori dettagli sulla metodica sono forniti in Bargigli et al., 2003-a.

³ Nella pratica è quasi impossibile seguire le centinaia di reazioni e prodotti intermedi coinvolti, ad esempio, in un processo di combustione, a meno che non ci si limiti ai prodotti principali. Ciò non inficia la validità del principio di conservazione della massa e l'applicazione di questo principio torna utile in numerosi casi pratici (Ayres, 1995).

2.3.2.1 *Punti di forza e di debolezza della metodica MFA*

L'analisi dei flussi di massa possiede indubbi punti di forza, il primo dei quali è quello di richiedere la redazione di un bilancio delle masse in gioco. Ciò rappresenta un imprescindibile punto di partenza per parallele analisi del processo con altre metodiche (es. embodied energy analysis). L'altro elemento distintivo e decisamente positivo di questa metodica è che essa mette in evidenza non solo i flussi diretti ma anche flussi nascosti legati alle attività produttive aiutando a fornire una visione più sistemica dei problemi, specie se abbinata ad analisi su macro-scala.

Inoltre, grazie all'elevato numero di operatori che la applicano, il database di intensità materiali disponibile è ampio e in continua crescita, soprattutto per metalli e composti chimici (MI Werte, 1998, www.wupperinst.org/Projekte/mipsonline/download/MIWerte.pdf).

La MFA possiede anche lacune non trascurabili che necessitano di uno sforzo ulteriore per essere colmate. Alcune di esse tuttavia sono insite nella metodica stessa e possono essere superate solo mediante l'uso contemporaneo ed integrato di più metodiche.

Ad esempio, la MFA non aspira a quantificare il danno ambientale o la perdita dei servizi ambientali, come misura a posteriori dell'impatto, ma si basa essenzialmente sul "principio precauzionale" di minimo uso delle risorse e minima movimentazione delle masse al fine di minimizzare il possibile impatto sull'ambiente. Inoltre, nel momento in cui i flussi di massa abiotica vengono tutti sommati per quantificare la materia totale movimentata, si pongono sullo stesso piano specie chimiche diverse (ad esempio, diossina e ferro; oppure minerale di cromo e minerale di alluminio), il cui significato non sta nella quantità in grammi bensì nella particolare conformazione geologica, storia generativa nei cicli naturali, etc. Analogamente, parlando di massa biotica, non si può fare a meno di osservare la differenza esistente tra tipi diversi di sostanza biotica (il cui valore è legato alla biodiversità e al ruolo delle diverse specie biotiche nell'ecosistema). Tuttavia, per una prima valutazione, anche se un po' superficiale, la quantità può essere già una indicazione, anche se disgiunta dalla qualità. Vedremo nel seguito che quest'ultimo aspetto è recuperabile attraverso il concetto di eMergia.

2.3.3 *Descrizione dei flussi di energia.*

Un'analoga quantificazione dei flussi di energia secondo la prima legge della termodinamica deve sempre affiancare il bilancio di massa. L'analisi energetica di primo principio è la tecnica più diffusa e più usata. E' necessario fare attenzione al fatto che alcune volte lo stesso input può essere identificato sia come input di materia che come input di energia, oppure in parte come substrato materiale e in parte come combustibile. In genere ciò si applica in particolare ai combustibili. Entrambe le misure possono rivelarsi utili, e dipendono dallo scopo della valutazione.

L'analisi energetica su scala locale può essere poi estesa fino ad includere la scala globale per mezzo di metodiche che permettano di considerare l'energia usata precedentemente per produrre i singoli input al processo considerato. Tra le numerose varianti di questo tipo analisi è stata scelta la Embodied Energy Analysis.

2.3.4 *Embodied Energy Analysis.*

La Embodied Energy Analysis (IFIAS, 1974; Herendeen, 1998) si fonda sull'importanza cruciale che nell'economia mondiale hanno i combustibili fossili come risorsa energetica, petrolio in particolare. Ad ogni voce in ingresso nel sistema viene attribuita per mezzo di opportuni coefficienti reperibili in letteratura, una certa quantità di petrolio equivalente. In tal modo si ha un'indicazione quantitativa della massa di petrolio impiegata per ottenere la risorsa in ingresso, sia direttamente che indirettamente, ovvero sotto forma di beni o servizi, che a loro volta hanno richiesto petrolio. Moltiplicando poi la massa di petrolio equivalente

per il suo potere calorifico superiore (HHV, Higher Heating Value) si ottiene il relativo apporto energetico.

Il rapporto tra l'energia del prodotto in uscita di nostro interesse (es. elettricità), eventualmente calcolata anch'essa per mezzo del suo HHV, e l'energia totale in ingresso così calcolata fornisce una misura dell'efficienza energetica del processo in esame ed una misura indiretta del contributo all'effetto serra dovuto alla combustione di fonti fossili.

Avranno di conseguenza minore impatto ambientale quei processi che presentano un minor consumo per unità di prodotto. Dal consumo totale di combustibili fossili, ripartiti per fonte primaria, si possono ricavare stime di massima sulle emissioni da combustione che un dato processo comporta sulla scala globale della biosfera. Anche se questa stima non esaurisce la totalità delle emissioni inquinanti, essa tuttavia esprime spesso le voci più importanti.

2.3.4.1 Punti di forza e di debolezza della embodied energy analysis

La metodica è matura ed i database energetici presenti in letteratura scientifica sono numerosi e dettagliati (Buwal, 1996; EPA, 1995; Boustead and Hancock, 1979). Il suo campo di applicazione ottimale sono i combustibili ed i processi di conversione energetica, ma il tipo di informazioni che fornisce è sempre vincolato ad una ottica di primo principio (bilancio e descrizione dei flussi, conservazione del contenuto termico) mentre non presta adeguata attenzione al calcolo del lavoro estraibile dai flussi stessi e alla quantificazione delle perdite dovute alle irreversibilità termodinamiche. Inoltre, solo i flussi di energia che hanno un valore commerciale vengono computati mentre i servizi ambientali, ad esempio la radiazione solare, esterni al sistema economico, non vengono contabilizzati.

La Embodied Energy Analysis tuttavia consente una stima indiretta del contributo all'effetto serra e ad altre categorie di impatto (fotosmog, acidificazione suolo) delle attività antropogeniche connesse al consumo di combustibili fossili sia su scala locale (bilancio energetico di processo) che su scala globale (Embodied Energy Analysis).

2.3.5 L'Ecological Footprint (Impronta Ecologica)

L'Impronta Ecologica (Wackernagel and Rees, 1996) è una misura del “carico” imposto da una data popolazione sulla natura o, in altri termini, una misura della superficie produttiva necessaria per sostenere il suo consumo di risorse e lo scarico dei propri rifiuti.

Ciascun flusso o servizio ambientale fornito a un sistema viene convertito in una misura della superficie (reale o potenziale) necessaria per fornirlo, espressa in ettari.

La terra “virtuale” associata agli input che supportano la vita di un individuo o sistema è la sua “ecological footprint” e viene confrontata con la terra “reale”, ossia con gli ettari realmente disponibili (pro-capite o per l'intero sistema).

Ciascun bene consumato dall'uomo necessita dunque di una superficie teorica, mediamente stimata, indispensabile alla sua produzione. Tutti i beni alimentari richiedono di poter essere supportati a monte da una superficie produttiva. Per produrre ad esempio cereali, ortaggi o frutta è necessario l'impiego di una certa quantitativo di ettari di terra. Tale quantità varia in relazione al tipo di prodotto considerato e naturalmente dipende dalla richiesta di consumo del bene. Lo stesso discorso vale anche, ad esempio, per la carne o i latticini: mediamente un certo numero di ettari di terra si rendono necessari per il pascolo e più in generale per l'allevamento del bestiame. Anche la produzione di tessuti e di legname richiede terreni: ad esempio, per la coltivazione del cotone e per gli alberi da tagliare. La somma di tutti gli ettari di terra necessari a supportare la vita di un individuo rappresentano la sua impronta ecologica. Normalmente quindi l'impronta ecologica viene calcolata in termini di ettari procapite, ma da tale valore è possibile risalire anche all'impronta ecologica di un'intera popolazione, semplicemente moltiplicando il valore procapite medio per l'entità della

popolazione. Al calcolo della superficie produttiva, sono inoltre sommati anche gli ettari di terra occorrenti per lo smaltimento dell'anidride carbonica. Naturalmente anche qui si tratta di un calcolo medio relativo alla capacità di differenti superfici di assorbire la CO₂ dall'atmosfera grazie al loro diverso rivestimento vegetale che assorbe CO₂ per effettuare la fotosintesi. L'ecological footprint dunque tiene conto, *down stream*, anche del consumo di altri beni materiali, e ciò nella misura in cui sono necessari ulteriori ettari di terra per l'assorbimento dell'anidride carbonica emessa a seguito dei processi di combustione impiegati per la produzione dei beni.

La domanda di terra "virtuale" in eccesso viene coperto dagli stock di riserve (fossili, forestali, idriche). Un sistema che supera la propria disponibilità reale vive "a debito" nei confronti di altre popolazioni e/o di quelle future.

2.3.5.1 Punti di forza e di debolezza dell'ecological footprint

L'impronta ecologica ha il pregio di essere uno strumento semplice ma allo stesso tempo molto espressivo. Essa è in grado di effettuare una fotografia del numero di ettari di terra effettivamente sfruttati da una popolazione per il proprio sostentamento. Il risultato diventa ancor più eloquente quando si confronta l'impronta ecologica con gli ettari di terra che una regione o una nazione ha realmente a disposizione. Le impronte ecologiche calcolate per diverse nazioni del mondo (Wackernagel et al., 1997), mettono in evidenza pesanti sproporzioni. La maggior parte dei paesi industrializzati nord occidentali, presentano impronte ecologiche enormemente superiori rispetto alle loro rispettive superfici territoriali. Viceversa i paesi del Sud del Mondo, parecchi dei quali caratterizzati da territori molto vasti, presentano impronte ecologiche in proporzione molto più piccole. Ciò mette immediatamente in evidenza quanto grava lo sviluppo occidentale sui paesi del Sud del Mondo e più in generale sull'intero pianeta. A titolo di esempio, nel loro lavoro, Wackernagel e Rees (Wackernagel and Rees, 1996), mettevano in evidenza che se tutti vivessero come gli attuali abitanti del Nord America ci vorrebbero almeno altri due pianeti come la terra per produrre risorse, assorbire rifiuti e mantenere i servizi vitali.

L'impronta ecologica tuttavia considera il consumo degli altri beni solo in termini della CO₂ che la loro produzione comporta. La vita di un individuo è supportata da una enorme quantità di altri materiali di cui l'impronta ecologica non tiene conto. Essa non tiene conto della dipendenza dell'uomo dalle materie prime del sottosuolo (metalli, minerali, combustibili fossili, ecc) e del loro inesorabile depauperamento, poiché risorse non rinnovabili. In tal caso, se tutti vivessero come gli abitanti del Nord America probabilmente servirebbero sì altri due pianeti come la terra, ma anziché dati una sola volta per tutte, ne necessiterebbero due nuovi ogni trecento anni circa. Naturalmente anche i vari tipi di degrado connessi con l'estrazione delle materie prime non sono considerati. L'impronta ecologica inoltre ignora ogni altra forma di inquinante al di fuori della CO₂, e la complessità dei problemi ambientali che può derivare dalle altre forme di inquinamento. Ma soprattutto non tiene conto dell'impatto che hanno le azioni dell'uomo sulla biodiversità. Infine, non sembra, dai dati di letteratura, che l'impronta ecologica sia calcolata tenendo conto anche della capacità di assorbimento della CO₂ da parte degli oceani e dei processi di formazione dei carbonati sulla crosta terrestre, due meccanismi non trascurabili da affiancare a quello fotosintetico.

2.3.6 L'Analisi Energetica

E' noto a tutti che quando si utilizza energia fossile in un determinato processo produttivo, la maggior parte di essa viene degradata e complessivamente non è più disponibile, ossia non è contenuta nel prodotto finale. Infatti il contenuto di energia del prodotto finale differisce notevolmente da quello degli input, a causa delle perdite entropiche che avvengono nei

numerosi sottoprocessi che conducono al prodotto finale. L'energia totale in forma di petrolio grezzo equivalente necessaria per alimentare un dato processo è molto spesso chiamata "embodied energy" dagli analisti energetici (Herendeen, 1998). La parola "embodied" letteralmente significa "incorporata", ma in realtà l'energia "embodied" non è più totalmente contenuta dal prodotto, ma rappresenta la somma "energia del prodotto + energia degradata nel processo". Se una risorsa richiede molta energia per essere resa disponibile o utilizzabile, essa va considerata particolarmente preziosa e deve essere usata con attenzione.

L'analisi emergetica muove da questo medesimo concetto, ma spostando all'indietro i confini temporali fino alla formazione delle risorse primarie.

Questo modo di calcolare il valore di una risorsa dal punto di vista degli input, cioè della gerarchia di processi che forniscono gli input al processo produttivo in esame, è stato chiamato da Odum "donor-system of value", mentre l'analisi energetica e le valutazioni economiche sono "user-systems of value" (qualcosa ha un valore in base alla sua utilità per l'utente finale).

L'emergia solare è definita come la somma di tutti gli input di energia solare direttamente o indirettamente richiesti in un processo. Vengono considerati nel totale anche gli input di energia geotermica e gravitazionale, resi equivalenti a quella solare mediante alcuni coefficienti di trasformazione ricavati dallo studio delle interazioni tra questi flussi nella biosfera (Odum, 1996 pp. 35-43). Ogni input al processo considerato è a sua volta fornito da altri processi (o catene di processi) convergenti, dai quali l'emergia solare è via via concentrata. La quantità di emergia dissipata in ingresso per ottenere una unità di prodotto in uscita è chiamata transformity solare, se il prodotto è espresso come energia e misurato in joule, altrimenti se espressa per unità di massa viene detta "emergia specifica" (SpEm, seJ/g). La transformity è dunque una grandezza intensiva, mentre l'emergia è estensiva.

Maggiori dettagli sull'emergia e la sua algebra sono contenuti in appendice 3.

Le transformity, un concetto centrale nell'analisi emergetica, sono calcolate per mezzo di studi mirati sui processi di produzione di un dato bene o flusso. I valori delle transformity sono disponibili nella letteratura scientifica sull'emergia (Brown and Arding, 1991; Brown and Ulgiati, 1999; Odum, 1996; Odum et al., 2000).

L'analisi emergetica permette di ottenere indicatori per valutazioni di efficienza e sostenibilità ambientale. Il primo indicatore è, inevitabilmente, l'emergia totale che supporta un processo, che rappresenta una quantificazione del costo bio-chimico-fisico di formazione di un prodotto. Esso costituisce una misura della reale "dimensione" del processo sulla scala della biosfera. In questo senso, l'emergia totale utilizzata, E_m , è una misura di "ecological footprint" (impronta ambientale, secondo la già citata definizione di Wackernagel e Rees, 1996) molto più complessiva di quella tradizionale, perché indica quanto il processo "pesa" sulla biosfera e non solo sulla domanda di superficie produttiva. Un processo che richiede molte risorse, soprattutto se non rinnovabili, le sottrae infatti, ad altri usi. Si deve, quindi, dimostrare con molta chiarezza la sua utilità rispetto ad altri processi.

Possiamo definire l'emergia totale utilizzata E_m come la somma di tutte le risorse rinnovabili R , non rinnovabili N e importate F che alimentano il processo:

$$E_m = R + N + F$$

Tale emergia è attribuita, per definizione, al prodotto Y del processo in questione, rappresentando il costo del prodotto stesso: $E_m \Leftrightarrow Y$.

Le dimensioni di un sistema sono vincolate dal flusso di risorse, cioè non è possibile alcuna crescita del sistema (sia esso un organismo, un impianto industriale, una economia) se per fare ciò c'è bisogno di più emergia di quella disponibile. In pratica non è possibile sviluppare in una data area o nazione più attività economiche di quante siano supportabili dalle risorse disponibili localmente o importate.

2.3.6.1 *Punti di forza e di debolezza dell'analisi emergetica*

L'analisi emergetica è dal punto di vista concettuale decisamente valida e innovativa e si inserisce a perfezione in un'ottica di indagine di tipo globale e olistico che solo recentemente e a fatica si sta facendo strada in altri ambiti scientifici. Tuttavia, il database disponibile è ancora limitato e disomogeneo in termini di affidabilità dei dati. Anche la parte computazionale è attualmente in fase di revisione e sviluppo, ma con ottime prospettive di rapido perfezionamento.

Appare chiaro che l'emergia e gli indicatori derivanti spostano la valutazione dei processi a una scala spazio-temporale più ampia, quella della biosfera. Mentre è altamente improbabile che l'approccio emergetico sia di uso pratico per determinare il prezzo di un prodotto al dettaglio o il modo in cui un processo potrebbe essere tecnologicamente migliorato per massimizzare l'efficienza energetica nella scala locale, la sua capacità di collegare i processi locali alle dinamiche globali della biosfera potrebbe offrire uno strumento prezioso per adattare i processi sotto il controllo dell'uomo alle oscillazioni e alla velocità dei processi naturali.

2.4 **Emissioni e impatto relativo.**

Le emissioni dirette e indirette di un determinato processo produttivo sono solitamente di difficile reperimento nella letteratura scientifica anche perché in parte coperte da segreto industriale. Un'alternativa valida consisterebbe in teoria nel ricavare le emissioni per via stechiometrica conoscendo le reazioni chimiche coinvolte, le quantità e il tipo di reagenti utilizzati e le rese di reazione. Come si può immaginare tali condizioni ottimali si verificano raramente, per cui alla fine i dati relativi alle emissioni sono spesso parziali e/o disomogenei da processo a processo. Ciò vale ancor più per un sistema urbano.

Nel caso specifico di un singolo impianto dalla localizzazione geografica certa i rilasci sono misurabili direttamente. Nel caso invece di analisi di classi di processi l'accento si sposta necessariamente su un'ottica più generale e "media", data la variabilità dei processi e data la differenza di limiti ammessi per legge in ciascuno stato. Dunque, dal singolo composto chimico rilasciato nell'ambiente, si passa a considerare le classi di composti chimici.

Inoltre resta il problema della scala di riferimento di indagine la quale può essere circoscritta alla zona di emissione (scala locale) oppure considerare anche gli impatti a monte e a valle del processo stesso (scala globale). Non c'è alcun dubbio sul fatto che un sistema urbano possa avere considerevoli impatti di entrambi i tipi.

Una volta determinate le quantità e la tipologia chimica delle emissioni è necessario valutare, sia su scala locale che globale, il loro impatto sugli ecosistemi e sulle forme viventi, essere umani inclusi. Devono perciò essere individuati dei coefficienti di impatto per i vari comparti ambientali (acqua dolce, suolo, aria, mare...) e sugli organismi viventi che siano relativi a ciascuna sostanza o classe di composti chimici.

Esistono in letteratura scientifica numerosi coefficienti di impatto ambientale per i vari composti chimici che quantificano il loro contributo all'alterazione di equilibri climatico-ambientali legati ai cicli bio-geo-chimici ad es. equivalenti CO₂ per l'effetto serra. Vi sono inoltre per i molti composti chimici, numerosi coefficienti di tossicità, tipo dose-effetto, sia per la valutazione della tossicità acuta sia di quella cronica in certe specie animali di riferimento.

I coefficienti di impatto relativi alle alterazioni chimico-fisiche dell'ambiente sono in genere piuttosto attendibili anche se ovviamente risentono della naturale variabilità delle condizioni al contorno prodotte dal microclima locale o dalla stagionalità. In genere per tutti i composti

rilasciati nell'ambiente vi sono poi problemi di maggiore o minore biodisponibilità o reattività immediata dovuti alla speciazione (presenza in diversi stati di ossidazione) di uno stesso elemento emesso nell'ambiente. Sono coinvolti sempre in questo caso fenomeni di ossidazione e/o riduzione per via batterica o fotochimica, complessazione, immobilizzazione e/o adsorbimento su vari substrati (es. suolo), rilascio graduale o occasionale nei vari comparti ambientali. Normalmente i coefficienti si basano inoltre su calcoli termodinamici di affinità verso un certo comparto ambientale (aria, acqua, suolo, tessuti viventi) senza considerare l'aspetto cinetico.

La determinazione dei coefficienti tossicologici presenta anche maggiori problemi di accuratezza ed è perciò auspicabile che il principio prudenziale sottenda l'interpretazione dei risultati finali dell'analisi.

I problemi connessi a questi coefficienti, che peraltro rappresentano comunque un prezioso strumento di valutazione, sono essenzialmente dovuti alla difficoltà di determinare con accuratezza la variazione interspecifica di tossicità acuta (es. dal ratto all'uomo), che spesso viene ottenuta solo sulla base della diversità di peso corporeo medio. Per la tossicità cronica si aggiungono a quanto già accennato i quesiti relativi alla durata del tempo di somministrazione e poi a quella del tempo di osservazione. Infine, la determinazione dell'effetto tossico su un ecosistema presenta difficoltà di monitoraggio (individuazione delle specie sensibili - biomarkers) e di calcolo dei coefficienti, anche se interessanti studi tossicologico-statistici sono stati presentati negli scorsi anni (Van Straalen & Denneman 1989.).

Poiché i possibili impatti di un certo processo possono essere numerosi devono essere selezionati quelli più rilevanti al fine dell'analisi e raggruppati in categorie in modo da rendere maggiormente leggibile la presentazione dei risultati.

2.5 Stato dell'arte nella valutazione delle città

Lo studio sull'energetica urbana si è sviluppato a partire dal lavoro di Patrick Geddes (1915), che fu uno dei primi autori a correlare i periodi della storia umana con l'uso dell'energia. I primi insediamenti umani furono piccoli villaggi circondati da territori agricoli. Con l'accrescersi dell'uso delle risorse e della popolazione, le aree urbane si espansero e i circostanti territori agricoli furono poi convertiti sempre di più per lo stesso uso urbano. L'esistenza ed il mantenimento di un'area urbana e della sua struttura interna dipende dai flussi di beni e servizi dentro, fuori ed in tutta la città. Mentre l'urbanizzazione è stata ben costituita come momento focale di indagine nelle scienze sociali, essa è stata meno frequentemente trattata nelle discipline collegate all'ecologia (Jaakson, 1977).

Odum e Peterson (1972) hanno collegato la complessità delle città ai principi ecologici ed ai flussi di energia. Al fine di valutare i servizi della natura apportati alla società umana, l'analisi energetica ecologica è stata proposta come complemento alla valutazione economica (Odum, 1971, 1988). Anche le richieste di energia degli esseri umani e le caratteristiche energetiche delle città, basate sui combustibili fossili, sono state oggetto di studio da parte di Odum e Odum (1981). Haines (1986) ha esaminato a fondo la relazione tra consumo efficiente dei combustibili fossili e la configurazione spaziale della forma urbana. Il ruolo della vegetazione negli ecosistemi urbani e i servizi forniti dalle foreste urbane alla sostenibilità dell'ambiente urbano sono stati esaminati da McPherson et al., 1994, Chicago Urban Forest Climate project, USDA, USA. Questi autori hanno monitorato l'influenza delle foreste urbane sul vento, sulla temperatura dell'aria, sull'inquinamento atmosferico, sulla rimozione degli inquinanti, sulla riduzione dell'anidride carbonica, e infine sul potenziale contributo degli alberi delle foreste urbane al risparmio energetico.

L'importanza di una teoria dell'energia e di attività di ricerca riguardanti la relazione tra flusso di energia e sviluppo urbano furono a lungo ignorate. Solo in tempi relativamente recenti Odum ha esplorato l'organizzazione spaziale e la base energetica delle città, mostrando che lo sviluppo delle aree urbane segue una dinamica simile in tutto il mondo (Odum e Odum, 1981; Odum, 1983; Odum e Odum, 2001), basata sul supporto ricevuto dall'ambiente circostante e sui flussi di materia ed energia forniti dallo stesso alla struttura urbana. Odum e i suoi collaboratori hanno descritto la crescita di strutture gerarchiche nella città come mezzi per accrescere l'efficienza del prelievo e della trasformazione delle risorse. Tuttavia, poichè la disponibilità di alcune risorse comincia a diminuire, Odum ha messo in evidenza il fatto che una vera comprensione della dinamica temporale delle città deve includere proiezioni e pianificazione di periodi di declino seguiti da ricrescita, ossia il cosiddetto "comportamento oscillante". Costruendo sull'approccio di Odum, Shu-Li Huang (1998a,b), ha proseguito lo studio dell'organizzazione spaziale e della gerarchia energetica delle città asiatiche, con particolare attenzione alle implicazioni sulla pianificazione urbana (Huang et al., 2001).

Joan Martinez Alier e il suo gruppo di ricerca alla Universitat Autònoma de Barcelona (Spagna) ha messo in luce i cosiddetti "conflitti di distribuzione ecologici" causati dalla crescita e dalla dinamica interna delle città (conflitti locali sull'inquinamento dell'aria, del suolo e dell'acqua, e conflitti esportati a scale geografiche più allargate, Martinez Alier, 2003), con particolare attenzione alle condizioni che generano la cosiddetta "insostenibilità urbana". Munda (2003), nella stessa Università di Barcellona, ha studiato la sostenibilità urbana come concetto multi-dimensionale, tentando di elaborare una spiegazione del perchè gli approcci riduzionistici non sono adeguati a trattare gli aspetti della sostenibilità urbana. Per questa ragione, Munda suggerisce l'adozione della valutazione multicriteriale come cornice di riferimento globale a più dimensioni.

Noorman et al., 2003, University of Groningen, hanno studiato il problema dello sviluppo sostenibile delle città dal punto di vista della pressione ambientale associata alle attività di produzione e consumo in alcune città del Nord Europa (Stockholm, Fredrikstad, Guildford e Groningen).

Il collegamento tra le funzioni delle società umane e le funzioni degli ecosistemi e la relazione tra sviluppo urbano e resilienza ecologica è stato recentemente esplorato da Marina Alberti, University of Washington (<http://faculty.washington.edu/malberti/>). Basandosi su un notevole database di 100 città del mondo caratterizzate da diversi livelli di attività economica, la sua ricerca ha messo in luce:

- (a) In quale modo le variabili che descrivono il territorio urbano variano al variare della distanza dal centro dell'area considerata;
- (b) Quali intensità di uso del territorio urbano e quali misure di tale uso sono in grado di spiegare meglio le condizioni ecologiche della città e la variabilità della domanda di servizi ambientali;
- (c) Quali sono le scale spaziali di riferimento dei diversi processi ecologici nel paesaggio urbano.

Kenworthy (2003), dell'Institute for Sustainability and Technology Policy, Murdoch University, Australia, ha realizzato una vasta osservazione di alcuni aspetti critici relativi al trasporto, alla forma urbana e all'uso di energia in un campione di 84 città degli USA, Australia, Canada, Europa Occidentale e Orientale, Asia (città ad alto e basso reddito), Medio Oriente, Africa, America Latina e Cina. Il suo studio si è concentrato principalmente su fattori come: densità urbana, uso di automobili, trasporto pubblico, modi non-motorizzati di spostamento, così da facilitare la comprensione delle diverse situazioni di mobilità generate

dal diverso accesso a fonti di energia (Kenworthy and Laube, International Union for Public Transport, Brussels, 2001). Federici et al., 2003, 2004, hanno sviluppato un set integrato di indicatori per valutare l'efficienza e la sostenibilità ambientale di alcune forme di trasporto locale e nazionale in Italia, in dipendenza del diverso livello di sviluppo economico.

Un grande sforzo di valutazione della sostenibilità urbana è stato recentemente compiuto prevalentemente in ambito europeo da alcuni istituti di ricerca coinvolti nella cosiddetta "Material Flow Accounting" (tra cui il Wuppertal Institute, il Faktor 4 Institute e l'IFF-Social Ecology della Klagenfurt University, Vienna). Sono state compiute valutazioni della base materiale dello sviluppo di numerose città Europee, tra cui Liverpool, York, Vienna e Amsterdam.

Infine, Brown e Vivas (2005) hanno introdotto un "land use classification index", dove si considerano vari tipi di uso del suolo, dai sistemi naturali a quelli più antropizzati (città e industrie), e si classificano tutti in base al logaritmo naturale dell'indicatore di densità energetica. Vedremo in seguito come la città di Roma può essere classificata in base all'indice da essi proposto.

Nonostante la recente maggiore vitalità degli studi nel settore urbano e la riconosciuta importanza del fattore energetico, una teoria integrata sull'interdipendenza tra lo sviluppo urbano ed i flussi energetici rimane ancora da costituire. In particolare, non esistono studi relativi alla città di Roma, nè dal punto di vista della sua base materiale nè dal punto di vista energetico.

APPENDICE AL CAPITOLO 2

Aspetti computazionali

Introduzione

Nel **capitolo 2** sono state presentate brevemente le varie metodiche. Gli approfondimenti computazionali, l'algebra e i meccanismi di allocazione di ciascuna metodica utilizzata sono invece presentati in questa appendice.

La struttura dei fogli di lavoro è anch'essa presentata in questa sede.

2.1 Aspetti computazionali in Material Flow Accounting

L'intensità materiale (sia MIPP che MIPS) può riferirsi a 5 categorie, che misurano allo stesso tempo la dipendenza del processo dalla base materiale considerata e il disturbo ambientale dovuto all'alterazione di equilibri preesistenti. Tre di queste sono comunemente usate:

- *materiale abiotico*: sono inclusi in questa categoria i minerali estratti, la terra di scavo, i materiali manufatti, i combustibili, espressi in unità di massa;
- *acqua*: si considera ogni alla tipo di deviazione di acqua dal suo naturale bacino di scorrimento ad es. acqua di raffreddamento, per irrigazione, di processo, falde acquifere intaccate da uno scavo, percolamento da discariche controllate etc.;
- *aria*: tutta l'aria che ha subito una trasformazione di stato fisico (condensazione...) o chimico (reazione chimica) viene inclusa in questa categoria, ad es. ossigeno per combustione (con formazione di biossido di carbonio) e frazioni di azoto atmosferico che reagiscono a formare ossidi di azoto.

Altre due categorie, a causa delle difficoltà incontrate per la loro quantificazione e della loro intrinseca variabilità zonale, sono meno usate, nonostante la loro oggettiva importanza:

- *materiale biotico*: prodotti agricoli e da gestione forestale, biomassa mobilizzata anche se non utilizzata, come ad esempio la biomassa vegetale rimossa in previsione di operazioni minerarie;
- *erosione del suolo*: (perdita di suolo fertile indotta da attività umane di ogni tipo (agricoltura, estrazione mineraria, edilizia etc..). Quest'ultima categoria è parzialmente sovrapposta a quella relativa al materiale abiotico.

Nel presente lavoro si è tentato, ove possibile, di quantificare, con la massima accuratezza consentita dai dati disponibili, le categorie *materiale abiotico ed acqua*.

Possono pertanto essere considerati i seguenti indicatori di efficienza e di intensità materiale:

1. la domanda di materiale abiotico per unità di output (MI, Material Intensity, g_{abiot}/g_{out});
2. la domanda di acqua per unità di output (MI, Material Intensity, g_{water}/g_{out});

Ove con il termine di output si intendono i flussi e prodotti materiali considerati nell'analisi.

2.1.1 Algebra della Material Flow Accounting

L'algebra sottostante l'analisi dei flussi di massa è molto semplice ed è la seguente: in caso di due o più prodotti utili (cioè commerciabili) in output a un processo produttivo, l'allocazione

dei flussi in entrata ai prodotti viene effettuata sulla base della massa di questi ultimi (split). Nel caso di rifiuti o co-prodotti di scarso interesse economico in uscita da un processo produttivo, non viene attribuito alcuno zaino ecologico se non quello degli input relativi al loro successivo trattamento, attribuiti però al prodotto principale. Invece, quando un determinato materiale viene riciclato, si fa l'assunzione di attribuirgli solo i costi materiali indiretti del riciclo. In tal modo, a meno che il riciclo non comporti trattamenti particolarmente gravosi in termini di uso di risorse, i prodotti riciclati hanno zaino ecologico inferiore ai prodotti primari (ottenuti cioè dalla trasformazione di materie prime). La convenienza del riciclo dunque emerge chiaramente in MFA come conseguenza delle sua algebra e delle regole di allocazione.

Va inoltre ricordato che l'elettricità utilizzata per la manifattura di un prodotto ha uno zaino ecologico essa stessa (cfr. tabella 2.1).

Tabella 2.1 Intensità materiali dell'elettricità per vettore energetico e per nazione.

Voce	unità	abiotico	acqua*
Energy Carrier			
Coal (avg)	g/kWh	64	1330
Nuclear	g/kWh	279	8706
Heavy oil	g/kWh	349	4355
Natural gas	g/kWh	274	2280
Hydroel.	g/kWh	113	42
Windpower	g/kWh	114	56
Country			
Austria	g/kWh	730	1271
Belgium	g/kWh	1455	6854
France	g/kWh	552	7222
Germany	g/kWh	4670	6967
Italy	g/kWh	734	3054
Netherlands	g/kWh	1860	3849
Spain	g/kWh	1777	5132
Switzerland	g/kWh	191	3989
Europe (avg)	g/kWh	2086	5855

*esclusa acqua di raffreddamento.

Fonte: modificato da Hinterberger and Stiller, 1998.

Esso dipende dal mix di combustibili utilizzati per la generazione della stessa e dalla quantità di acqua di raffreddamento utilizzata ed è in genere molto elevato. I fattori di intensità materiale ad essa relativi possono dunque variare in modo notevole.

L'intensità materiale dell'elettricità viene esclusa perciò da ogni categoria di intensità materiale relativa al prodotto finale e computata a parte in modo da poter variare in ogni momento il suo zaino ecologico adattandolo al mix energetico del luogo ove avviene il processo produttivo esaminato.

2.2 Embodied Energy Analysis

Ad ogni voce in ingresso nel sistema viene attribuita per mezzo di opportuni coefficienti reperibili in letteratura (Buwal, 1996; EPA, 1995; Boustead and Hancock, 1979), una certa quantità di petrolio equivalente. In tal modo si ha un'indicazione quantitativa della massa di

petrolio impiegata per ottenere la risorsa in ingresso, sia direttamente che indirettamente, ovvero sotto forma di beni o servizi, che a loro volta hanno richiesto petrolio. Moltiplicando poi la massa di petrolio equivalente per il suo potere calorico convenzionale medio (una sorta di unità di conto, ossia 1 g di oil equivalent= 41860 J) si ottiene il relativo apporto energetico.

2.3 Ecological Footprint

L'impronta ecologica corrispondente ad ogni singola voce è ottenuta dividendo la quantità in kg (o g) del bene considerato per il rispettivo rendimento medio annuale o produttività (Y), espresso in kg/ettaro (o g/ettaro). I valori del rendimento medio annuale per un determinato bene si riferiscono alla sua capacità produttiva per unità di territorio, o alla capacità mediamente posseduta dall'ambiente di assorbimento della CO₂ per unità di superficie. Tali valori sono reperibili in letteratura. Nel presente studio, per alcuni beni, l'impronta ecologica è stata calcolata sia in termini di territorio necessario alla produzione del bene in questione, sia in termini di superficie necessaria all'assorbimento della CO₂ scaturente dai processi produttivi necessari alla realizzazione del bene. I valori dell'impronta ecologica ottenuti per ciascun bene sono sommati per ottenere l'impronta ecologica totale, relativa ai consumi complessivi effettuati dalla città. L'impronta ecologica relativa ad ogni singolo bene, nonché l'impronta ecologica totale vengono calcolate sia in termini assoluti che in termini pro-capite. Il valore pro-capite è ottenuto dividendo il valore dell'impronta ecologica per il numero di abitanti della città.

2.4 Emergia

L'emergia solare totale di una risorsa può essere espressa come:

$$\text{Emergia solare (seJ)} = \text{energia della risorsa (J)} * \text{transformity solare (seJ/J)}$$

L'emergia solare è solitamente misurata in joules di emergia solare (seJ), mentre l'unità di misura per la transformity è joules di emergia solare per joule energetico di prodotto (seJ/J). Gli input a un processo sono misurati usando il loro contenuto in energia libera relativamente all'ambiente (exergia). Quando una data risorsa possiede exergia nulla (ad esempio le risorse che si trovano nello stato di background naturale scelto come riferimento) non è possibile esprimere il suo flusso in termini energetici. Allora esso può essere espresso in termini di massa (g) e moltiplicato per un valore di emergia specifica (seJ/g). Una volta che tutti i tipi di flussi di un sistema siano stati moltiplicati per una adeguata transformity, essi:

- (i) Risultano espressi nella stesse unità (seJ di emergia solare) e possono essere comparati e valutati su una scala comune, così da valutarne il peso (e l'importanza) nell'economia del processo.
- (ii) Sono associati ad un fattore di qualità, che tiene conto della convergenza che si realizza attraverso i livelli gerarchici della biosfera.

Quando un primo gruppo di transformity è disponibile, esse possono venire utilizzate per calcolare le transformity dei prodotti di altri processi, secondo le equazioni:

$$Em = \sum_i Tr_i En_{(i)} \quad i = 1, \dots, n \quad (a)$$

$$Tr_i = Em_i / En_{(i)} \quad i = 1, \dots, n \quad (b)$$

dove Em rappresenta l'emergia totale che alimenta il processo in esame, En_i è l'energia dell'i-esimo input fornito al processo stesso e Tr_i è la sua transformity solare, ottenuta mediante l'equazione (b) relativa al processo i-esimo che fornisce l'input i-esimo. Per spezzare la circolarità di queste equazioni, si pone per definizione uguale a 1 la transformity della

radiazione solare diretta. Transformity più elevate sono di solito associate a tempi di turnover più lunghi, territorio di supporto più largo e maggiore quantità di informazione coinvolta e accumulata. Appare logico associare a queste più elevate transformity una qualità più elevata del flusso o prodotto in esame.

Una trattazione più dettagliata di questi concetti base e dei valori delle transformity dei flussi globali della biosfera è reperibile in una serie di pubblicazioni elaborate dal Center for Environmental Policy della University of Florida, sotto la forma di “folio” (dal No. 1 al No. 5) scaricabili online dal sito www.emergysystems.org.

2.4.1 Algebra emergetica

Per un'accurata analisi emergetica bisogna conoscere le regole di base per poter assegnare correttamente l'emergia ai flussi energetici e di materia. L'insieme di queste regole è stata chiamata Algebra Emergetica (Brown, 1993; Odum, 1996; Giannantoni, 2002). In breve le principali regole di quest'algebra sono:

- 1) Tutta l'emergia fornita a un processo è assegnata al prodotto o ai prodotti del processo.
- 2) Tutti i coprodotti di un processo si vedono assegnata la stessa emergia, che è quella fornita dagli input.
- 3) Quando un flusso si divide, mantenendo costanti le proprie caratteristiche chimico-fisiche, a ciascun flusso risultante viene assegnata una quantità di emergia proporzionale alla exergia su ciascun percorso.
- 4) L'emergia non può essere contata due volte in un sistema:
 - a) l'emergia dei flussi di retroazione non deve essere contata nuovamente come input;
 - b) l'emergia dei coprodotti i cui flussi convergono nuovamente non deve essere sommata.Si conterà solo il più grande tra i flussi convergenti.

Come conseguenza delle regole enunciate, quando il risultato di un processo sono due coprodotti, cioè due prodotti con diversa natura chimico fisica e che non possono essere ottenuti indipendentemente, a ciascuno si attribuisce la stessa emergia (lo stesso costo emergetico), che altro non è se non la quantità che alimenta l'intero processo. Infatti, se non è possibile produrne uno senza produrre anche l'altro, ciascun prodotto richiede la stessa emergia per essere originato, indipendentemente dal fatto che noi si attribuisca maggiore importanza ad uno dei due per ragioni che non hanno nulla a che vedere con la termodinamica. Ciò crea qualche confusione, perché ad un primo esame potrebbe sembrare che al termine del processo ci si trovi con più emergia di quella che è entrata nel sistema, e ciò sembra una violazione della prima legge della termodinamica. In realtà non è così: in nessun caso è consentito sommare i contenuti emergetici dei coprodotti di un processo, perché sarebbe una violazione della regola n. 4, un contare doppio. Ad ogni modo abbiamo già precisato che l'emergia non è energia, per cui è logico attendersi delle proprietà differenti.

Per quanto riguarda il calcolo della transformity di due coprodotti, questa sarà data dal rapporto dell'emergia totale in input e delle rispettive quantità energetiche dei due coprodotti. Quindi anche se l'emergia assegnata ai due coprodotti è la stessa non si avrà uguale transformity (a meno che non si abbia la stessa energia nei due coprodotti).

2.5 Schema del funzionamento del codice di calcolo

Dopo questo excursus sulle metodiche utilizzate è opportuno presentare la struttura del codice di calcolo utilizzato che permette la derivazione progressiva e consequenziale dei vari indicatori ed il loro confronto ragionato.

Il codice di calcolo è realizzato con il software di Excel e, nonostante ciò non sia visibile in formato stampato, le varie celle sono continuamente aggiornabili sulla base di eventuali modifiche al database di riferimento o alle ipotesi effettuate. Il codice di calcolo permette

inoltre di calcolare sia gli indicatori in forma aggregata, sia di isolare i risultati parziali di ciascuna fase.

In **Tabella 2.2** è mostrata la struttura del codice di calcolo il quale può essere letto da sinistra a destra nel seguente modo:

- primo blocco verticale: bilancio di massa input e output al sistema in esame (scala locale);
- secondo blocco verticale: calcolo delle intensità materiali suddivise nelle categorie: abiotico, acqua;
- terzo blocco verticale: calcolo dell'equivalente petrolio e delle emissioni su scala globale (CO₂, CO, NO_x, SO₂, polveri, N₂O) relative al suo utilizzo;
- quarto blocco verticale: calcolo di rendimento medio annuale ed impronta ecologica.
- quinto blocco verticale: calcolo di transformity (o specific emergy) ed emergia totale.

Per quanto attiene i fattori di intensità materiale, energetica, ed emergetica utilizzati nel codice di calcolo questi provengono da collegamenti attivi a database aggiornati ed aggiornabili di librerie di dati. Allo stesso modo gli input e output materiali di processo sono tutti espressi nella stessa unità di misura (grammi) e sono derivati sia da dati di letteratura, che da calcoli stechiometrici riportati nell'APPENDICE A. Per ogni voce è riportata l'origine bibliografica o la procedura per ottenerla. Infine, per rendere più comprensibile il prospetto, a ciascun input e output fa riferimento un numero di indice (prima colonna a sinistra).

Tabella 2.2 Struttura dei codici di calcolo.

I			II			III			IV			V			
#	Flow description	Unit	Mass	MIF	MIF ref	MI	OE _q	OE _q ref	Oil demand	Y	Y ref	Ecological Footprint	SpEm	SpEm ref	Emergy
INPUTS															
1	Input # 1	g	I ₁	MIF ₁	[1]	M ₁ =I ₁ *MIF ₁	OE _q ₁	[1]	E ₁ =I ₁ * OE _q ₁	Y ₁	[1]	EF ₁ = I ₁ /Y ₁	SpEm ₁	[1]	Em ₁ =I ₁ *SpEm ₁
2	Input # 2	g	I ₂	MIF ₂	[2]	M ₂ =I ₂ *MIF ₂	OE _q ₂	[2]	E ₂ =I ₂ * OE _q ₂	Y ₂	[2]	EF ₂ = I ₂ /Y ₂	SpEm ₂	[2]	Em ₂ =I ₂ *SpEm ₂
3	Input # 3	g	I ₃	MIF ₃	[3]	M ₃ =I ₃ *MIF ₃	OE _q ₃	[3]	E ₃ =I ₃ * OE _q ₃	Y ₃	[3]	EF ₃ = I ₃ /Y ₃	SpEm ₃	[3]	Em ₃ =I ₃ *SpEm ₃
...	...	.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
n	Input # n	g	I _n	MIF _n	[n]	M _n =I _n *MIF _n	OE _q _n	[n]	E _n =I _n * OE _q _n	Y _n	[n]	EF _n = I _n /Y _n	SpEm _n	[n]	Em _n =I _n *SpEm _n
TOTAL INPUT			g	Σ _i I _i		Σ _i M _i		Σ _i E _i		Σ _i EF _i		Σ _i Em _i			
OUTPUTS															
1	Output # 1 (main product)	g	O ₁												
2	Output # 2	g	O ₂												
3	Output # 3	g	O ₃												
...	...	g	O _n												
n	Output # n	g	O _n												
TOTAL OUTPUT			g	Σ _i O _i											
I/O ratio			#	(Σ _i I _i)/(Σ _i O _i)											
Footnotes:															
INPUTS															
1	Input # 1														
	Calculation														
	procedure and ref														
n	...														
OUTPUTS															
1	Output # 1														
	Calculation														
	procedure and ref														
n	...														

Legenda:

I= input; O=output; M= material intensity; E= energy; EF = Ecological Footprint; Em= Emergy;

MIF= Material Intensity Factor espresso in g abiotic/water / unit; Oeq = Oil Equivalent factor espresso in g_{oil}/unit;

SpEm = Specific Emergy espressa in seJ/g; Tr = Transformity espressa in seJ/J; Y = Rendimento medio annuale espresso in kg/ha (*o* g/ha).

Capitolo 3

IL COMUNE DI ROMA

3.1 Aspetti generali

Da capitale di un grande impero, con popolazione fino a 1 milione di abitanti, e poi del piccolo Stato della Chiesa (Figura 3.1), infine del Regno d'Italia, Roma è oggi sede istituzionale e politica della Repubblica. E' uno dei principali centri nel mondo per tradizioni e cultura ed è polo turistico internazionale. Quando nel 1870 divenne capitale del Regno, gli abitanti di Roma erano circa duecentomila e la struttura viaria del nucleo medievale era in gran parte rimasta immutata (Figure 3.2 e 3.3). Notevoli interventi si resero necessari per accogliere le attrezzature e gli impianti per l'amministrazione dello Stato. Non mutò soltanto la struttura urbanistica della città, ma anche quella economica e sociale. All'economia nel complesso stagnante della Roma pontificia, si sostituì un'economia strettamente legata all'amministrazione dello Stato, ai grandi centri direzionali degli istituti di credito e in seguito delle imprese statali e parastatali e delle compagnie di assicurazione. Si aggiunse poi il commercio, indispensabile all'approvvigionamento dell'aumentata e più esigente popolazione, e il turismo. Dopo la seconda guerra mondiale i ritmi di crescita aumentarono ancora, a causa della forte immigrazione dalle regioni meridionali. Ancora oggi la struttura economica della città è caratterizzata da una prevalenza del settore terziario (Figura 3.4). Inoltre alla sua funzione di centro politico e istituzionale, ma anche amministrativo, Roma aggiunge quella di centro artistico-religioso, con ricadute turistiche di tutto rispetto. Per quanto riguarda il settore industriale, esso, dopo il boom edilizio e a partire dagli anni ottanta del secolo scorso, è stato interessato da profondi mutamenti. Si è assistito infatti al proliferare di piccole e piccolissime imprese che operano in settori di punta (dall'informatica, alle telecomunicazioni, alle biotecnologie), fondate sulla ricerca e integrate nei circuiti sia nazionali che internazionali. La presenza di questa attività di tipo innovativo, ha inoltre rafforzato il terziario di recente generazione. Allo sviluppo industriale si è accompagnato una sorta di "risveglio" della potenzialità della città in senso moderno, con immediata ricaduta territoriale. Il polo romano influenza l'intero territorio provinciale, al quale è unito da legami di interdipendenza socio-economica. All'interno di questo sistema si possono individuare una trentina all'incirca di Comuni della prima cintura, i quali presentano maggiori flussi di pendolarità e nello stesso tempo sono funzionali con Roma. Ad essi poi se ne aggiungono un'altra trentina, di seconda cintura. Nel processo di modernizzazione della città e di integrazione del centro con il suo hinterland, molto si è fatto circa le vie di comunicazione. In particolare il grande raccordo anulare e le bretelle autostradali.

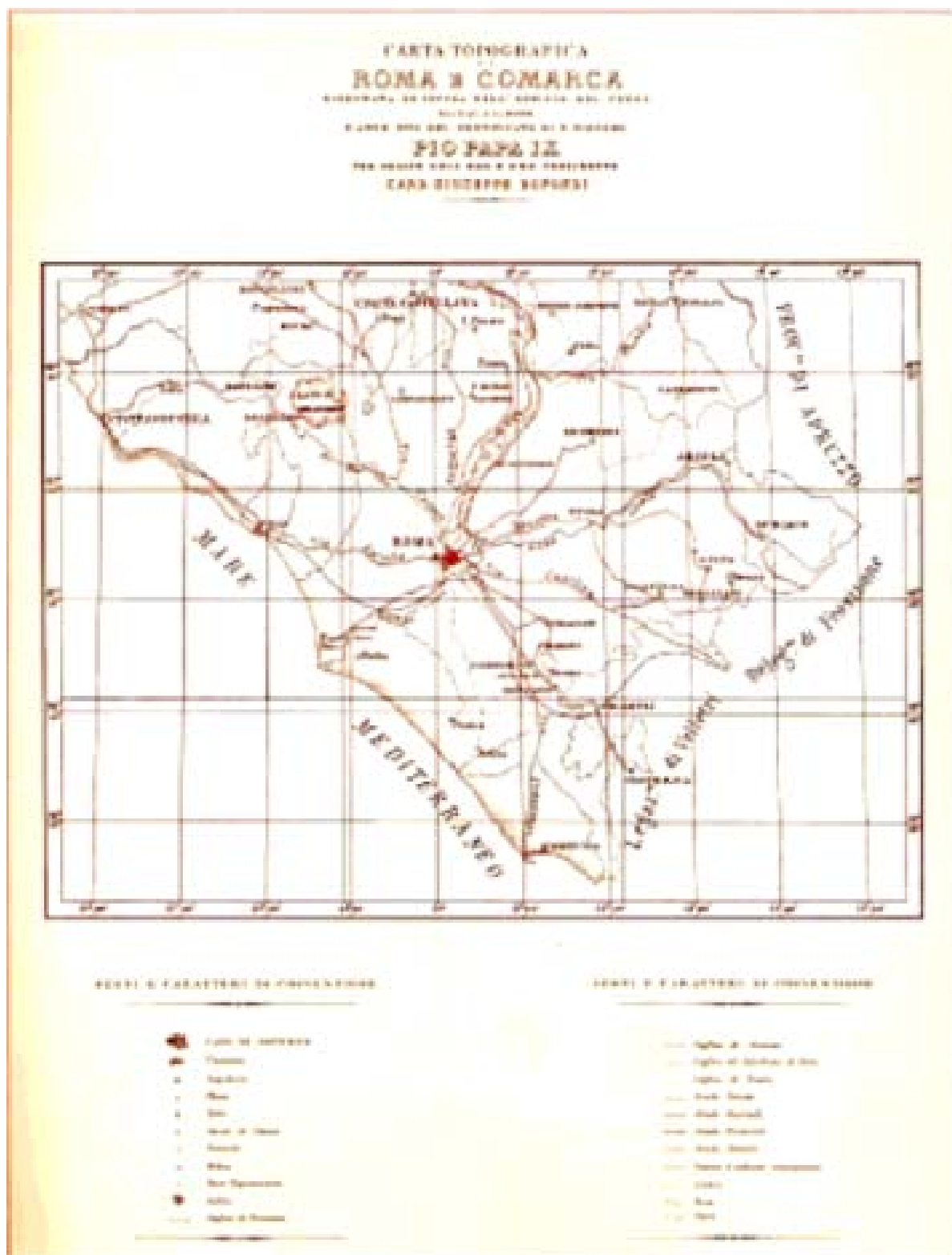


Figura 3.1

Roma e Comarca – Frontespizio e quadro d'unione dell'atlante contenente, in otto fogli, la CARTA TOPOGRAFICA DI ROMA E COMARCA disegnata ed incisa nell'*Ufficio del Censo*, in Roma, nel 1863. (Da: Roma Popolazione e Territorio dal 1860 al 1960, Comune di Roma, Ufficio di Statistica e Censimento).

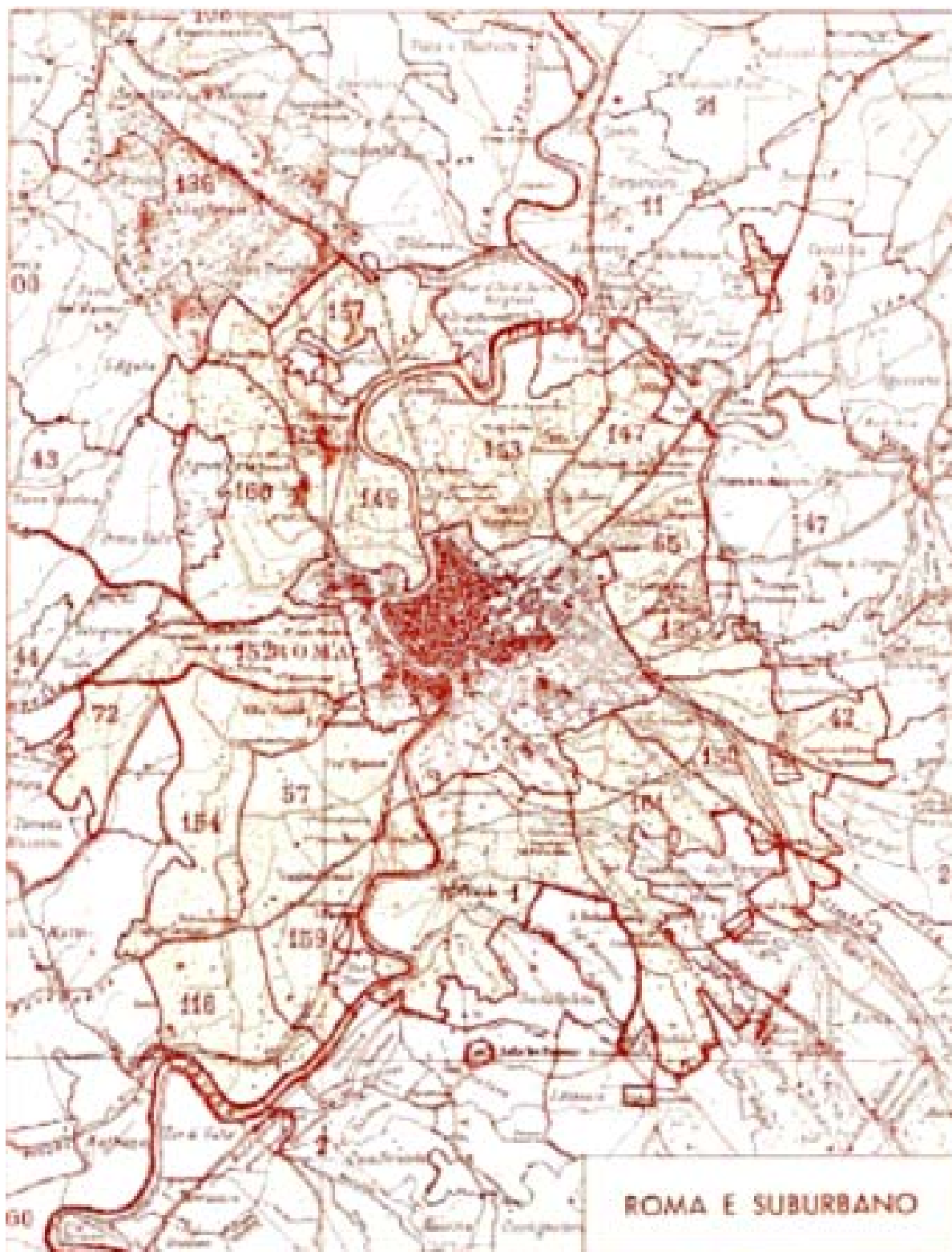


Figura 3.2

Roma e Suburbano – Territorio dei Rioni e territorio Suburbano al 1871.

Dalla ristampa della CARTA TOPOGRAFICA DI ROMA E COMARCA (*Ufficio del Censo*, Roma, 1863) eseguita, con aggiornamenti al 1878, nella Regia Calcografia di Roma.

(Da: Roma Popolazione e Territorio dal 1860 al 1960, Comune di Roma, Ufficio di Statistica e Censimento).



Figura 3.3

Planimetria dei Rioni nel 1878 - Dalla ristampa della CARTA TOPOGRAFICA DI ROMA E COMARCA (*Ufficio del Censo*, Roma, 1863) eseguita, con aggiornamenti al 1878, nella Regia Calcografia di Roma.
(Da: Roma Popolazione e Territorio dal 1860 al 1960, Comune di Roma, Ufficio di Statistica e Censimento).

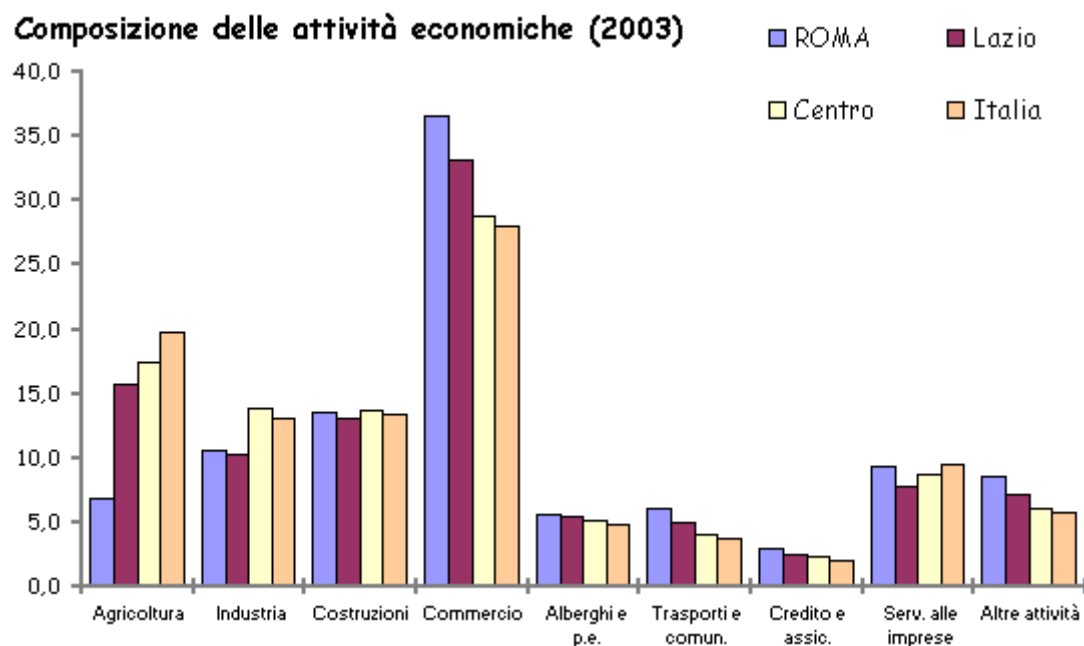
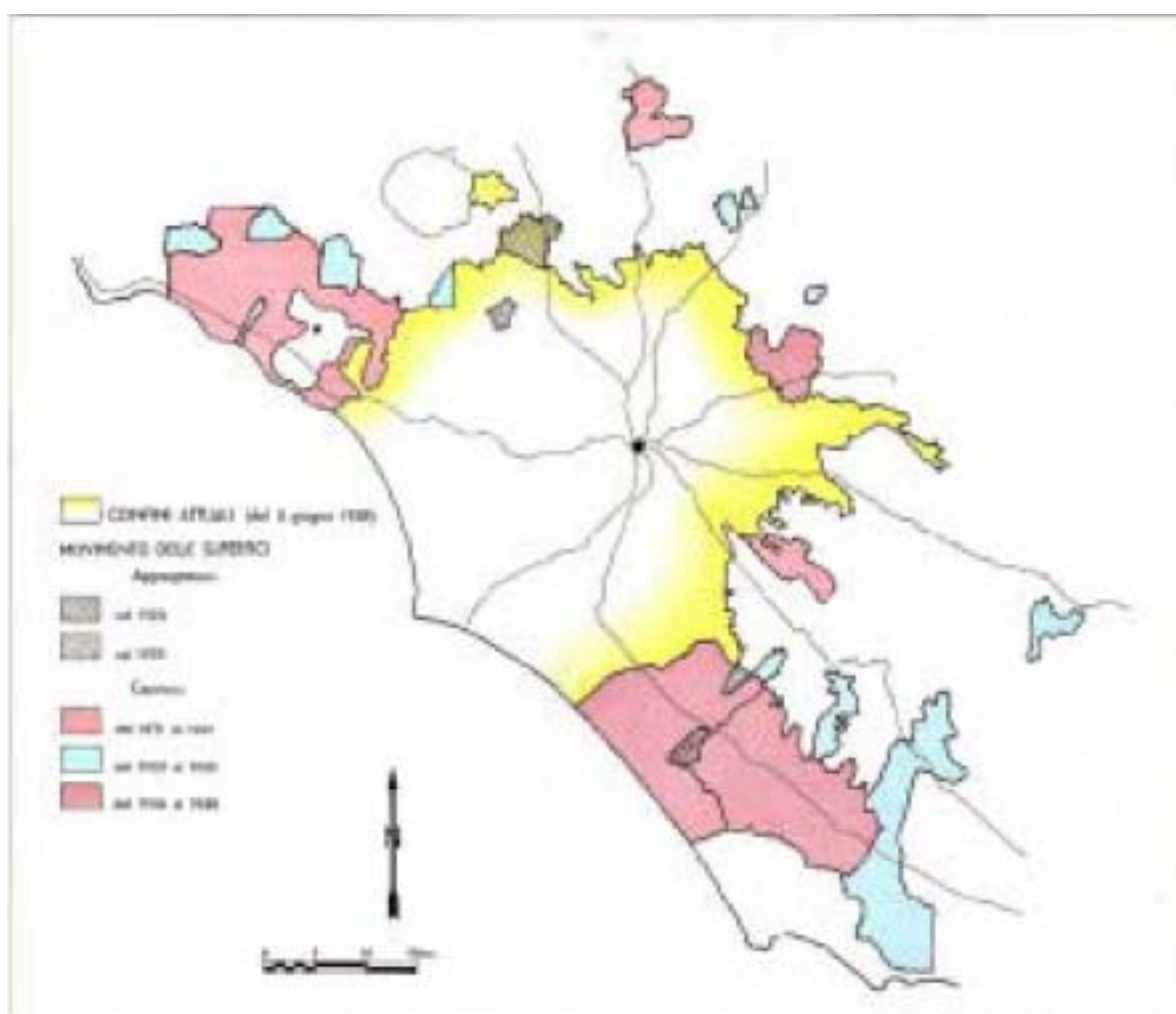


Figura 3.4

Composizione delle attività economiche in Roma nel 2003, e confronto con l'Italia, il Lazio ed il Centro Italia. (Da: Lo scenario economico provinciale, 2004, CCIAA, Roma).

3.2 Organizzazione territoriale

Da quando divenne capitale del Regno d'Italia nel 1870 fino ai giorni nostri, in termini amministrativi il Comune di Roma ha mutato i suoi confini più volte (Figura 3.5). I confini assunti nel 1938 sono poi rimasti immutati fino al 1991, dopodiché al Comune fu attribuita la delimitazione che tuttora lo caratterizza. Roma presenta 129 mila ettari di estensione territoriale che ne fanno il Comune più grande d'Europa. Un territorio comunale così vasto viene ad essere caratterizzato da un'enorme complessità che trova non poche difficoltà nella gestione e nell'organizzazione dei differenti ambiti territoriali di cui è costituito. Al fine di fronteggiare tali problematiche esso fu negli anni settanta suddiviso in 20 aree di differente gestione (gli odierni Municipi) divenuti successivamente 19 poiché uno di essi (il Municipio 14) fu assorbito dal Comune di Fiumicino, nel 1991. Attualmente il Comune di Roma risulta essere estremamente eterogeneo (Figura 3.6). Esso è caratterizzato dalla Città Storica (circa 7 mila ettari) che include in se anche zone come l'EUR ad esempio, precedentemente ritenute non centrali ma che oramai godono di un riconosciuto valore storico, e dalla Città Consolidata (circa 20 mila ettari), prevalentemente di tipo residenziale. All'interno del territorio comunale sono presenti ben 41 mila ettari di aree naturali protette, tra di loro anche abbastanza differenziate. Altri 41 mila ettari circa sono destinati ad uso agricolo. La fascia costiera, passata da circa 42 km a circa 20 km dopo l'assorbimento del Municipio 14 al Comune di Fiumicino, si estende a partire dal delta del Tevere procedendo per il litorale di Ostia ad alta densità abitativa e continua verso sud-est inserendosi in un'area naturale protetta che presenta invece una bassa densità insediativa (Figure 3.6 e 3.7). Grande rilevanza in tale contesto viene ad assumere la presenza della foce del Tevere su un litorale così eterogeneo e dall'uso così differenziato (portuale, balneare, di tutela e non balneabilità, ecc). Da ciò si intuisce che l'impatto ambientale finisce con l'assumere differenti sfaccettature a seconda del tratto di costa considerato.



2 - I CONFINI DEL TERRITORIO COMUNALE

Variazioni dal 1871

SUPERFICIE AI CENSIMENTI GENERALI DELLA POPOLAZIONE

CENSIMENTI	SUPERFICIE (ha)	CENSIMENTI	SUPERFICIE (ha)
I Censimento (31 dicembre 1871)	213.687,97	VI Censimento (1° dicembre 1921)	207.462,00
II Censimento (31 dicembre 1901)	213.687,97	VII Censimento (21 aprile 1931)	196.482,00
IV Censimento (10 febbraio 1901)	212.612,47	VIII Censimento (21 aprile 1936)	186.198,00
V Censimento (10 giugno 1911)	387.463,88	IX Censimento (4 novembre 1951)	152.763,54

Figura 3.5

Variazione dei confini Comunali di Roma dal 1871 al 1951.

(Da: Roma Popolazione e Territorio dal 1860 al 1960, Comune di Roma, Ufficio di Statistica e Censimento).

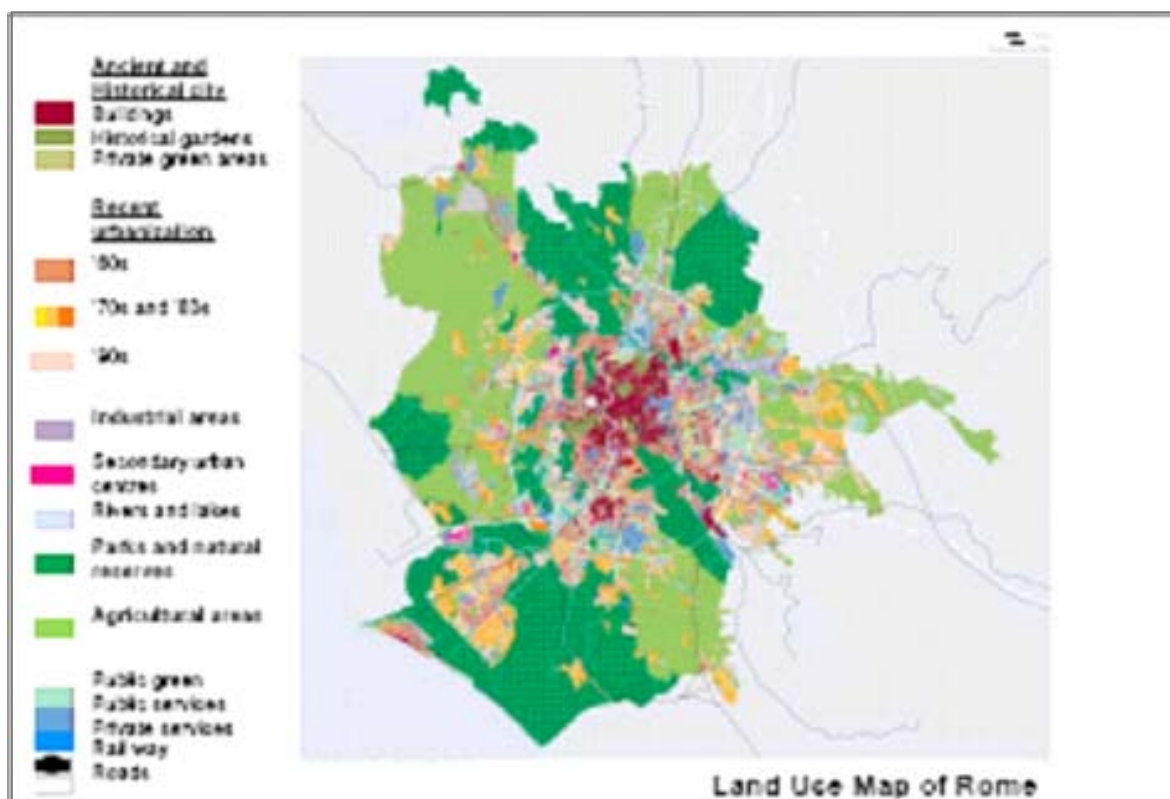


Figura 3.6

Mappa d'uso del territorio del Comune di Roma, 2002 (modificata).

(Da: Nuovo Piano Regolatore di Roma, 2002, Dipartimento VI, Politiche della Programmazione e Pianificazione del Territorio, Roma Capitale, Comune di Roma).

3.3 Vie di comunicazione

Per quanto riguarda le vie di comunicazione, vi sono le linee della Metropolitana che hanno un'estensione di circa 37 km con 49 stazioni. Sebbene Roma sia una città afflitta da gravi problemi di traffico su gomma, attualmente il ruolo delle metropolitane sembra essere fondamentale. Esse risultano essere grandi collettori del trasporto pubblico di massa, grazie alla decisa estensione della rete nei settori semicentrali, suburbani e in corrispondenza delle nuove centralità, dove l'alto numero di passeggeri sia nelle stazioni di origine che di destinazione, rende conveniente in termini di costi-benefici tale modalità di trasporto. Le linee tranviarie invece (50 km) servono prevalentemente l'area centrale.

La rete viaria a Roma, di 5500 km (autostrade escluse), equivalenti a 66 milioni di metri quadrati di strade, è oggi ancora abbastanza deficitaria. Da un lato, la necessità di un completamento della rete portante dovuta ad esigenze di trasporto di una città ancora molto "scucita", e dall'altro la difficoltà di conciliare tali esigenze con oggettive incompatibilità di carattere sociale e ambientale, ma soprattutto con un territorio dalla specificità storico-paesaggistica unica, rendono il problema dei trasporti di non facile risoluzione, soprattutto alla luce di una tendenza a prediligere il trasporto pubblico, ancora troppo poco sviluppata.

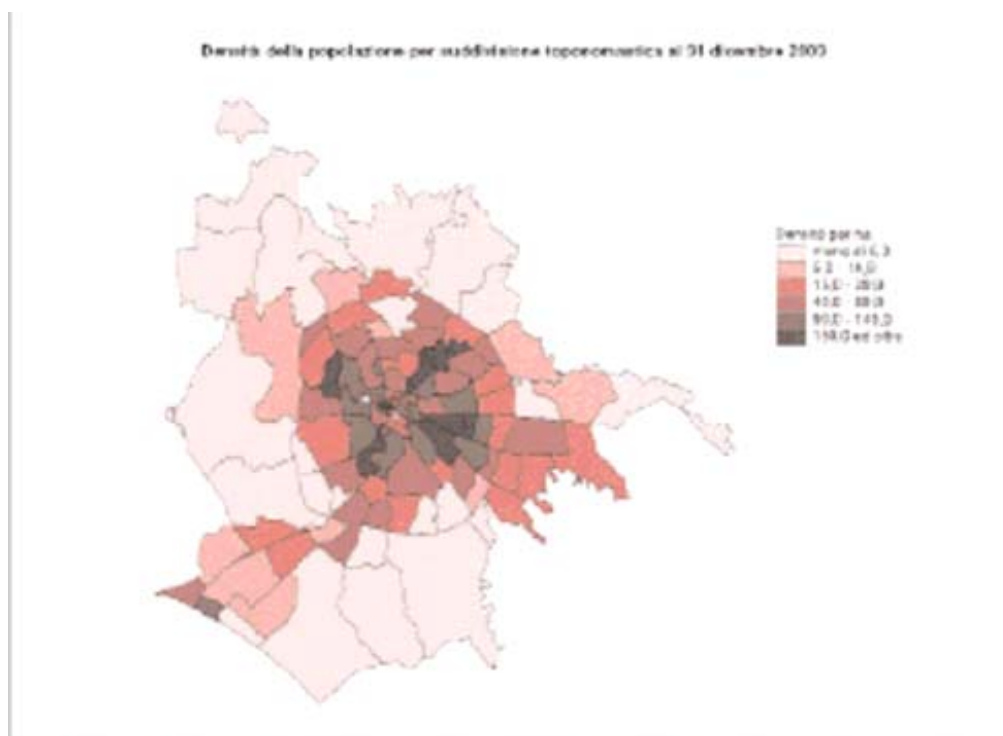


Figura 3.7

Distribuzione della densità di popolazione nel Comune di Roma.

(Da: Annuario Statistico del Comune di Roma, 2003, Comune di Roma, www.comune.roma.it)

3.4 Periferie

Roma, dal punto di vista della costruzione della periferia, è una città “relativamente giovane”. Buona parte delle attuali periferie (che in complesso coprono circa 15600 ettari di territorio comunale) sorgono come frutto di circa tre ondate di abusivismo edilizio perpetuatesi a cavallo tra gli anni sessanta e gli anni novanta, divenute legali in seguito a diverse politiche di condono realizzate dalle varie amministrazioni. In esse sono ancora presenti diversi quartieri-dormitorio o le cosiddette “terre di nessuno”, luoghi come è noto, di degrado e di esclusione (Figura 3.8). Tuttavia Roma a differenza di molte altre grandi città italiane, non essendo una città industriale, nelle zone periferiche non presenta una situazione di “aree dismesse” dalle quali partire per rilevanti processi di riconversione funzionale. Dunque se da un lato ciò potenzialmente consente tipologie di intervento, per la riqualificazione, più piccole e veloci, dall’altro non è possibile aspettarsi demolizioni e ricostruzioni di ampie dimensioni tali da configurare veri e propri programmi di ristrutturazione e sostituzione urbanistica di parti della città. In questo scenario, al momento, grava un tipo di politica non ancora sufficientemente orientata ad un decentramento capace di investire i vari Municipi di maggiori competenze e di un ruolo più attivo ed indipendente. Il comune di Roma presenta il vantaggio di essere un comune particolarmente policentrico. L’analisi minuziosa della città di Roma, fatta a motivo della stesura del nuovo piano regolatore, di recente adozione (Comune di Roma, 2003), ha condotto all’identificazione di circa 200 microcittà, ovvero una grande ricchezza di luoghi urbani nei quali le persone si riconoscono e con piacere si incontrano. Dunque in questo

contesto un processo di decentramento, con una decisa presenza pubblica a livello locale, che raccolga i problemi quotidiani dei cittadini che vivono e lavorano nella zona, troverebbe ulteriore ragion d'essere: esso costituirebbe quasi un passaggio "naturale" per quelle zone che sentono e vivono la propria micro-centralità oramai già da tempo. In quest'ottica le azioni di recupero e di riqualificazione delle periferie potrebbero acquistare nuove energie, ed anche un senso maggiore. Va tuttavia sottolineato che in tale direzione le amministrazioni locali sembrano ultimamente volersi muovere, almeno stando a quanto emerge dalle più recenti programmazione territoriali.

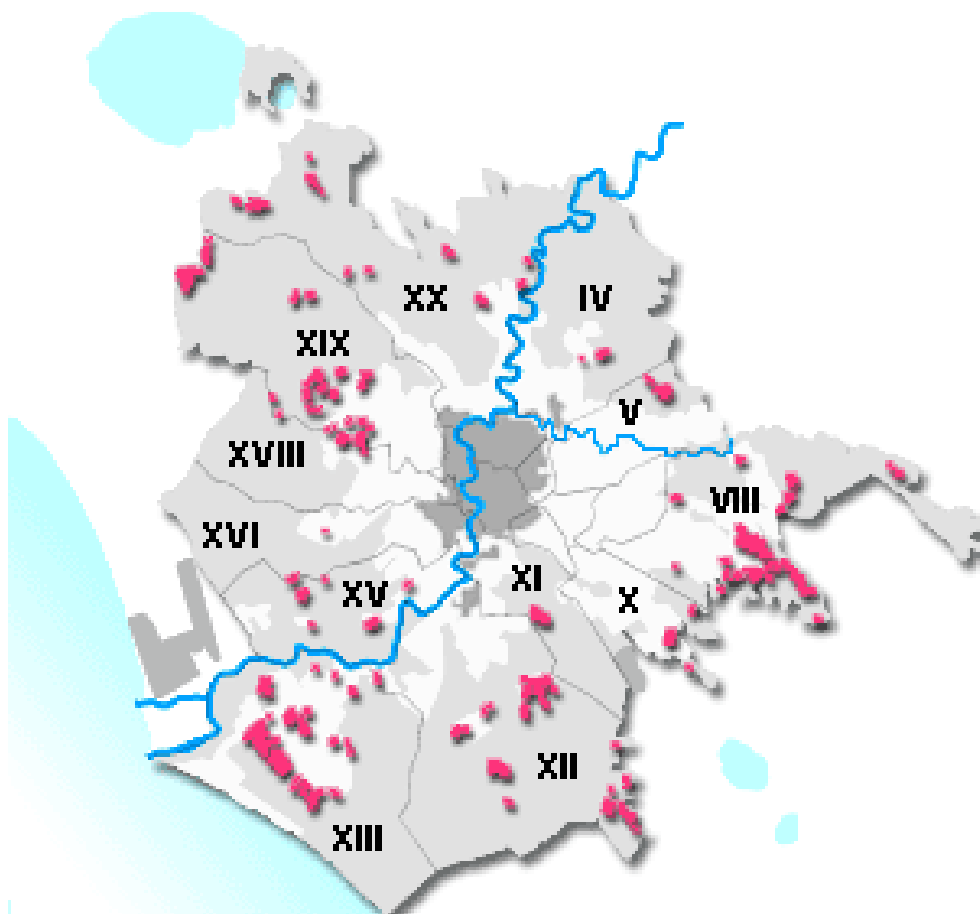


Figura 3.8

Mappa stilizzata del Comune di Roma. Le aree in rosso rappresentano le periferie più svantaggiate, le così dette zone *non perimetrated*. (Da: Dipartimento VI, Politiche della Programmazione e Pianificazione del Territorio, Roma Capitale, Comune di Roma).

3.5 Il dimensionamento

Roma da almeno un paio di decenni, non presenta una crescita della popolazione (Figure 3.9 e 3.10). Né al momento sono stati evidenziati nuovi elementi che facciano pensare ad un cambio di tendenza. Fenomeno migratorio di cittadini extracomunitari, a parte, naturalmente. Questo non significa che alla popolazione stabile corrisponda una “offerta residenziale zero”. Al decremento della popolazione, che pur c'è stato, corrisponde infatti un certo aumento del numero delle famiglie. Inoltre esiste una dinamica interna alla popolazione residente, che domanda nuovo spazio per migliorare le proprie condizioni abitative, o per adeguarlo alle esigenze e alle dimensioni dei nuovi nuclei familiari. Al tempo stesso, esistono nuove tipologie di domanda provenienti anche dalle persone che non risiedono stabilmente a Roma, ma che qui lavorano periodicamente. Si tratta di tipologie che esprimono la sempre maggiore complessità dei rapporti di lavoro e delle relazioni fra le città.

La dimensione molto consistente del Comune di Roma è un elemento del tutto specifico, al tempo stesso positivo e negativo. Positivo perché una dimensione di tutto rispetto consente di sviluppare un'eccezionale politica degli spazi liberi, dal momento che, malgrado la devastazione causata dal fenomeno dell'abusivismo, grandi parti dell'Agro romano sono ancora integre e costituiscono una notevole risorsa di valore storico, ambientale e paesaggistico. Negativo perché entro questi spazi in precedenza sono state previste possibilità di trasformazioni urbanistiche dalle dimensioni e localizzazione, che oggi, senza tema di smentita, come minimo sono da considerarsi non più coerenti con una seria politica di tutela e valorizzazione ambientale e con le reali dinamiche economiche e sociali.

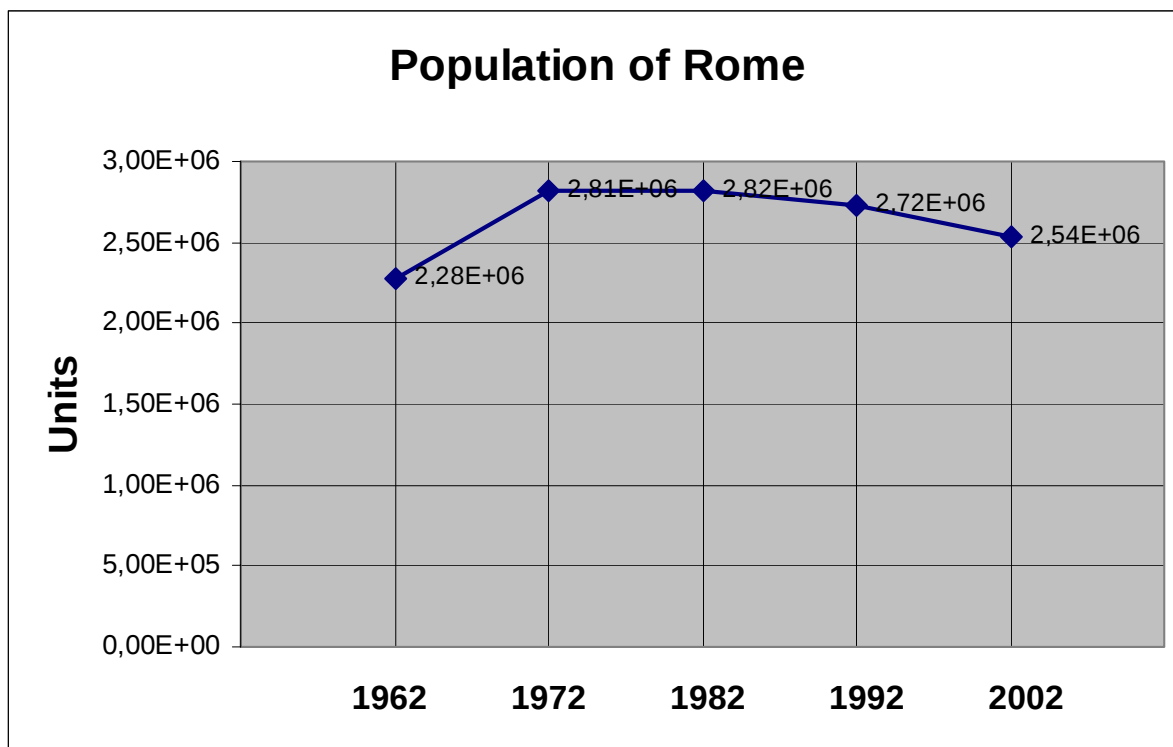


Figura 3.9

Variazione della popolazione residente nel Comune di Roma dal 1962 al 2002.

(Da: Presente lavoro di Dottorato).

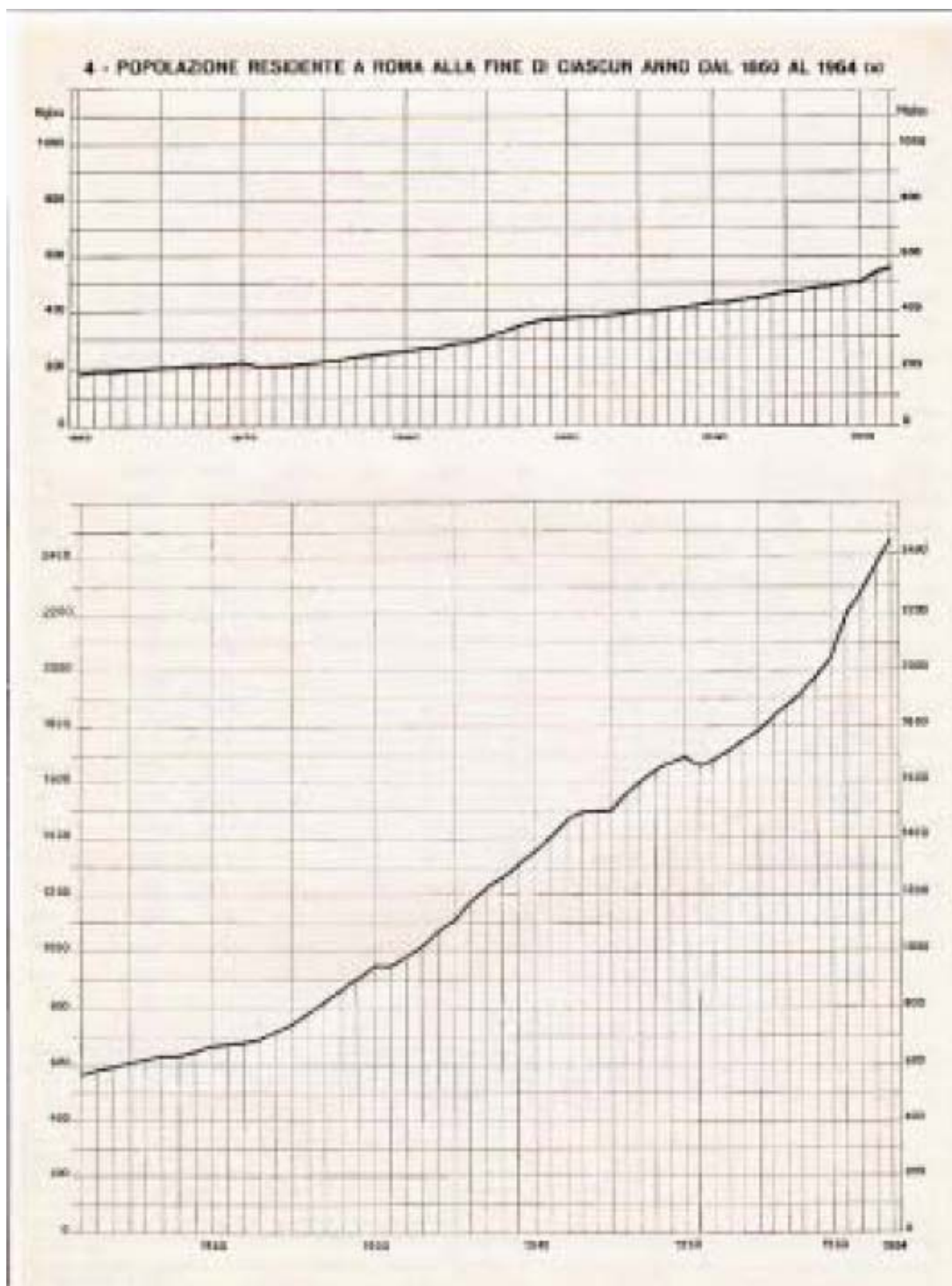


Figura 3.10

Variazione della popolazione residente nel Comune di Roma dal 1860 al 1964.

(Da: Annuario Statistico della Città di Roma 1964, Comune di Roma, Ufficio di Statistica e Censimento).

Capitolo 4

FLUSSI DI MASSA E DI ENERGIA

4.1 Inventario dei Flussi di Massa e di Energia su scala locale e globale.

Nelle Tabelle 4.1 e 4.2 è mostrato un inventario dei flussi di ingresso di massa e di energia del sistema urbano di Roma. Tali flussi sono quantificati sia sulla scala locale che su quella globale. In Tabella 4.1 è calcolata su scala globale la domanda di materia abiotica e di acqua. La domanda di energia su scala globale è calcolata nella Tabella 4.2, in termini di quantità di petrolio equivalente e di quantità di energia effettiva. La Tabella 4.2 calcola anche l'energia equivalente "incorporata" nei flussi di materia non energica, oltre a quella delle fonti energetiche vere e proprie. I fattori di intensità materiale ed i fattori di intensità energetica utilizzati sono elencati rispettivamente, nelle Tabelle 4.3 e 4.4. Le note a piè di pagina delle Tabelle 4.1 e 4.2 indicano la fonte e l'anno di riferimento dei dati. La raccolta dei dati a livello della scala locale di una città non è mai un cosa agevole, poiché gli uffici statistici delle amministrazioni nazionali e regionali, molto raramente pubblicano dati disaggregati a un tale livello. Tuttavia, a causa del fatto che Roma è la Capitale d'Italia e per il fatto che essa, in termini di estensione territoriale, è la città italiana più grande, la maggior parte dei dati sono stati trovati negli Uffici di Amministrazione del Comune di Roma in forma di relazioni annuali delle attività. I dati sono stati raccolti anche presso altri uffici, quali l'ISTAT, l'ENEA, dipartimenti di polizia, uffici fiscali di pagamento, uffici ambientali di Roma, associazioni culturali e ambientali, Camera di Commercio, associazioni professionali e le tre Università di Roma. I riferimenti a queste fonti di dati sono riportati nelle note a piè di pagina delle Tabelle. I dati raccolti da diverse fonti consentono un duplice controllo di assunzioni incerte, e di congetture costruite per stimare dati non altrimenti disponibili.

I dati in input sono inseriti nelle Tabelle 4.1 e 4.2 espressi in joule o in grammi. Quando sono stati trovati in unità di misura differenti sono stati utilizzati fattori di conversione medi, indicati nelle note a piè di pagina, per convertirli in unità che rendano possibile il confronto. I flussi di materia e di energia in ingresso sono stati poi moltiplicati per opportuni fattori di Intensità Materiale (MI_{ab} , $g_{ab}/unità$; MI_{water} , $g_w/unità$) e per fattori di Embodied Energy (equivalenti di petrolio; $g_{oil} / unità$; $J / unità$), al fine di convertire tutti gli ingressi in flussi di materia e di energia. Le voci fortemente aggregate (come ad esempio i prodotti alimentari) vengono moltiplicate per i fattori di intensità media disponibili in letteratura. Infine, sono stati calcolati le richieste totali di materia e di energia da parte del sistema, e una serie di indicatori di performance basati su tali flussi.

Table 4.1. Mass balance of the city of Rome (year 2002)					
	Mass balance			MFA - Material Flow Accounting	
#	Description of flow	Units	Mass (local scale)	Mass abiotic g	Mass water g

Nonrenewable Input (locally available)

7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	4,67E+11	1,23E+11
---	---------------------------------	------	----------	----------	----------

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	1,33E+12	1,82E+12	1,29E+13
9	Diesel fuel	g/yr	1,63E+12	2,22E+12	1,58E+13
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,92E+11	2,62E+11	1,87E+12
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	1,27E+11	1,82E+11	1,32E+12
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	8,69E+10	1,06E+11	4,35E+10
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	3,52E+11	4,30E+11	1,76E+11
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	5,25E+11	6,40E+11	2,62E+11
13	Electricity	J/yr	2,91E+16	1,28E+13	5,16E+14
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,28E+14	0,00E+00	3,28E+14
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,80E+10	2,33E+10	0,00E+00
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,83E+10	1,14E+12	3,64E+13
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,43E+11	3,40E+11	0,00E+00
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,49E+11	9,85E+11	7,96E+13
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	1,33E+11	3,31E+11	7,08E+12
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,83E+10	0,00E+00	3,83E+10
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	1,95E+10	2,73E+11	4,35E+11
16	Steel and iron	g/yr	2,48E+12	2,72E+13	3,36E+14
17	Copper	g/yr	4,98E+10	8,92E+12	1,18E+13
18	Aluminium	g/yr	6,71E+10	1,27E+12	3,62E+13
19	Cement (Portland)	g/yr	1,97E+12	6,36E+12	3,34E+13
20	Rocks and Sediments	g/yr	1,62E+13	3,42E+13	1,29E+14
21	Glass	g/yr	2,35E+11	6,93E+11	2,73E+12
22	Plastics	g/yr	5,60E+11	2,75E+12	1,51E+14
23	Asphalt	g/yr	1,46E+11	1,99E+11	1,42E+12
24	Chemicals	g/yr	1,52E+12	6,26E+12	1,85E+14
25	Wood	g/yr	5,94E+11	8,26E+11	1,30E+13
26	Textiles	g/yr	5,13E+10	4,28E+11	1,02E+14
27	Paper and derivatives	g/yr	4,88E+11	1,64E+12	6,05E+13
28	Fertilizers	g/yr	2,69E+11	1,62E+12	1,04E+13

Output

Total Material Flow				1,14E+14	2,07E+15
Economic product (GDP)	€/yr	5,75E+10			
Material Intensity Factors of GDP of Rome	g/€			1989,36	36061,69
People supported	Units/yr	2,54E+06			
Material Intensity Factors of people of Rome	g/person			4,50E+07	8,16E+08

Table 4.2. Energy Analysis of the city of Rome (year 2002)

#	Flow	units	raw amount	Oil equiv. demand (g oil eq)	Energy demand (J)
Imported Input					
8	Gasoline	g/yr	1,33E+12	2,00E+12	8,38E+16
9	Diesel fuel	g/yr	1,63E+12	2,09E+12	8,75E+16
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,92E+11	2,71E+11	1,14E+16
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	1,27E+11	1,57E+11	6,55E+15
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	8,69E+10	1,00E+11	4,19E+15
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	3,52E+11	4,05E+11	1,70E+16
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	5,25E+11	6,03E+11	2,53E+16
13	Electricity	J/yr	2,91E+16	1,74E+12	7,28E+16
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,28E+14	4,31E+10	1,80E+15
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,80E+10	1,66E+10	6,94E+14
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,83E+10	6,69E+10	2,80E+15
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,43E+11	1,54E+10	6,45E+14
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,49E+11	3,43E+10	1,43E+15
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	1,33E+11	1,85E+10	7,73E+14
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,83E+10	1,92E+09	8,03E+13
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	1,95E+10	2,60E+08	1,09E+13
16	Steel and iron	g/yr	2,48E+12	1,70E+12	7,12E+16
17	Copper	g/yr	4,98E+10	1,10E+11	4,61E+15
18	Aluminium	g/yr	6,71E+10	4,56E+11	1,91E+16
19	Cement (Portland)	g/yr	1,97E+12	3,30E+11	1,38E+16
20	Rocks and Sediments	g/yr	1,62E+13	3,39E+10	1,42E+15
21	Glass	g/yr	2,35E+11	1,49E+11	6,23E+15
22	Plastics	g/yr	5,60E+11	1,26E+12	5,27E+16
23	Asphalt	g/yr	1,46E+11	5,66E+11	2,37E+16
24	Chemicals	g/yr	1,52E+12	3,41E+12	1,43E+17
25	Wood	g/yr	5,94E+11	7,10E+10	2,97E+15
26	Textiles	g/yr	5,13E+10	2,59E+11	1,08E+16
27	Paper and derivatives	g/yr	4,88E+11	4,37E+11	1,83E+16
28	Fertilizers	g/yr	2,69E+11	2,05E+11	8,60E+15
Output					
	Total energy Flow			1,65E+13	6,93E+17
	Economic product (GDP)	€/yr	5,75E+10		
	Energy Intensity Factors of GDP of Rome			287,9371	12053047
	People supported	Units/yr	2540829		
	Energy Intensity Factors of people of Rome			6,51E+06	2,73E+11

Table 4.3. Material Intensity factors per unit of product

Item	Abiotic	Water	unit	Reference
Top soil (erosion, processing, etc)	0.76	0.20	g/g	Odum 1996
Gasoline	1.36	9.70	g/g	www.wuppertal.de
Diesel fuel	1.36	9.70	g/g	www.wuppertal.de
LPG (Liquid Petroleum Gas)	1.36	9.70	g/g	www.wuppertal.de
Heavy oil for domestic heating	1.43	10.40	g/g	www.wuppertal.de
Natural gas				
<i>Domestic use for cooking</i>	1.22	0.50	g/g	www.wuppertal.de
<i>Domestic use for heating</i>	1.22	0.50	g/g	www.wuppertal.de
<i>Other uses</i>	1.22	0.50	g/g	www.wuppertal.de
Electricity	4.39E-04	1.77E-02	g/J	www.wuppertal.de
Water (from aqueduct)		1.00	g/g	By definition
Main Food Items				
				Abiotic: from Wuppertal paper 114, 2001, Nickel et al.
<i>Fish</i>	1.30		g/g	p. 36
				Abiotic: from Wuppertal paper 114, 2001, Nickel et al.
<i>Meat</i>	16.70	533	g/g	p. 36. Water: Our calculation
				Abiotic: from Wuppertal paper 114, 2001, Nickel et al.
<i>Fruits and Vegetables</i>	1.40	950	g/g	p. 36. Water: our calculation.
				Abiotic: from Wuppertal paper 114, 2001 Nickel et al.
<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	6.60	533	g/g	p. 36. Water: Our calculation.
				Abiotic: from Wuppertal paper 114, 2001, Nickel et al.
<i>Cereals and derivatives</i>	2.49	950	g/g	p. 36. Water: our calculation.
<i>Wine and alcoholics</i>		1.00	g/g	Water: our assumption
<i>Olive and seed oils</i>	14.03	22.34	g/g	Our calculation
Steel and iron	10.97	135.85	g/g	www.wuppertal.de
Copper	179.07	236.39	g/g	www.wuppertal.de
Aluminium	18.98	539.20	g/g	www.wuppertal.de
Cement (Portland)	3.22	16.90	g/g	www.wuppertal.de
Rocks and Sediments	2,11	7,95	g/g	www.wuppertal.de
Glass	2.95	11.60	g/g	www.wuppertal.de
Plastics	4.90	269.50	g/g	www.wuppertal.de
Asphalt	1.36	9.70	g/g	www.wuppertal.de
Chemicals	4.13	122.03	g/g	www.wuppertal.de
Wood	1.39	21.80	g/g	www.wuppertal.de
Textiles	8.35	1987.75	g/g	www.wuppertal.de
Paper and derivatives	3.36	124.04	g/g	www.wuppertal.de
Fertilizers	6.02	38.77	g/g	www.wuppertal.de

Table 4.4. Energy intensity factors (grams of oil equivalent/unit of item)			
Item	Value	unit	Reference
Gasoline	1.50	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Diesel fuel	1.28	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
LPG (Liquid Petroleum Gas)	1.41	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Heavy oil for domestic heating	1.23	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Natural gas			
<i>Domestic use for cooking</i>	1.15	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Smil (1991), Bargigli et al., 2004
<i>Domestic use for heating</i>	1.15	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Smil (1991), Bargigli et al., 2004
<i>Other uses</i>	1.15	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Smil (1991), Bargigli et al., 2004
Electricity	59.7	g _{oil} /MJ	Brown and Ulgiati, 2002
Water (from aqueduct)	0.13	g _{oil} /kg	Smil, 1991
Main Food Items			
<i>Fish</i>	0.92	g _{oil} /g	Russo et al., 2004
<i>Meat</i>	0.98	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
<i>Fruits and Vegetables</i>	0.06	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	0.23	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
<i>Cereals and derivatives</i>	0.14	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
<i>Wine and alcoholics</i>	0.01	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
<i>Olive and seed oils</i>	0.05	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989
Steel and iron	0.69	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Copper	2.21	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Aluminium	6.80	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Cement (Portland)	0.17	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Rocks and Sediments	0.0020903	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Glass	0.63	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Plastics	2.25	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Asphalt	3.87	g _{oil} /g	Our calculation, based on nafta value: from Boustead and Hancock, 1979, pag 347
Chemicals	2.25	g _{oil} /g	Assumed equal to plastics; conservative estimate
Wood	0.12	g _{oil} /g	Smil (1991)
Textiles	5.05	g _{oil} /g	Nieminen et al., 2007
Paper and derivatives	0.90	g _{oil} /g	Our calculation after Boustead & Hancock (1979), Jarach (1985) and Smil (1991)
Fertilizers	0.76	g _{oil} /g	Biondi et al., 1989

La Tabella 4.5 mostra le principali emissioni su scala locale dovute alla combustione dei carburanti utilizzati per il trasporto, in piccoli processi industriali e agricoli e per il riscaldamento delle case e degli uffici. Essi sono stati calcolati dai dati relativi al consumo di energia, dalle banche dati disponibili sui fattori di emissione e da valutazioni stechiometriche. I fattori di emissione utilizzati sono riportati nella Tabella 4.6. Alcuni di essi sono ottenuti da banche dati pubbliche o commercialmente disponibili (Corinair, EPA, Simapro5, ecc), altri sono stati desunti dalla letteratura scientifica o calcolati sulla base di assunzioni sulle efficienze di reazione.

Naturalmente le emissioni dovute alla produzione dell'energia elettrica utilizzata non sono incluse nel conteggio delle emissioni locali, poiché all'interno della città non ci sono centrali elettriche. Analogamente, la Tabella 4.7 mostra le emissioni delle principali specie chimiche su larga scala, calcolate sulla base degli usi diretti e indiretti di energia legato alla voce di consumo di ciascun bene fornito alla città. I valori calcolati comprendono anche le emissioni generate localmente (ovvero le emissioni di Tabella 4.5) e quelle generate al di fuori della città durante tutto il ciclo di vita dei materiali e dell'energia. Anche in questo caso i fattori di emissione sono quelli indicati in Tabella 4.6.

Table 4.5. Local emissions from fossil fuel use in the city of Rome (year 2002)

#	Flow	Energy (J)	Local CO ₂ (g CO ₂)	Local CO (g H ₂ O)	Local NO ₂ (g NO ₂)	Local SO ₂ (g SO ₂)	Local Part. (g part)	Local N ₂ O (g N ₂ O)
---	------	---------------	--	-------------------------------------	--	--	----------------------------	---

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	5,87E+16	3,98E+12	6,69E+10	3,70E+10	2,70E+08	4,35E+08	1,12E+08
9	Diesel fuel	7,02E+16	5,35E+12	1,19E+09	1,40E+09	4,57E+08	2,32E+08	2,60E+07
	LPG (Liquid							
10	Petroleum Gas)	8,92E+15	6,05E+11	1,43E+08	3,48E+08	2,59E+06	2,77E+07	1,69E+07
	Heavy oil for							
11	domestic heating	5,42E+15	4,25E+11	8,13E+07	2,76E+08	8,13E+08	3,14E+07	1,84E+06
12	Natural gas							
	<i>Domestic use for</i>							
12a	<i>cooking</i>	4,34E+15	2,46E+11	8,24E+07	3,73E+08	1,26E+06	6,07E+06	8,68E+05
	<i>Domestic use for</i>							
12b	<i>heating</i>	1,76E+16	9,95E+11	3,34E+08	1,51E+09	5,10E+06	2,46E+07	3,52E+06
12c	<i>Other uses</i>	2,62E+16	1,48E+12	4,97E+08	2,25E+09	7,59E+06	3,67E+07	5,24E+06

Local emissions	g/yr	1,31E+13	6,93E+10	4,32E+10	1,56E+09	7,93E+08	1,66E+08
Total emissions per							
€	g/€	2,28E+02	1,21E+00	7,51E-01	2,71E-02	1,38E-02	2,89E-03
Total emissions per							
person	g/person	5,15E+06	2,73E+04	1,70E+04	6,13E+02	3,12E+02	6,53E+01
Economic product							
(GDP)	€/yr	5,75E+10					
People supported	Units/yr	2540829					

Table 4.6. Emission factors of fuel combustion								
Fuel used	Emissions from fuel combustion (g/MJ of fuel fired)							
	HC (*)	CO	NO _x	Particulate	SO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂
Natural gas (used in domestic sector, heating and cooking)	6.5E-4	0.019	0.086	0.0014	2.9E-4	1.3E-4	2.0E-4	56.6
Natural gas in turbine	0.0014	0.069	0.052	9.7E-4	2.9E-4	0.0046	0.0019	56.5
Heavy Fuel Oil in industrial boilers	8.6E-4	0.015	0.051	0.0058	0.15	0.0031	3.4E-4	78.4
Gasoline in engines	0.835	1.08	0.09	0.0033	(**)	(§)	9.7E-3	70.67
Diesel in engines	0.09	0.27	1.02	0.07	(**)	(§)	6.8E-4	70.99
LPG in engines	n.a.	1.65	0.70	0.02	(**)	(§)	4.1E-3	64.57

(*) unburnt hydrocarbons, except CH₄

(**) assumed desulphurized fuel

(§) added to “unburnt hydrocarbons”

Sources: www.apat.gov.it; EPA document, 'Compilation of air pollutant emission factors', Volume I, fifth edition, point sources AP-42 (<http://epa.gov/>); Corinair (1993); <http://www.pre.nl/simapro/>; and Authors' calculations based on combustion stoichiometry.

Table 4.7. Global scale, direct and indirect airborne emissions from resource use in the city of Rome (year 2002)

#	Flow	Global CO ₂ (g CO ₂)	Global CO (g H ₂ O)	Global NO ₂ (g NO ₂)	Global SO ₂ (g SO ₂)	Global Part. (g part)	Global N ₂ O (g N ₂ O)
Imported Input							
8	Gasoline	5,67E+12	9,55E+10	5,28E+10	3,85E+08	6,20E+08	1,59E+08
9	Diesel fuel	6,67E+12	1,49E+09	1,75E+09	5,69E+08	2,89E+08	3,24E+07
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	7,70E+11	1,82E+08	4,43E+08	3,29E+06	3,52E+07	2,16E+07
11	Heavy oil for domestic heating	5,14E+11	9,83E+07	3,34E+08	9,83E+08	3,80E+07	2,23E+06
12	Natural gas						
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	2,37E+11	7,95E+07	3,60E+08	1,21E+06	5,86E+06	8,37E+05
12b	<i>Domestic use for heating</i>	9,60E+11	3,22E+08	1,46E+09	4,92E+06	2,38E+07	3,39E+06
12c	<i>Other uses</i>	1,43E+12	4,80E+08	2,17E+09	7,33E+06	3,54E+07	5,05E+06
13	Electricity	4,58E+12	4,12E+09	4,89E+09	8,16E+09	5,10E+08	7,90E+07
14	Water (from aqueduct)	1,41E+11	2,70E+07	9,19E+07	2,70E+08	1,05E+07	6,13E+05
15	Main Food Items						
15a	<i>Fish</i>	5,17E+10	1,68E+08	9,86E+07	4,25E+06	2,86E+06	4,69E+05
15b	<i>Meat</i>	2,09E+11	6,76E+08	3,97E+08	1,71E+07	1,15E+07	1,89E+06
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	4,81E+10	1,56E+08	9,17E+07	3,95E+06	2,66E+06	4,36E+05
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	1,07E+11	3,47E+08	2,04E+08	8,78E+06	5,91E+06	9,70E+05
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	5,76E+10	1,87E+08	1,10E+08	4,73E+06	3,19E+06	5,23E+05
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	5,98E+09	1,94E+07	1,14E+07	4,92E+05	3,31E+05	5,43E+04
15g	<i>Olive and seed oils</i>	8,12E+08	2,63E+06	1,55E+06	6,67E+04	4,49E+04	7,37E+03
16	Steel and iron	5,58E+12	1,07E+09	3,63E+09	1,07E+10	4,13E+08	2,42E+07
17	Copper	3,61E+11	6,91E+07	2,35E+08	6,91E+08	2,67E+07	1,57E+06
18	Aluminium	1,50E+12	2,86E+08	9,74E+08	2,86E+09	1,11E+08	6,49E+06
19	Cement (Portland)	1,08E+12	2,07E+08	7,05E+08	2,07E+09	8,01E+07	4,70E+06
20	Rocks and Sediments	1,11E+11	2,13E+07	7,25E+07	2,13E+08	8,24E+06	4,83E+05
21	Glass	4,88E+11	9,34E+07	3,18E+08	9,34E+08	3,61E+07	2,12E+06
22	Plastics	4,13E+12	7,90E+08	2,69E+09	7,90E+09	3,06E+08	1,79E+07
23	Asphalt	1,86E+12	3,56E+08	1,21E+09	3,56E+09	1,38E+08	8,06E+06
24	Chemicals	1,12E+13	2,14E+09	7,27E+09	2,14E+10	8,27E+08	4,85E+07
25	Wood	2,21E+11	7,18E+08	4,22E+08	1,82E+07	1,22E+07	2,01E+06
26	Textiles	8,08E+11	2,62E+09	1,54E+09	6,63E+07	4,47E+07	7,33E+06
27	Paper and derivatives	1,36E+12	4,42E+09	2,60E+09	1,12E+08	7,54E+07	1,24E+07
28	Fertilizers	5,82E+11	9,80E+09	5,42E+09	3,96E+07	6,36E+07	1,63E+07
Total global emissions		5,07E+13	1,26E+11	9,23E+10	6,10E+10	3,73E+09	4,61E+08
Total emissions per €		8,83E+02	2,20E+00	1,61E+00	1,06E+00	6,50E-02	8,02E-03
Total emissions per person		2,00E+07	4,98E+04	3,63E+04	2,40E+04	1,47E+03	1,81E+02

4.1.1 Risultati della Ecological Footprint e della Analisi Energetica

La Tabella 4.8 mostra i dati e le procedure di calcolo relativi all'Ecological Footprint di Roma. I dati di ingresso relativi ai prodotti alimentari, ai prodotti tessili, a quelli del legno e della carta sono convertiti in domanda diretta di superficie produttiva per mezzo dei fattori di produttività riportati in Tabella 4.9. Altri dati di ingresso (come il combustibile necessario nei processi di produzione per la realizzazione dei vari prodotti), relativamente alle emissioni di CO₂ su scala globale che essi comportano (Tabella 4.8), sono moltiplicati per fattori di

assorbimento della CO₂ per ettaro (Tabella 4.9) per ottenere l'area totale necessaria a supportarli. I fattori dell'Ecological Footprint (ettari per persona) possono essere calcolati per ciascun input di ingresso, nonché a livello di città. I fattori di conversione, naturalmente, sono dipendenti dalla effettiva produttività dei terreni utilizzati per la produzione vegetale, nonché dall'attività fotosintetica media (Net Primary Production) alle latitudini temperate, da cui dipende l'assorbimento di CO₂.

Table 4.8. Ecological Footprint of the City of Rome (year 2002)						
#	Description of flow	Units	Mass	Mass of CO ₂	Ecological Footprint (ha)	Ecological Footprint (ha/pc)
Imported (with renewable and nonrenewable fractions)						
8	Gasoline	g/yr		6,01E+12	1,08E+06	4,24E-01
9	Diesel fuel	g/yr		6,27E+12	1,12E+06	4,43E-01
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr		8,14E+11	1,46E+05	5,74E-02
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr		4,70E+11	8,42E+04	3,31E-02
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr		3,00E+11	5,38E+04	2,12E-02
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr		1,22E+12	2,18E+05	8,58E-02
12c	<i>Other uses</i>	g/yr		1,81E+12	3,25E+05	1,28E-01
13	Electricity	g/yr		4,58E+12	8,21E+05	3,23E-01
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,80E+10		7,48E+05	2,94E-01
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,83E+10		1,39E+06	5,48E-01
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,43E+11		1,35E+04	5,31E-03
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,49E+11		1,99E+05	7,84E-02
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	1,33E+11		4,84E+04	1,91E-02
15f	<i>Wine and alcohols</i>	g/yr	3,83E+10		4,50E+04	1,77E-02
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	1,95E+10		3,24E+04	1,28E-02
16	Steel and iron	g/yr		5,10E+12	9,14E+05	3,60E-01
17	Copper	g/yr		3,30E+11	5,92E+04	2,33E-02
18	Aluminium	g/yr		1,37E+12	2,45E+05	9,65E-02
19	Cement (Portland)	g/yr		9,90E+11	1,77E+05	6,98E-02
20	Rocks and Sediments	g/yr		1,02E+11	1,83E+04	7,18E-03
21	Glass	g/yr		4,46E+11	8,00E+04	3,15E-02
22	Plastics	g/yr		3,78E+12	6,77E+05	2,66E-01
23	Asphalt	g/yr		1,70E+12	3,05E+05	1,20E-01
24	Chemicals	g/yr		1,02E+13	1,83E+06	7,21E-01
25	Wood	g/yr	5,94E+11	2,13E+11	8,61E+04	3,39E-02
26	Textiles	g/yr	5,13E+10	7,77E+11	1,91E+05	7,50E-02
27	Paper and derivatives	g/yr	4,88E+11	1,31E+12	3,92E+05	1,54E-01
28	Fertilizers	g/yr		6,16E+11	1,10E+05	4,35E-02
29	Built Space				4,71E+04	1,85E-02
Output						
	Total Ecological Footprint				1,15E+07	4,51E+00
	Economic product (GDP)	€/yr	5,75E+10			
	Ecological Footprint per €				1,99E-04	
	Population of Rome	Units/yr	2540829			

Table 4.9. Demand for Productive land (calculation of Ecological Footprint intensities)			
Item	Value	Unit	Reference
Land for uptake of CO ₂ released by fuel combustion	1.79E-04	Ha/kg	Estimated from energy intensity and photosynthesis average data
Land for production of main food items:			
<i>Fish</i>	4.17E-02	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, page 188
<i>Meat</i>	2.04E-02	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, page 188
<i>Fruits and Vegetables</i>	5.56E-05	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, page 188
<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	1.34E-03	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, page 188
<i>Cereals and derivatives</i>	3.64E-04	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, page 188
<i>Wine and alcoholics</i>	1.18E-03	Ha/kg	Our calculation from ISTAT, 2002
<i>Olive and seed oils</i>	1.67E-03	Ha/kg	Our calculation from ISTAT, 2002
Wood (agric. prod only) (*)	8.06E-05	Ha/kg	Our calculation from primary production of two different kinds of local forest
Textile fibers (agric. prod. only) (*)	1.00E-03	Ha/kg	Wackernagel and Rees, 2001, pag 188
Paper and derivatives (as wood equivalent) (*)	3.23E-04	Ha/kg	Our calculation from energy intensity of wood
(*) Only land for production of biomass is included here. Additional land for uptake of CO ₂ released in the process must be accounted for separately.			

Infine, la Tabella 4.10 mostra la conversione dei flussi naturali e commerciali in unità di energia, servendosi dei fattori di intensità energetica (transformity o specific emergy) riportati all'interno della Tabella stessa. La Tabella 4.11 riporta i flussi energetici aggregati e gli indicatori di sostenibilità calcolati sui dati della Tabella 4.10.

Table 4.10. Emergy flows supporting the urban system of Rome (year 2002)

# (*)	Items	Units	Raw	Transformity (seJ/unit)	Ref. for Transformity	Emergy (seJ/yr)
Renewable Input (locally available)						
1	Sun	J/yr	6,43E+18	1	[a]	6,43E+18
2	Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface)	J/yr	2,22E+16	2,51E+03	[b]	5,58E+19
3	Evapotranspired Rain (Chemical Potential)	J/yr	1,48E+15	2,69E+04	[b]	3,97E+19
4	Run-in (river geopotential)	J/yr	1,39E+15	4,66E+04	[b]	6,49E+19
5	Waves	J/yr	7,62E+15	5,13E+04	[b]	3,91E+20
6	Tides	J/yr	1,24E+14	7,39E+04	[c]	9,20E+18
Nonrenewable Input (locally available)						
7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	2,87E+09	[d]	1,76E+21
Imported Input						
8	Gasoline	J/yr	5,87E+16	1,11E+05	[b]	6,52E+21
9	Diesel fuel	J/yr	7,02E+16	1,11E+05	[b]	7,80E+21
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	J/yr	8,92E+15	1,18E+05	[b]	1,05E+21
11	Heavy oil for domestic heating	J/yr	5,42E+15	1,11E+05	[e]	6,02E+20
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	J/yr	4,34E+15	8,05E+04	[b]	3,49E+20
12b	<i>Domestic use for heating</i>	J/yr	1,76E+16	8,05E+04	[b]	1,42E+21
12c	<i>Other uses</i>	J/yr	2,62E+16	8,05E+04	[b]	2,11E+21
13	Electricity	J/yr	2,91E+16	3,11E+05	[b]	9,05E+21
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,28E+14	3,76E+06	[b]	1,23E+21
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,80E+10	2,78E+11	[f]	4,99E+21
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,83E+10	3,00E+10	[g]	2,05E+21
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,43E+11	1,01E+09	[h]	2,45E+20
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,49E+11	1,44E+10	[i]	2,15E+21
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	1,33E+11	6,04E+08	[l]	8,03E+19
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,83E+10	1,41E+09	[m]	5,38E+19
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	1,95E+10	4,25E+11	[n]	8,26E+21
16	Steel and iron	g/yr	2,48E+12	3,16E+09	[o]	7,82E+21
17	Copper	g/yr	4,98E+10	3,36E+09	[p]	1,67E+20
18	Aluminium	g/yr	6,71E+10	7,76E+08	[b]	5,21E+19
19	Cement (Portland)	g/yr	1,97E+12	1,73E+09	[b]	3,41E+21
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,62E+13	1,65E+09	[q]	2,68E+22
21	Glass	g/yr	2,35E+11	3,50E+09	[r]	8,23E+20
22	Plastics	g/yr	5,60E+11	9,68E+09	[b]	5,42E+21
23	Asphalt	g/yr	1,46E+11	9,56E+09	[b]	1,40E+21
24	Chemicals	g/yr	1,52E+12	6,38E+08	[b]	9,68E+20
25	Wood	g/yr	5,94E+11	6,79E+08	[b]	4,04E+20
26	Textiles	g/yr	5,13E+10	1,34E+11	[b]	6,87E+21
27	Paper and derivatives	g/yr	4,88E+11	6,55E+09	[b]	3,20E+21
28	Fertilizers	g/yr	2,69E+11	8,28E+09	[s]	2,23E+21
29	Services for imports	€/yr	1,19E+10	1,64E+12	[t]	1,96E+22
30	Imported Labor (Commuters)	people/yr	2,54E+05	3,60E+16	[t]	9,15E+21
31	Governmental support (salaries, health services, schools, etc)	€/yr	6,19E+09	1,64E+12	[t]	1,01E+22
32	Tourism (from Italy and outside)	\$/yr	4,91E+09	3,81E+12	[u]	1,87E+22

(*) Footnotes for numbered items as well as references of transformities used are listed in the Appendix.

Table 4.11. Aggregate energy flows supporting Rome (year 2002) and calculated performance indicators (data from Table 4.10).

Aggregate flows from Table 4.10		Units	Emergy flows	%
R	Renewable Emergy (maximum among items 1-6)	seJ/yr	3,91E+20	0,3%
N	Locally nonrenewable (item 7)	seJ/yr	1,76E+21	1,3%
F1	Imported emergy of fuels and electricity (sum of items 8-13)	seJ/yr	2,89E+22	20,9%
F2	Imported emergy of water and food (sum of items 14-15)	seJ/yr	1,91E+22	13,8%
F3	Imported emergy of goods and commodities (sum of items 16-28)	seJ/yr	5,96E+22	43,1%
SL _N	Nonrenewable fraction (94%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	2,70E+22	19,5%
SL _R	Renewable fraction (6%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	1,72E+21	1,2%
U	Total emergy without services and imported labor	seJ/yr	1,10E+23	79,2%
U _{LS}	Total emergy with services and imported labor	seJ/yr	1,38E+23	100,0%
Products considered			Rome	Italy
P	People supported in 2002	Units/yr	2.54E+06	5.73E+07
GDP	Gross Domestic Product in 2002	€/yr	5.75E+10	1.26E+12
Performance indicators			Rome	Italy
U _{LS} /GDP	Emergy/GDP	seJ/€	2,41E+12	1.64E+12
U _{LS} /P	Emergy/person	seJ/person	5,45E+16	3.60E+16
A	Area of Urban System	m ²	1,29E+09	3.01E+11
U _{LS} /A	Empower density	seJ/m ² /yr	1,08E+14	6.86E+12
EYR	Emergy Yield Ratio; $U_{LS}/(F1+F2+F3+SL_N+SL_R)$		1,02	1.29
ELR	Environmental Loading Ratio; $(N+F1+F2+F3+SL_N)/(R+SL_R)$		64,47	16.13
ESI	Emergy Index of Sustainability (EYR/ELR)		0,02	0.08

4.2 Domanda insostenibile di risorse

Dai dati riportati e dai relativi calcoli effettuati nelle Tabelle 4.1-4.11, emerge che un cittadino medio di Roma, in un anno, utilizza, direttamente o indirettamente, circa 45 tonnellate di materiale abiotico (minerali, combustibili, suoli erosi, ecc). Tale flusso abiotico include anche ben 6,5 tonnellate di combustibile per persona, a fronte di una media nazionale italiana di 3,6 tonnellate per anno. Inoltre, 816 tonnellate di acqua sono utilizzate o deviate dal loro corso naturale a sostegno di una domanda individuale di prodotti alimentari, di beni materiali e di energia elettrica. Nonostante gli scarsi 0,05 Ha pro capite di terra produttiva disponibili, ogni cittadino di Roma virtualmente "usa" 4,51 Ha di superficie, in parte destinata alla coltivazione per l'ottenimento di cibo e altri beni materiali (legno, tessili , ecc.), e per altra parte destinata all'assorbimento della CO₂ prodotta, in maniera diretta ed indiretta, dalla città. Infine, ogni romano contribuisce al riscaldamento globale del pianeta rilasciando in un anno 20 tonnellate

di CO₂ e 50 kg di CO, favorisce l'acidificazione delle piogge rilasciando 36 kg di NO_x e 24 kg di SO₂, contribuisce all'inquinamento idrico e atmosferico generando circa 450 kg di rifiuti solidi, la maggior parte dei quali finisce in discarica o viene incenerito (Cherubini e al., 2007). Se si considera invece l'aspetto economico (generazione di PIL), i nostri calcoli mostrano che 200 kg di materiale abiotico, 3,6 tonnellate di acqua e 200 m² di terra produttiva sono necessari per generare 100 € di PIL. La domanda di energia a sostegno della generazione di 100 € di PIL è pari a 29 kg di petrolio equivalente, il cui costo medio sul mercato internazionale è di 9 €. Ciò rende evidente il ciclo di auto-amplificazione dell'uso di energia fossile importata: l'acquisto di petrolio a relativamente basso prezzo genera un'attività economica 11 volte più grande, che a sua volta consente ulteriori investimenti per l'acquisto di energia e una maggiore crescita economica, a spese dei paesi esportatori di petrolio. Inoltre, 88 kg di emissioni di CO₂ e 220 grammi di CO sono liberati per la generazione di 100 € di PIL, insieme con 160 g di NO_x e 106 g di SO₂. Infine, 2 kg di rifiuti solidi urbani sono generati dalle varie attività e dallo stile di vita cittadino, che portano alla generazione di 100 € di PIL.

Dati riguardanti precedenti studi (Bettini, 1996, tra gli altri), circa l'insostenibilità delle città, mostrano che è richiesto un enorme apporto di risorse per garantire la vita di una città, che può essere fornito solo mediante importazione da paesi lontani e "prestito" di terra reale o virtuale da ecosistemi presenti o passati. Infine, i risultati della valutazione emergetica del sistema urbano di Roma confermano una domanda di supporto ambientale per persona e per anno del 51% più grande rispetto al valore medio nazionale e una domanda di emergenza per unità di PIL per anno del 47% maggiore rispetto alla media dell'economia italiana.

4.3 Vantaggi di una valutazione multi-metodo

La necessità di una valutazione multi-metodo appare evidente quando si guardano le Figure da 4.1 a 4.5 relative all'anno 2002. Nel seguito di questo studio verranno anche mostrate le serie temporali relative ad anni precedenti. La Figura 4.1 mostra l'importanza relativa dei diversi flussi di ingresso, per quanto riguarda la domanda di materia su larga scala. I materiali da costruzione (cemento, acciaio, rame) sono decisamente gli input dominanti insieme con la domanda di materia indiretta relativa all'energia elettrica. La domanda di acqua (Figura 4.2), è invece più uniformemente distribuita tra i più importanti input (energia elettrica, acqua da acquedotto, materiali da costruzione, prodotti chimici, cibo, legno, tessili, ecc), confermando così l'importante ruolo dell'acqua a sostegno dello sviluppo urbano, apparentemente più strategico dei combustibili fossili.

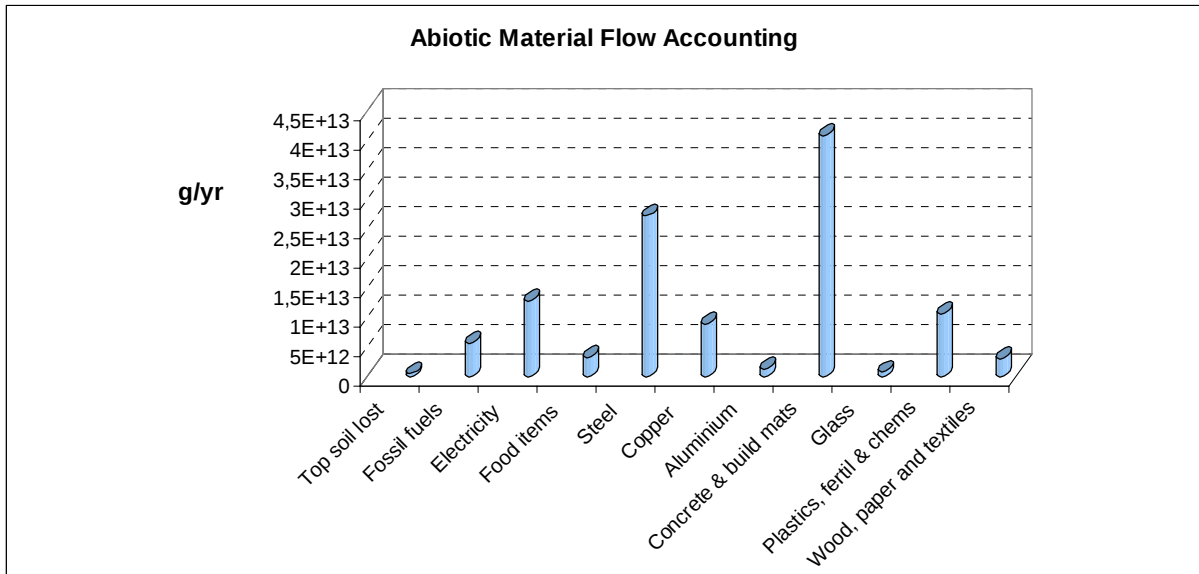


Figure 4.1.

Direct and indirect demand for abiotic material in the production process of input items supplied to the city of Rome in the year 2002.

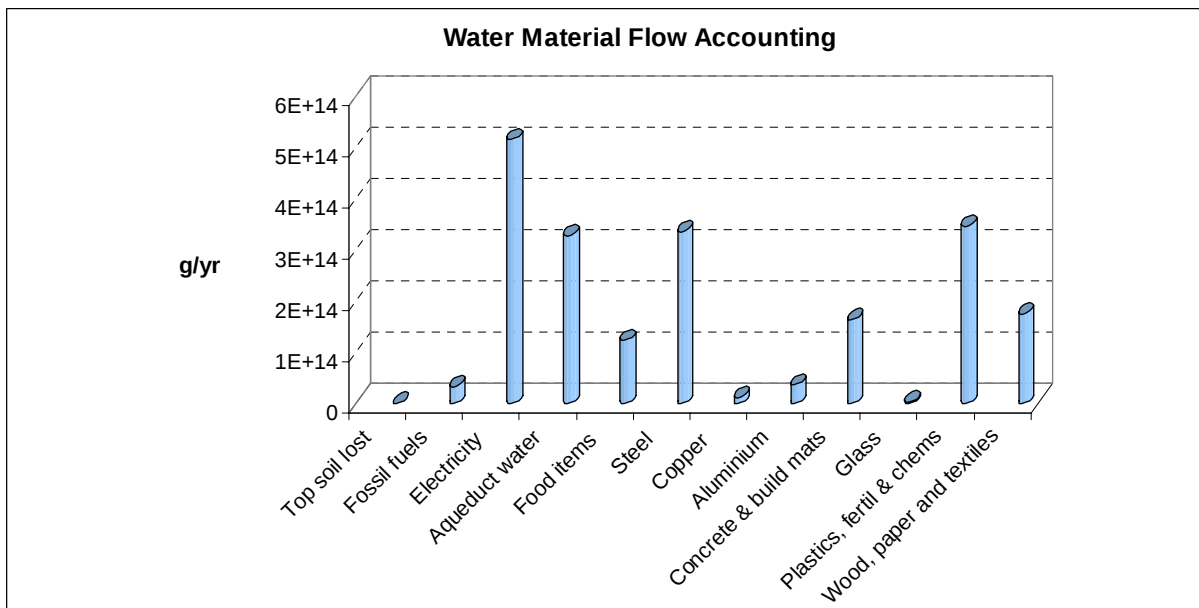


Figure 4.2.

Direct and indirect demand for water resource in the production process of input items supplied to the city of Rome in the year 2002.

Un drastico cambiamento è indicato in Figura 4.3, mostrandone la domanda di embodied energy di Roma, dove gli input basati sui combustibili fossili (combustibili, energia elettrica e sostanze chimiche) risultano dominanti. Se fosse effettuata solo un'analisi energetica delle dinamiche urbane, il quadro sarebbe sostanzialmente incompleto. Se un decisore politico

dovesse investire denaro per strategie orientate alla tutela dell'ambiente, basandosi solo sui risultati dell'analisi energetica, il denaro andrebbe solo a favore di un miglioramento tecnico dei dispositivi di combustione (di centrali, di caldaie e di motori), escludendo ad esempio la conservazione delle acque ed il riciclaggio dei minerali.

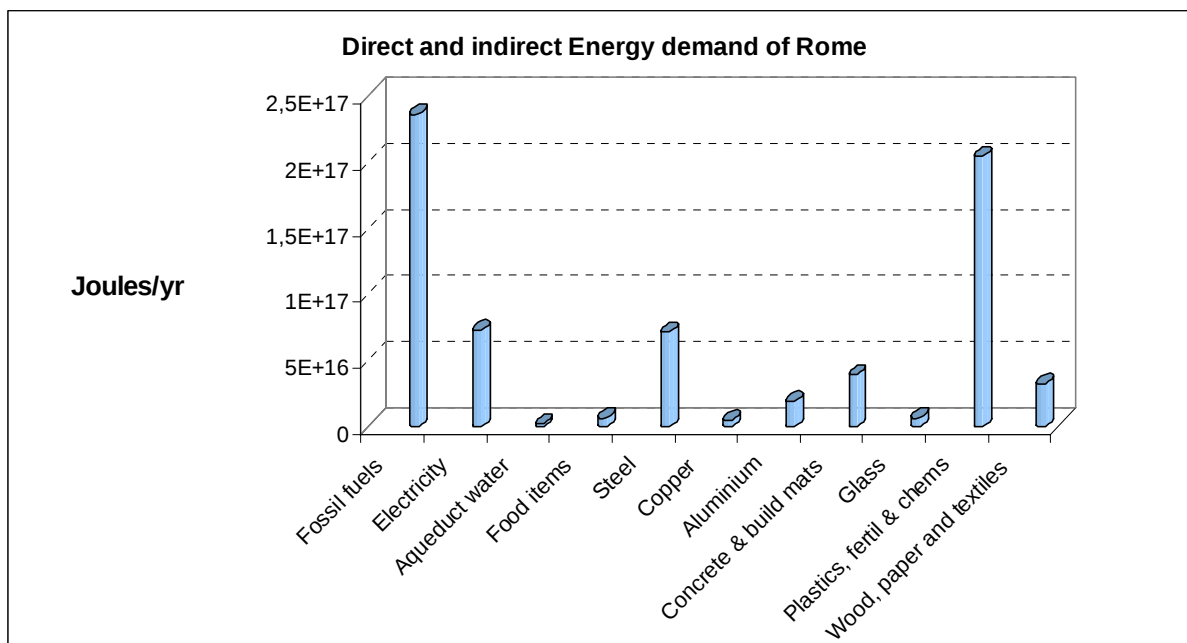


Figure 4.3. Direct and indirect energy demand for main input resources used by the city of Rome in the year 2002.

Il metodo dell'ecological footprint (Figura 4.4) sottolinea l'importanza della capacità tampone dell'ambiente nell'assorbimento della CO_2 , nonché il ruolo della produzione alimentare, sulla disponibilità di superficie produttiva. Come si vede dalla Figura 4.4 gli ettari di territorio necessari all'assorbimento della CO_2 hanno un ruolo preponderante nella formazione dell'impronta ecologica di Roma. Sebbene la superficie produttiva richiesta per supportare il fabbisogno alimentare presenti un valore piuttosto alto, la quantità di terra virtuale di cui Roma usufruisce è per la maggior parte destinata all'assorbimento della CO_2 che la città, direttamente e indirettamente, produce. Un grosso contributo all'emissione della CO_2 è dovuto ai combustibili fossili (Figura 4.4). Essi, indirettamente, attraverso i processi di produzione necessari alla loro realizzazione, e mediante i processi di combustione aventi luogo direttamente all'interno della città, generano, tra le diverse categorie considerate, la più elevata domanda di terra virtuale. Un ruolo molto importante nel determinare l'impronta ecologica di Roma (superiore a quello rivestito dai prodotti di tipo alimentare) è dato anche dai prodotti di derivazione fossile (plastica e prodotti chimici in genere). Essi generano una notevole domanda di superficie necessaria all'assorbimento della CO_2 , a motivo dei processi produttivi legati alla loro realizzazione.

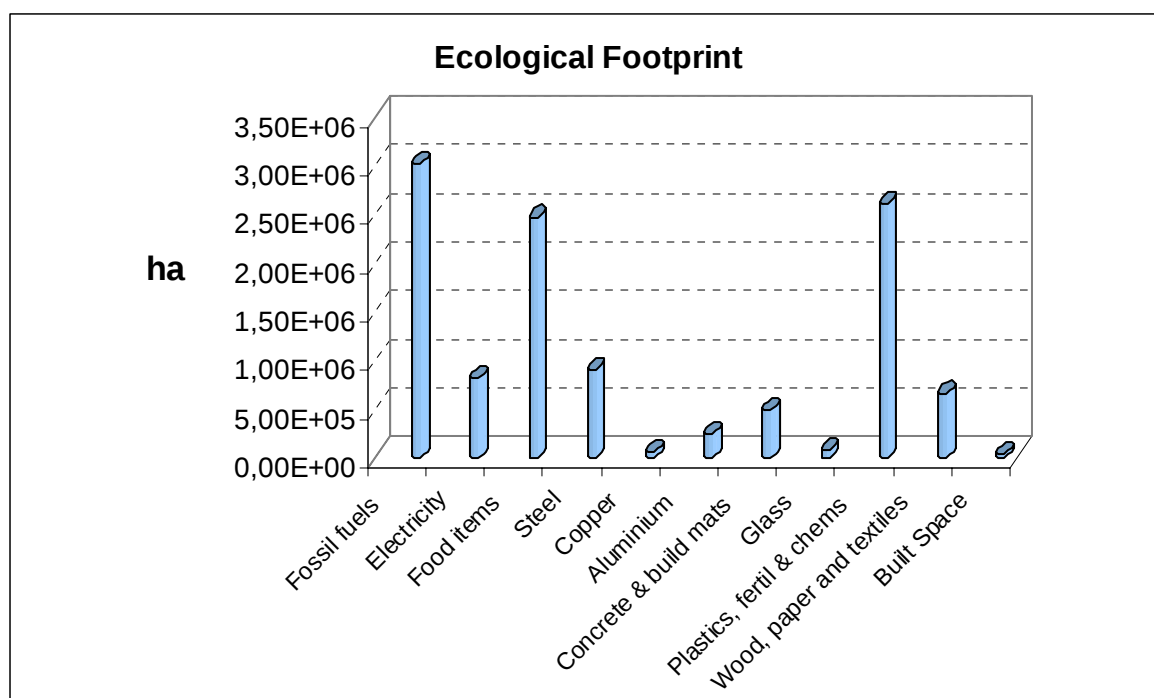


Figure 4.4.

Support area needed for main input resources used by the city of Rome in the year 2002.

Infine, la Figura 4.5 mostra la cosiddetta "impronta dell'energia" (Odum, 1996) della città di Roma (Ascione e al., 2007), vale a dire un diagramma a barre di tutti gli input di energia, compresi quelli localmente rinnovabili e non rinnovabili, nonché l'energia indiretta impiegata nel lavoro e nei servizi. Il quadrato in tratteggio di Figura 4.5 mette in evidenza i flussi normalmente rappresentati in quasi tutti i metodi di valutazione (le barre entro il quadrato, rispetto alle Figure 4.1, 4.2, 4.3, 4.4), mentre invece gli input non monetizzabili dei servizi ambientali ed economici (lavoro e servizi, anche molto spesso legati alla informazione ed al know-how) appaiono solo in questa figura, dove si esplicita anche la loro importanza relativa.

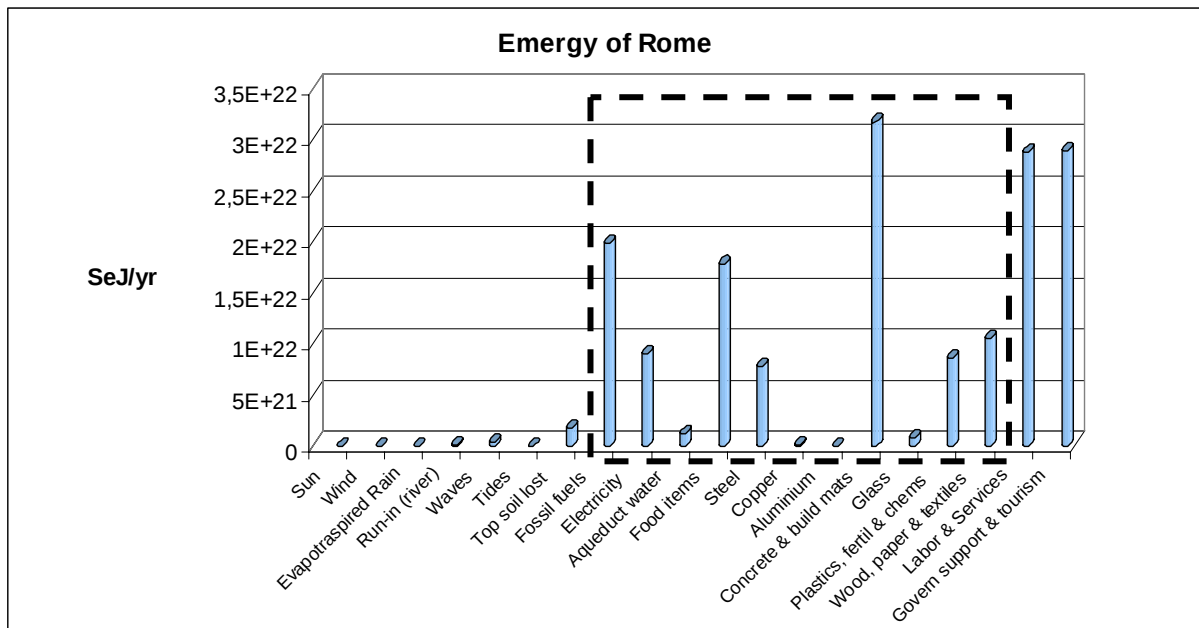


Figure 4.5.

Direct and indirect environmental flows (emergy) supporting the city of Rome in the year 2002 (expressed in emergy units, seJ/yr; Ascione et al., 2007). The dotted square in the Figure highlights the flows usually accounted for in almost all evaluation methods, while instead unmonied environmental services and economic inputs are only accounted for in emergy synthesis.

Come per tutti i moderni sistemi urbani, i flussi ambientali diretti, a sostegno della città di Roma sono piccoli rispetto ai flussi dei beni materiali, dei combustibili, e dei flussi economici del lavoro e dei servizi. Sarebbe il contrario se studiassimo un ecosistema senza l'uomo, come una foresta o un lago. Il passaggio da un tipo di agricoltura di sussistenza ad un'agricoltura moderna verrebbe descritto da due "impronte" molto diverse, indicando la relativa importanza dei flussi naturali diretti rispetto a quelli determinati dal controllo dell'uomo. La stessa differenza appare evidente dal confronto tra un villaggio rurale ed una città moderna. Ciò che rende maggiori queste differenze non è solo la relativa importanza degli input rinnovabili e non rinnovabili, ma la misura in cui questi input sono il risultato finale di una catena di convergenza di processi (ad esempio la fabbricazione di automobili o la raffinazione dei carburanti), dove una maggiore quantità di *energia solare equivalente*, diretta e indiretta, è più o meno efficientemente dissipata. Di conseguenza, gli istogrammi mostrano in modo molto chiaro ed immediato il passaggio da processi e sistemi più sostenibili a meno sostenibili.

4.4 Fattori di scala

L'importanza della scala spaziale emerge dalla Tabella 4.3 (emissioni locali) e dalla Tabella 4.4 (emissioni su scala globale). Tutte le emissioni su scala globale sono molto maggiori di quelle locali. Esse infatti riflettono il ruolo svolto dai diversi processi che si verificano al di fuori del sistema di indagine, necessari a rifornire la città dell'energia e dei beni materiali richiesti. Il rapporto tra emissioni globali e locali è di circa 3,9 per la CO₂, di 1,8 per la CO, di 2,1 per gli NO_x, di 39 per l' SO₂, di 4,7 per il particolato e di 2,8 per l' N₂O. Il significato immediato di questi dati è che il comportamento locale influisce sulla vita e sulle dinamiche di sistemi lontani, di popolazioni e di specie. Per cui ciò dovrebbe spingere ad un'attenta

gestione delle risorse e ad un aumento del riciclo, al fine di evitare una distribuzione diseguale dei benefici e degli oneri. Esaminando più attentamente i singoli dati, appare chiaramente che essi riflettono modelli specifici di uso. Ad esempio, l'elevato rapporto tra emissioni globali e locali dell' SO_2 riflette il fatto che i combustibili utilizzati all'interno del sistema urbano per il trasporto e per il riscaldamento domestico sono quasi completamente desolforati, mentre invece per i combustibili utilizzati negli impianti di produzione al di fuori della città (centrali elettriche, industria) è consentita ancora una percentuale in contenuto di zolfo relativamente elevata. Le emissioni non sono l'unico aspetto che risente del fattore di scala. La Tabella 4.2 mostra che la materia abiotica totale richiesta, su larga scala, è 3,9 volte più alta del flusso di materia abiotica coinvolta all'interno del sistema. Allo stesso modo, la domanda globale di acqua per l'estrazione, la trasformazione e la fornitura di beni e servizi è di circa 6,3 volte l'effettivo utilizzo delle acque all'interno della città. Il significato di un tale constatazione si spiega da sé: la domanda a monte di beni e servizi della città presuppone che un'enorme quantità di materia, in termini di minerali estratti e trasformati, di uso dei combustibili, di acqua prelevata, di degrado degli ecosistemi e del paesaggio (miniere, modifiche ai livelli dei bacini d'acqua, aumento dell'erosione del suolo, ecc.), venga degradata o deviata dal suo naturale corso. Aumentare il riciclo dei minerali e ottimizzare l'uso delle risorse idriche potrebbe influenzare positivamente la disponibilità delle risorse e le dinamiche di ecosistemi anche molto lontani dalla città.

La domanda totale (virtuale) di terra produttiva pro capite di un cittadino di Roma è circa 18 volte superiore alla superficie pro capite disponibile in Italia (circa 0,25 ha/pc). Quest'ultima è già molto più ampia rispetto ai pochi 0,05 ettari pro capite realmente disponibili per ogni cittadino di Roma. Inoltre la domanda totale di terra (diretta e indiretta) di Roma è circa 90 volte la reale superficie comunale.

Infine, la Tabella 4.2 mostra che l'uso di energia su scala locale è solo il 32% del consumo su scala globale. Quest'ultimo comprende non soltanto l'uso diretto di energia fatto entro la città, ma anche l'energia indirettamente impiegata per la produzione e la fornitura dei beni e dei servizi. Tale valore indica chiaramente che la maggiore dissipazione energetica a sostegno della vita di una città non avviene all'interno del sistema e, cosa più importante, che un cambiamento nei modelli di consumo della città, nonché nell'efficienza di produzione dei beni e dei materiali forniti alla città (energia elettrica, materiali da costruzione, ecc) influenzerebbe moltissimo la domanda globale di energia, rendendo le risorse maggiormente disponibili per altri usi e per altre zone del mondo.

APPENDICE AL CAPITOLO 4

Footnotes of Tables 4.1, 4.2, 4.5, 4.7 and 4.8

- 8 Gasoline (unleaded):** Gasoline used= $1.33\text{E}+00$ Mton/yr= $1.33\text{E}+06$ ton/yr= $1.33\text{E}+12$ g/yr [ENEA, 2002]. HHV= 44 MJ/kg= 44000 J/g. Total gasoline energy= $5.87\text{E}+16$ J/yr. Gasoline unit price= 1.047 €/L [Unione Petrolifera, 2003]. Gasoline density= 750 kg/m³= 750 g/L. Total gasoline cost= $1.86\text{E}+09$ €/yr.
- 9 Diesel:** Total diesel used= $1.63\text{E}+00$ Mton/yr= $1.63\text{E}+06$ ton/yr = $1.63\text{E}+12$ g/yr. HHV= 43 MJ/kg= $4.30\text{E}+04$ J/g. Total diesel energy= $7.02\text{E}+16$ J/yr [ENEA, 2002]. Diesel unit price= 0.856 €/L [Unione Petrolifera, 2003]. Diesel density= 832.5 kg/m³= 832.5 g/L. Total diesel cost= $1.68\text{E}+09$ €/yr.
- 10 LPG:** total LPG used= $1.92\text{E}-01$ Mton/yr= $1.92\text{E}+05$ ton/yr= $1.92\text{E}+11$ g/yr. HHV= 19800 Btu/lb= 46376 J/g [ENEA, 2002]. Total LPG energy= $8.92\text{E}+15$ J/yr. LPG unit price= 0.52 €/L [Unione Petrolifera, 2003]. LPG density= 505 kg/m³= 505 g/L. Total LPG cost= $1.98\text{E}+08$ €/yr.
- 11 Heavy Oil for domestic heating:** Total used= $1.27\text{E}+11$ g/yr [Unione Petrolifera, 2003]. HHV of Heavy Oil= $4.26\text{E}+04$ J/g. Total Energy = $5.42\text{E}+15$ J/yr. Unit price= 0.834 €/L [Unione Petrolifera, 2003]. Density= 830 kg/m³= 830 g/L. Total cost for heavy oil= $1.28\text{E}+08$ €/yr.

- 12 Natural gas:** [Comune Roma, 2003a]. Volumes used: Total nat. gas used= $1.22\text{E}+09 \text{ m}^3/\text{yr}$ (of which, for domestic use= $1.10\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{yr}$; used for building heating= $4.47\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{yr}$; for other uses= $6.65\text{E}+08 \text{ m}^3/\text{yr}$). Density of nat. gas= $7.89\text{E}+02 \text{ g/m}^3$ Total mass of nat. gas used= $9.64\text{E}+11 \text{ g/yr}$ (of which, for domestic use= $8.69\text{E}+10 \text{ g/yr}$; for building heating= $3.52\text{E}+11 \text{ g/yr}$; for other uses= $5.25\text{E}+11 \text{ g/yr}$). Conversion to energy units: HHV= $2.13\text{E}+04 \text{ Btu/lb}$ = $4.99\text{E}+04 \text{ J/g}$. Total energy in nat. gas= $4.81\text{E}+16 \text{ J/yr}$ (of which, for domestic use= $4.34\text{E}+15 \text{ J/yr}$; for building heating= $1.76\text{E}+16 \text{ J/yr}$; for other uses= $2.62\text{E}+16 \text{ J/yr}$). Unit price of natural gas= 0.4 €/m^3 . Total cost of natural gas= $4.89\text{E}+08 \text{ €/yr}$ (of which, for domestic use= $4.41\text{E}+07 \text{ €/yr}$; for building heating= $1.79\text{E}+08 \text{ €/yr}$; for other costs= $2.66\text{E}+08 \text{ €/yr}$).
- 13 Electricity.** Total used= $8.09\text{E}+03 \text{ GWh/yr}$ = $8.09\text{E}+06 \text{ MWh/yr}$ = $8.09\text{E}+09 \text{ kWh/yr}$ = $2.91\text{E}+16 \text{ J/yr}$ [Comune Roma, 2003a]. Unit price= 0.093 €/kWh . Total electricity cost= $7.52\text{E}+08 \text{ €/yr}$.
- 14 Water.** Total water used= $3.28\text{E}+08 \text{ m}^3$ [Comune Roma, 2004a]. Water density= $1.00\text{E}+00 \text{ kg/L}$ = $1.00\text{E}+03 \text{ kg/m}^3$ = $1.00\text{E}+06 \text{ g/m}^3$. Mass of water used= $3.28\text{E}+14 \text{ g/yr}$. Unit price= 1.39 €/m^3 . Total water cost= $4.56\text{E}+08 \text{ €/yr}$.
- 15 Main Food Items** (all data from [ISMEA, 2005] unless specified).
- 15a Fish. Total fish used= $1.80\text{E}+10 \text{ g/yr}$. Total cost= $1.56\text{E}+08 \text{ €/yr}$
- 15b Meat. Total meat used= $6.83\text{E}+10 \text{ g/yr}$. Total cost= $4.76\text{E}+08 \text{ €/yr}$
- 15c Fruits and Vegetables. Total fruits and vegetables used= $2.43\text{E}+11 \text{ g/yr}$. Total cost= $3.33\text{E}+08 \text{ €/yr}$
- 15d Milk, cheese and other dairy products. Total milk, cheese and other dairy products used= $1.49\text{E}+11 \text{ g/yr}$. Total cost= $3.77\text{E}+08 \text{ €/yr}$
- 15e Cereals and derivatives. Total cereals and derivatives used= $1.33\text{E}+11 \text{ g/yr}$. Total cost= $3.15\text{E}+08 \text{ €/yr}$.
- 15f Wine and alcoholics. Total wine and alcoholics used= $3.83\text{E}+10 \text{ g/yr}$. Total cost= $7.29\text{E}+07 \text{ €/yr}$.
- 15g Olive and seed oils. Total oils and seed oils used= $1.95\text{E}+10 \text{ g/yr}$. Total cost= $6.59\text{E}+07 \text{ €/yr}$.
- 16 Steel and Iron.** Total used= $2.48\text{E}+12 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.08\text{E}+09 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 17 Copper.** Total used= $4.98\text{E}+10 \text{ g/yr}$ [ASSOMET, 2002]. Total cost= $1.38\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [CCIAA Roma, 2003]
- 18 Alluminium.** Total used= $6.71\text{E}+10 \text{ g/yr}$ [ASSOMET, 2002]. Total cost= $1.30\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [CCIAA Roma, 2003]
- 19 Cement (Portland).** Total used= $1.97\text{E}+12 \text{ g/yr}$. [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.21\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 20 Rocks and Sediments for Building Sector.** Total used= $1.62\text{E}+13 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.80\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 21 Glass.** Total used= $2.35\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [Assovetro, 2003]. Total cost= $1.28\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [CCIAA Roma, 2003]
- 22 Plastics.** Total used= $5.60\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $9.48\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 23 Asphalt.** Total used= $1.46\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $6.19\text{E}+06 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 24 Chemicals.** Total used= $1.52\text{E}+12 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.11\text{E}+09 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 25 Wood.** Total used= $5.94\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.60\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 26 Textiles.** Total used= $5.13\text{E}+10 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $1.36\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002]
- 27 Paper and Derivatives.** Total used= $4.88\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [Inceneritorizero, 2002]. Total cost= $4.10\text{E}+08 \text{ €/yr}$ [CCIAA Roma, 2003].
- 28 Fertilizers.** Total used= $2.69\text{E}+11 \text{ g/yr}$ [ISTAT, 2002]. Total cost= $3.32\text{E}+07 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2002].
- 29 Imported Labor (Commuters).** Daily commuters from nearby villages and countryside deliver work in support to city dynamics and economy. This work is at least partially supported by additional energy flows outside the city. Number of workers= $2.54\text{E}+05 \text{ people/yr}$ (our estimate based on the conservative assumption that daily commuters are about 10% of total Rome's population)
- 30 Services.** Services is a misure of indirect labor performed outside of the sistem in order to make and deliver imported goods and commodities. Services are expressed in money terms (€, \$...) and calculated as the total cost of imports. Services are converted into emergy (seJ) by multiplying by the emergy to money ratio (seJ/€) of the country in the year under investigation. Total value of services= $1.19\text{E}+10 \text{ €/yr}$ [Sum of costs of Items from 8 to 28]
- 31 Financing.** Governmental money for salaries= $5.05\text{E}+09 \text{ €/yr}$ [ISTAT, 2006]. Governmental funding for public services= $1.14\text{E}+09 \text{ €/yr}$ [Comune Roma, 2003b]. Total money from Government= $6.19\text{E}+09 \text{ €/yr}$.
- 32 Tourism.** Number of tourists= $1.91\text{E}+07 \text{ units/yr}$ [Comune Roma, 2004b]. Permanence days (average) per person= 2.69 days [Comune Roma, 2004b]. Exchange ratio \$/€ 2002= 0.945385 \$/€ [X-Rates, 2002: <http://www.x-rates.com/d/USD/EUR/hist2002.html>]. Daily expenses per person (average)= 95.48 \$/day [DOXA, 2003]. Total money from tourists= $4.91\text{E}+09 \text{ €/yr}$.

Output: Population supported for one year ($\text{people} \cdot \text{yr}^{-1}$) and yearly GDP assumed as products of city dynamics in the investigated year 2002.

Population of Rome= 2540829 Units/yr [CCIAA Roma, 2004].

GDP of Rome= $5.75\text{E}+10 \text{ €/yr}$ (Our calculation based on a VAT-Value Added Tax percentage value equal to 0.07) [CCIAA Roma, 2004 and Comune Roma, 2005]

Further Footnotes of Table 4.10, in addition to footnotes above.

Area of Rome: 128530.6 ha = $1.29 \times 10^9 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]

- 1 Solar radiation:** Solar energy received = (avg. insolation)(1-albedo)(area)(365 day/yr)(4186 J/kcal). Insolation (average) = 1737.4 kWh/m²/yr [ISTAT, 2002] = $6.25 \times 10^9 \text{ J/m}^2/\text{yr}$. Albedo = 0.2. Urban area = $1.29 \times 10^9 \text{ m}^2$. Total solar energy received = $6.43 \times 10^{18} \text{ J/yr}$.
- 2 Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface):** Wind energy = (density)(drag coeff.)(geostrophic wind velocity)³(area)(sec/year). Air density = 1.3 kg/m³. Wind speed (average 2002) = 2.175 m/s [Comune Roma, 2004a]. Geostrophic wind = 5.2 m/s. Drag coefficient = 3.00×10^{-3} . Area = $29 \times 10^9 \text{ m}^2$; sec/year = $3.15 \times 10^7 \text{ s/yr}$. Total wind energy = $2.22 \times 10^{16} \text{ J/yr}$.
- 3 Evapotranspiration (Chemical Potential Energy):** Evapotranspiration energy: (land used)(Evapotranspiration rate)(density)(Gibbs Free Energy per gram).
 A) Land covered by forest = 9726 ha; land used for wood farm = 112.8 ha; Land used for fruit production = 1798.1 ha. Total area covered by trees = 11636.9 ha = $1.16 \times 10^8 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.559 m/yr [calculated after Ulgiati et al., 1994]. Density water = $1.00 \times 10^6 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $3.08 \times 10^{14} \text{ J/yr}$.
 B) Land covered by pasture = 5227.9 ha = $5.23 \times 10^7 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.728 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00 \times 10^6 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $1.81 \times 10^{14} \text{ J/yr}$.
 C) Land covered by crops = 30016.2 ha = $3.00 \times 10^8 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.694 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00 \times 10^6 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $1.48 \times 10^{15} \text{ J/yr}$.
- 4 River geopotential energy:** Geopotential energy received (relative to sea level) = (flow vol.)(density)(height at entry) (gravity). Volume flow = 150 m³/s [<http://it.wikipedia.org/wiki/Tevere>] = $4.73 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{yr}$. Density water = $1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. Height at entry = 30 m (Our estimate). Gravity = 9.81 m/s^2 . Total geopotential energy received (relative to sea level) = $1.39 \times 10^{15} \text{ J/yr}$.
- 5 Wave Energy delivered on shore:** Wave energy = (Parallel component of shore length)(Front Wave Energy)(time in s/yr). Coast Length = $1.93 \times 10^4 \text{ m}$ [<http://www.osservatoriomare.lazio.it/>]. Component of length parallel to front wave = 11001 m (Our estimate). Front wave energy = $2.20 \times 10^4 \text{ w/m}$ [Couper, 1990]. Time = $3.15 \times 10^7 \text{ s/yr}$. Total wave energy delivered = $7.62 \times 10^{15} \text{ J/yr}$.
- 6 Tidal Energy (half of tidal energy is supposed to be absorbed at the shelf):** Tidal Energy = (shelf)(0.5)(tides/yr)(mean tidal range)²(density of seawater)(gravity). Coast Length of Italy (Including Islands) = $7.38 \times 10^6 \text{ m}$ [ISTAT, 2003]. Continental Shelf Area of Italy = $1.44 \times 10^{11} \text{ m}^2$ [WRI, 1990]. Continental Shelf Area of Rome = $3.77 \times 10^8 \text{ m}^2$ (Proportional calculation on Italy data base). Avg. Tide Range = 0.30 m [IIM, 1992]. Density = $1.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ [Couper, 1990]. Tides/year = 7.30×10^2 (2 tides/day in 365 days). Total tidal energy = $1.24 \times 10^{14} \text{ J/yr}$.
- 7 Loss of Topsoil** (areas with mature untouched vegetation are assumed to have little net gain or loss of topsoil): Energy of net loss = (net loss)(% org.in soil)(5.0 Kcal/g)(4186 J/kcal). Farmed area subject to erosion = $4.10 \times 10^8 \text{ m}^2$ [<http://www.urbanistica.comune.roma.it/attachment/516171D1.pdf>]. Erosion rate of farmed area = $1.50 \times 10^3 \text{ g/m}^2/\text{yr}$. Fraction of organic matter in soil = 3.00% [Odum, 1996]. Energy cont. per g organic = 5.00 kcal/g [Odum, 1996]. Net loss = (farmed area)(erosion rate) = $6.15 \times 10^{11} \text{ g/yr}$. Total energy of net loss = $3.86 \times 10^{14} \text{ J/yr}$ (energy content of degraded organic matter in soil).

References of transformities used in Table 4.10

(Values published prior to the year 2000 were updated according to the new biosphere emergy baseline, Odum, 2000).

[a] After Odum, 1996; [b] Odum, 2000; Odum et al., 2000; [c] Brown and Ulgiati, 2004; [d] Brown and Arding, 1991; [e] after Ulgiati et al., 1994; [f] after Bargigli et al., 2003; [g] Bargigli, 2004; [h] Haukoss, 1995; [i] Cialani et al., 2005; [l] Weighed average of Emergy/Money ratios of countries which tourist come from (online database for selected national economies, http://sahel.ees.ufl.edu:80/database_resources.php).

Capitolo 5

EVOLUZIONE TEMPORALE DEGLI INDICATORI

5.1 Introduzione

In questo capitolo verrà illustrato lo studio del sistema urbano di Roma effettuato secondo una progressione a cadenza decennale che ha lo scopo di analizzare l'evoluzione degli indicatori utilizzati nel precedente capitolo per l'arco di tempo che va dal 1962 al 2002. Gli anni presi a riferimento sono in particolare: 1962, 1972, 1982, 1992 e naturalmente il 2002. Per ciascuno degli anni indicati è stata portata a termine lo stesso tipo di analisi svolta nel precedente capitolo per l'anno 2002. I dati e le tabelle di ciascun anno, e relative a ciascun grafico e istogramma di questo capitolo (nonché tutte le procedure di calcolo), sono riportati nell'Appendice al termine del capitolo stesso, in modo da lasciare più spazio alla discussione focalizzata sullo studio dell'evoluzione degli indicatori, e fare luce sulle modalità di variazione degli stessi rispetto alle dinamiche di sviluppo che hanno caratterizzato il sistema urbano di Roma nell'arco di tempo di quaranta anni. Per meglio evidenziare le variazioni temporali degli indicatori, sono state determinate e tracciate curve di interpolazione con l'ausilio del programma excel. Le curve determinate, rappresentano quindi le curve meglio adattate che interpolano i punti corrispondenti ai dati sperimentali. All'interno dei rispettivi grafici sono riportate anche le funzioni rappresentative di tali curve (x rappresenta il tempo ed y la variabile volta per volta analizzata) ed il coefficiente di correlazione al quadrato (R^2) che fornisce informazioni sul grado di adattamento della curva ai punti.

Più volte gli andamenti nel tempo dei vari indicatori sono rappresentati anche mediante istogrammi ripartiti per diverse categorie, così da mostrare l'influenza e il ruolo di ogni specifica categoria sull'andamento complessivo. La suddivisione per categorie di riferimento cambia da un indicatore all'altro in modo da favorire le "performance" del particolare tipo di indicatore relativamente alle proprie capacità descrittive e rispetto alle specifiche prospettive sulle quali è in grado di far luce.

L'indicatore di riferimento di tutte le analisi più convenzionali è sempre stato il Prodotto Interno Lordo (PIL o GDP), il cui andamento a Roma nel periodo considerato è mostrato nella Figura 6.1, denotando una crescita molto sostenuta fino al rilevamento più recente (tra l'altro in controtendenza rispetto ai valori medi nazionali. Tale indicatore, spesso criticato per la sua scarsa capacità di discriminare in base alla qualità della crescita e di considerare i fattori ambientali, resta comunque il riferimento di tutti coloro che (economisti o meno) analizzano serie storiche di dati in sistemi socio/economici e demografici. Nonostante la sua eccessiva

aggregazione e la sua definizione teorica puramente economica e nonostante i tentativi di sostituirlo con altri indicatori più sofisticati, il PIL mostra con chiarezza l'andamento dell'attività economica di una data società, al di là di valutazioni di merito relative al tipo di crescita, alle risorse usate e alla sostenibilità dell'intero processo.

Cercheremo dunque di affiancare al PIL altri indicatori bio-fisici che aiutino a guardare "dentro" il processo, senza pretendere di sostituirlo in ambiti che sono al di fuori delle finalità di questo lavoro. La crescita del PIL a Roma è ovviamente alimentata dall'uso delle risorse che affluiscono alla città e dunque è a tali risorse che rivolgeremo la nostra indagine, prendendo anche in considerazione l'impatto che tale uso può avere sull'ambiente esterno al sistema urbano (con particolare attenzione alle categorie di impatto: esaurimento delle risorse e rilasci in atmosfera).

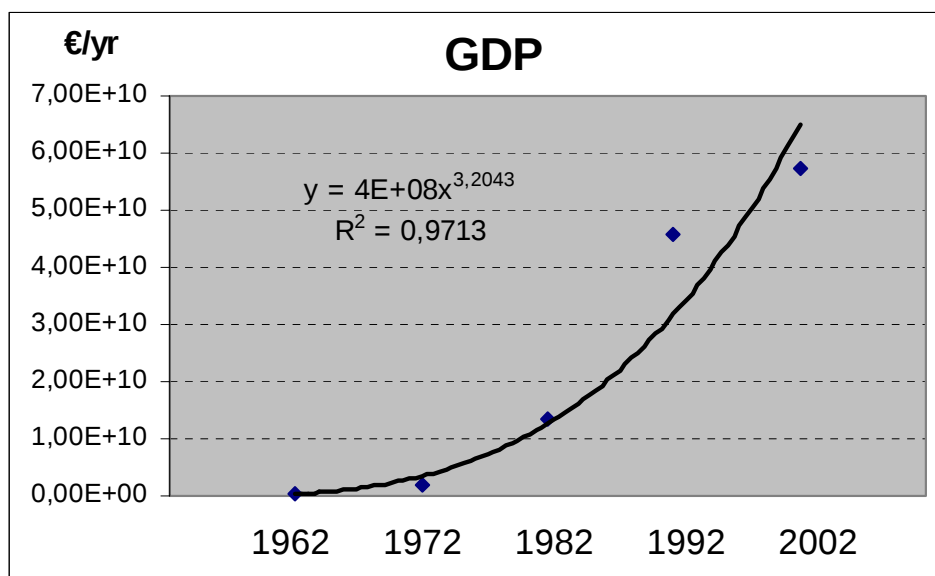


Figura 5.1

Curva di interpolazione mostrante l'andamento del GDP nel tempo.

5.2 Indicatori di massa

La curva di Figura 5.2 mostra l'andamento del consumo di materiale abiotico fatto a livello strettamente locale. Come si vede la curva di interpolazione mostra un andamento di tipo polinomiale del secondo ordine. Se la confrontiamo con la curva di interpolazione di Figura 5.3, la quale mostra l'andamento dello stesso indicatore sulla scala globale, si nota chiaramente che la materia abiotica a livello globale presenta in termini assoluti valori decisamente superiori rispetto a quelli rappresentativi della materia abiotica consumata localmente (Figura 5.2). Tuttavia la crescita nel tempo del consumo di materiale abiotico sulla scala globale segue un andamento meno rapido di quello di una retta. Pertanto, sebbene il quantitativo di materia abiotica consumato all'interno della città cresca ancora quadraticamente, a livello globale sembra verificarsi un rallentamento di tale crescita. I due andamenti suggeriscono due considerazioni:

- a) ogni consumo materiale interno alla città si ripercuote a livello globale con una amplificazione anche di 3-4 volte. Ciò significa depositi minerari ed energetici

- sfruttati, territori alterati, trasporti effettuati, enormi quantità di materiale degradato e rifiuti prodotti anche molto lontano dal luogo di utilizzo del prodotto finale;
- b) la diversa velocità di crescita della curva del consumo abiotico a livello globale potrebbe spiegarsi con un cambiamento del mix di materiali utilizzati, con il passaggio graduale da maggiori quantità di materiali ad elevato “zaino ecologico” abiotico verso materiali a minore intensità. Tale tendenza, come illustrato nella Figura 5.25, è una tendenza media mondiale, ma chiaramente essa è determinata dal comportamento dei sistemi urbani più sviluppati. A Roma i materiali ad elevata intensità di materiale abiotico indiretto continuano a crescere, ma all’interno del mix crescono di più quelli caratterizzati da minore degradazione di materia indiretta, come può desumersi da un attento esame della figura 5.4 e della relativa Tabella 1 del Capitolo 4.

In Figura 5.4 è infatti rappresentato l’andamento della crescita della Domanda Totale di Massa (TMR, Total Material Requirement), espresso in grammi pro capite, ripartita per le proprie categorie di riferimento. In particolare la brusca impennata dal ’62 al ’72 (Figura 5.4) che vede interessati soprattutto l’acciaio, il cemento ed i materiali da costruzione (che tra l’alto mostrano i valori più elevati), è probabilmente attribuibile al boom edilizio verificatosi proprio a cavallo tra gli anni sessanta e gli anni settanta. Dopo tale periodo, il consumo di questi materiali continua a crescere ma ad un ritmo più lento.

E’ importante osservare che la degradazione indiretta di materiale abiotico non riguarda solo il materiale abiotico consumato all’interno del sistema. Anche l’acqua ha uno “zaino ecologico” di tipo abiotico, consistente nel materiale da costruzione degli acquedotti, nelle pompe, nell’energia fossile utilizzata; anche l’elettricità ha uno zaino ecologico formato dai combustibili fossili e dal materiale degli impianti elettrici; anche il cibo ha un suo zaino ecologico determinato dai combustibili, dai macchinari e dai fertilizzanti utilizzati per la sua produzione. Analogamente, rivolgendo la nostra attenzione all’Intensità Materiale Fattore Acqua, non dobbiamo trascurare che anche prodotti chiaramente abiotici come il cemento, l’acciaio, la benzina, hanno un loro zaino ecologico/fattore acqua piuttosto consistente.

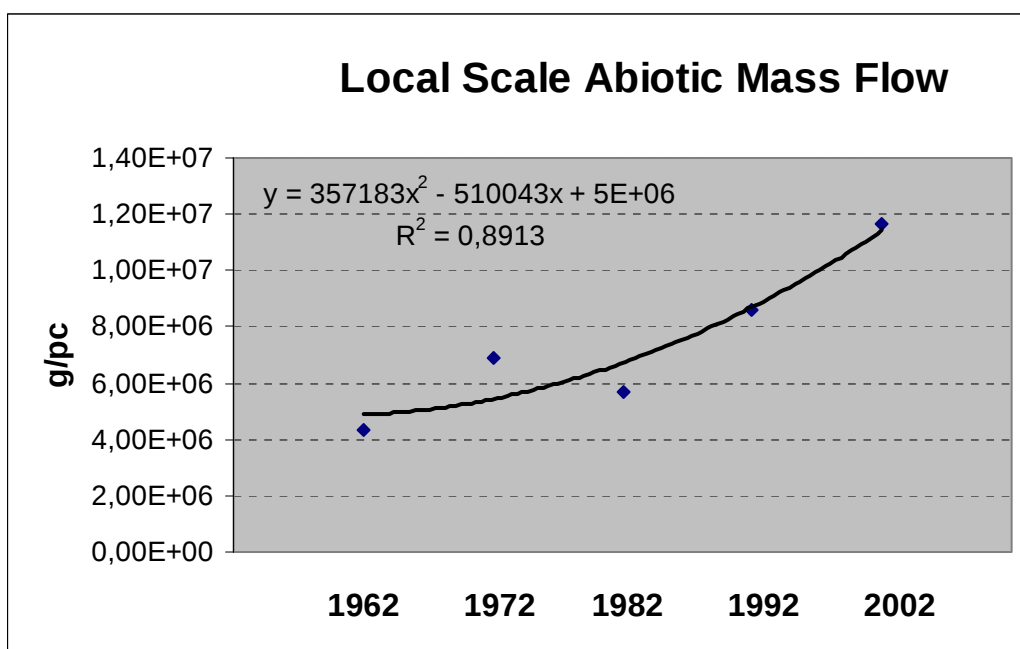


Figura 5.2

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento pro capite nel tempo del flusso di massa abiotico impiegato localmente.

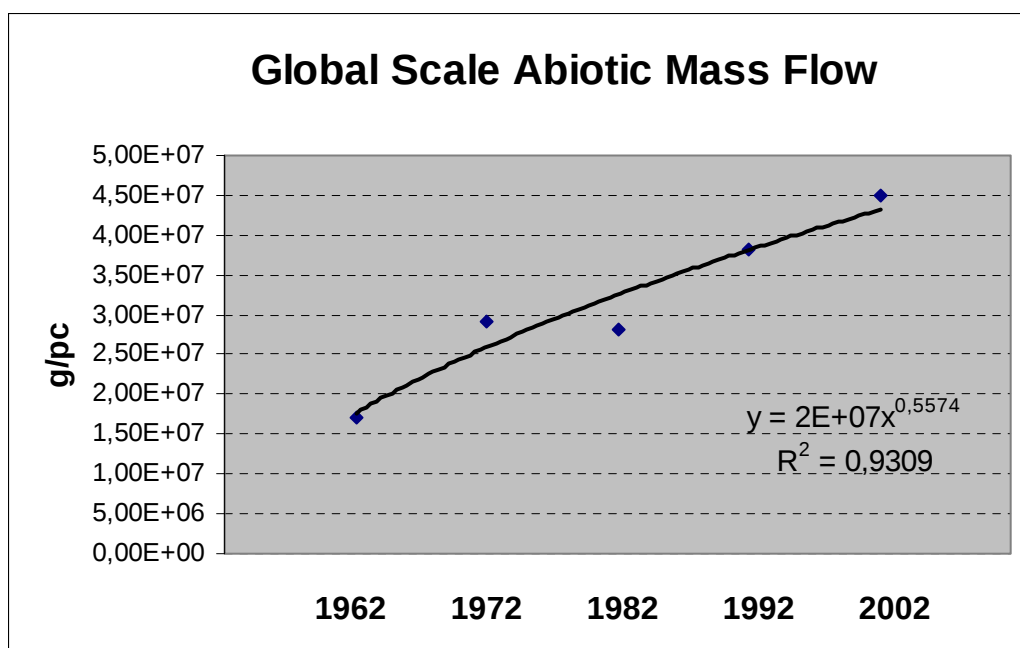


Figura 5.3

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento pro capite nel tempo del flusso di massa abiotico impiegato globalmente.

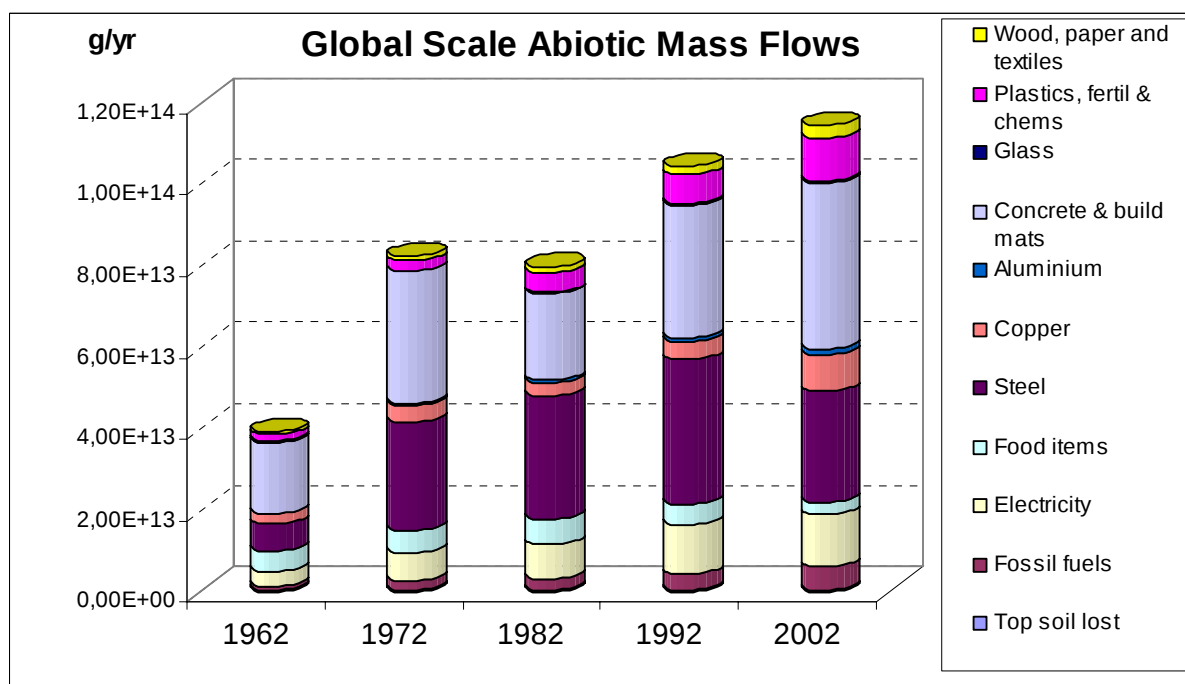


Figura 5.4

Flussi di materia degradata globalmente, suddivisi per anno e per categorie.

Tenendo conto di questa considerazione, possiamo rivolgere la nostra attenzione ai consumi diretti di acqua e a quelli indiretti, ossia all'acqua incorporata negli altri beni consumati. A differenza della materia abiotica l'acqua utilizzata a livello locale sembra addirittura mostrare una crescita più lenta rispetto a quella relativa alla scala globale (Figure 5.5 e 5.6). Sebbene l'andamento domanda globale di acqua sia dello stesso tipo di quello della domanda globale di materia abiotica (le curve di interpolazione sono dello stesso tipo e l'esponente della x è pressoché identico), risulta evidente che il consumo d'acqua all'interno della città cresce più lentamente della quantità di acqua che la città consuma complessivamente in modo indiretto, a livello globale, nei processi produttivi necessari a garantire i beni di cui Roma usufruisce (Figura 5.6). Naturalmente anche qui va notata la differenza in termini assoluti tra l'acqua consumata a livello locale e quella consumata a livello globale (Figura 5.5 e 5.6), quest'ultima superiore di un fattore variabile tra 4 e 6 volte. Ciò si evince molto bene anche dalla Figura 5.7 che mostra la ripartizione nel tempo della domanda di acqua tra le varie categorie di riferimento. La Figura 5.7 mostra chiaramente che la frazione di acqua consumata direttamente all'interno della città (*Aqueduct Water*) decresce nel tempo rispetto all'acqua che la città consuma globalmente attraverso i processi industriali necessari a produrre i diversi beni consumati a Roma. La Figura 5.8 mostra come cambia nel tempo il rapporto tra l'acqua localmente utilizzata e quella globalmente consumata. La curva di interpolazione decresce secondo l'andamento di una parabola. La percentuale di acqua utilizzata a Roma rispetto a quella complessivamente consumata passa da un valore del 27% nel 1962 al valore del 16% nel 2002. Come si vede ancora dalla Figura 5.7 il maggior consumo di acqua a livello globale è dovuto alla produzione di energia elettrica ed alla produzione dell'acciaio, nonché ad una domanda via via crescente di prodotti chimici e plastici.

Nel caso dell'acqua si assiste col tempo ad un andamento opposto a quello evidenziato dai flussi di massa abiotici. Il cambiamento del mix di prodotti utilizzati va nella direzione di prodotti a maggior contenuto indiretto di acqua (Figura 5.7 e relativa Tabella 4.1 del Capitolo 4), come è testimoniato, ad esempio, dal maggiore uso di elettricità. E' chiaro che il

comportamento più o meno virtuoso della città genererà un impatto a monte sul prelievo e sulla degradazione di materialabiotico e di acqua sulla scala globale, con tutte le conseguenze ambientali che ne possono derivare (ad esempio, il prelievo di acqua per rafferdare un impianto elettrico – ossia elevato fattore acqua per l'elettricità - può determinare carenze di acqua per l'irrigazione o l'impoverimento della falda).

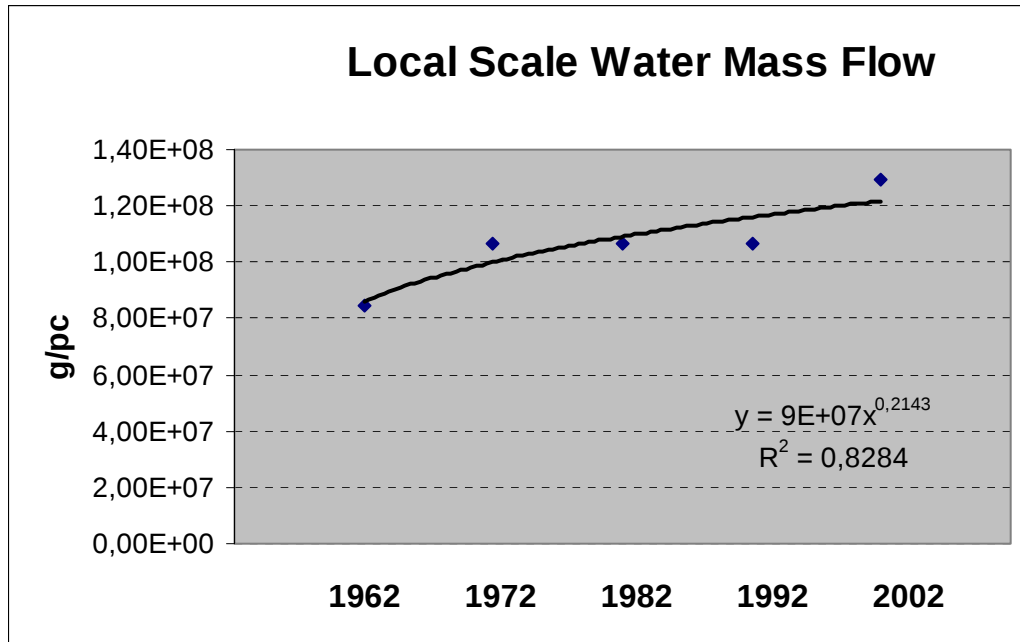


Figura 5.5

Curva di interpolazione rappresentante il consumo locale pro capite di acqua nel tempo.

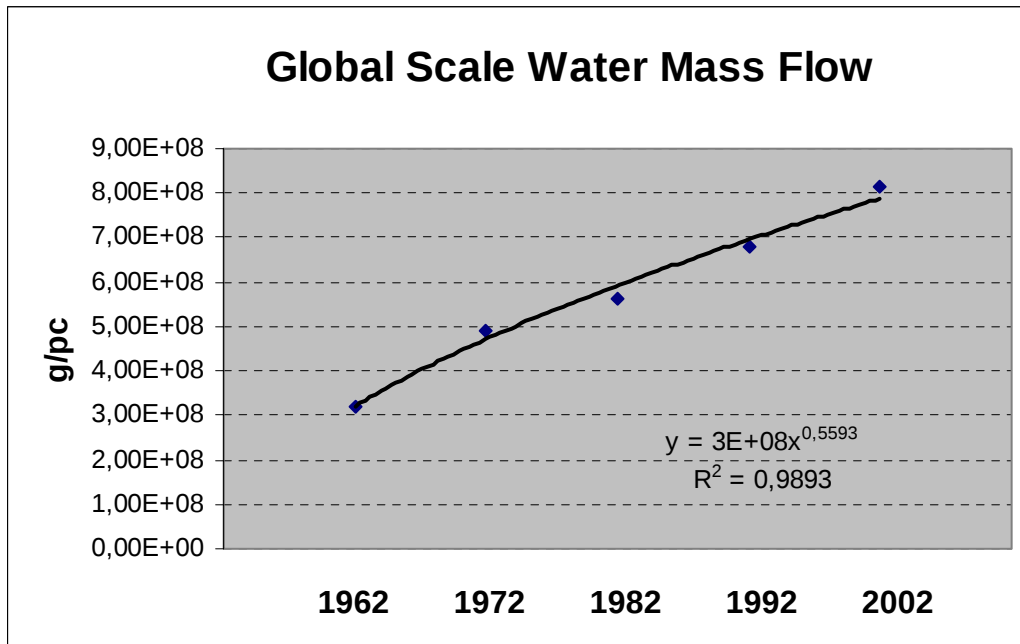


Figura 5.6

Curva di interpolazione rappresentante il consumo globale pro capite di acqua nel tempo.

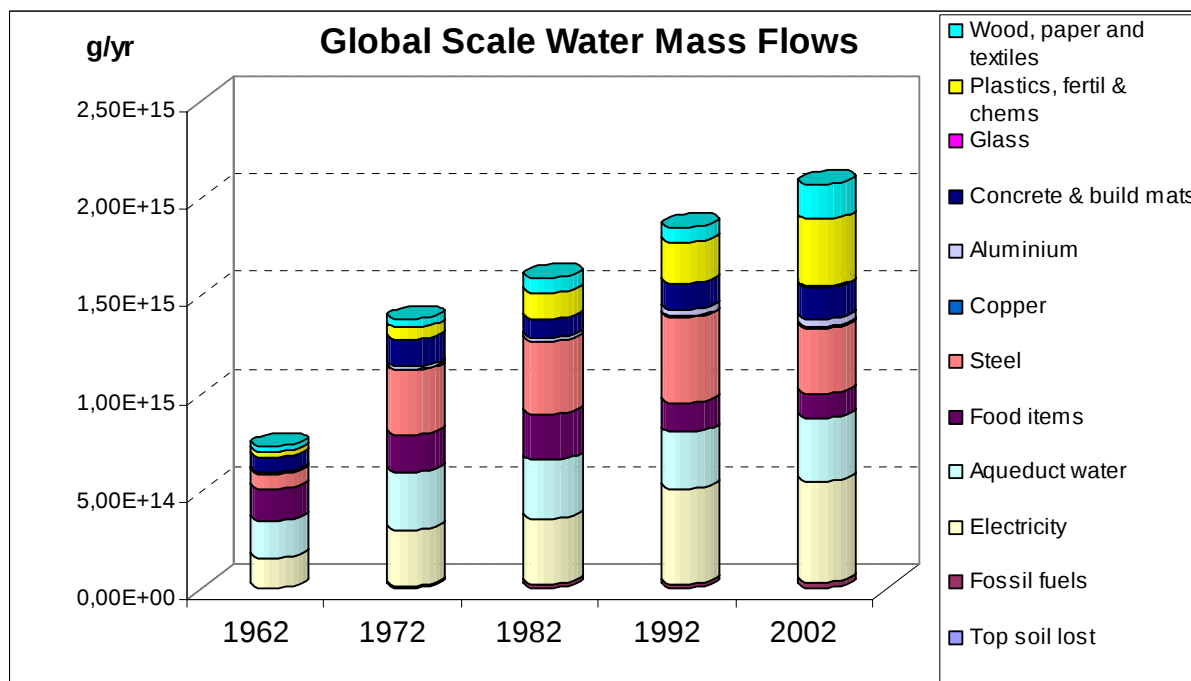


Figura 5.7
Consumo globale di acqua suddiviso per anno e per categorie.

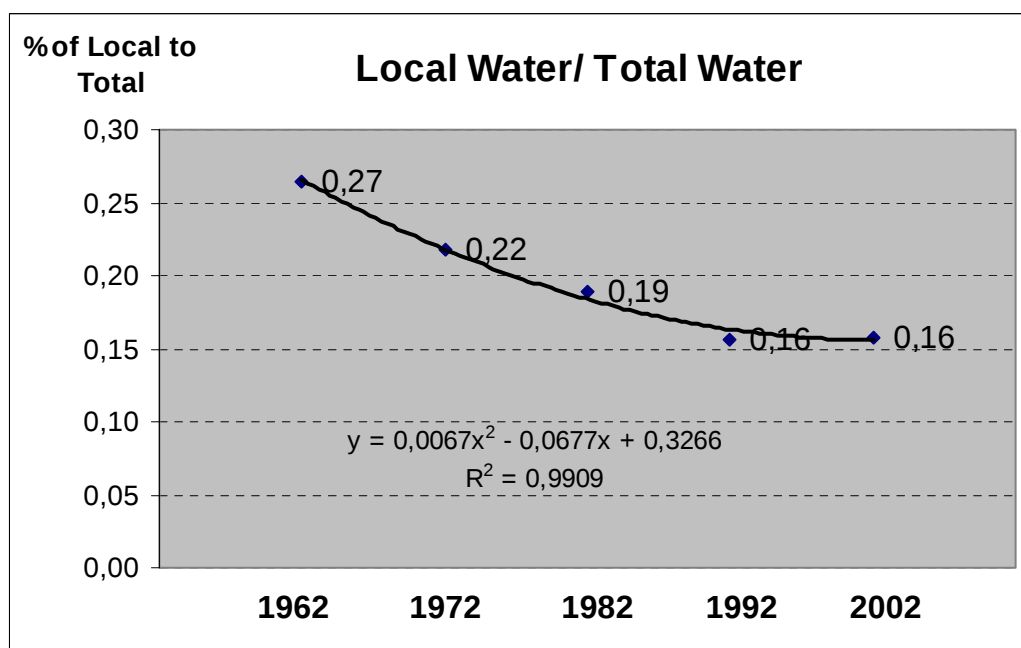


Figura 5.8
Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo del rapporto tra acqua consumata localmente e acqua consumata globalmente.

5.3 Indicatori energetici

La Figura 5.9 mostra il consumo energetico pro capite effettuato entro la città ed il consumo pro capite di energia causato indirettamente sulla scala globale a causa del metabolismo

energetico interno alla città stessa. Nel consumo locale sono inclusi tutti i tipi di combustibili fossili utilizzati per diverso uso (benzina, diesel, gas metano, ecc) e l'energia elettrica che la città di Roma consuma per i vari usi compreso quello industriale (piccola impresa artigianale e manifatturiera). L'andamento di tale consumo nel tempo è di tipo parabolico crescente, simile a quello relativo al consumo energetico globale (Figura 5.9). Come già precedentemente osservato il significato del consumo energetico a livello globale si riferisce ai Joules di *petrolio equivalenti* che nel nostro caso la città indirettamente impiega per produrre e rendere disponibili i beni che poi direttamente consuma. Dal confronto delle due curve si coglie immediatamente la sproporzione tra i valori globali e quelli locali.

La Figura 5.10 mostra il consumo energetico globale della città effettuato nei vari anni, ripartito per diverse categorie di riferimento. Da essa si evince chiaramente che le due voci che contribuiscono più delle altre ad un rapido aumento negli anni del consumo energetico globale sono date dai combustibili fossili e dai prodotti chimici e plastici. Questi ultimi in particolare, mostrano un rapido aumento soprattutto negli ultimi anni, a differenza dei combustibili fossili che sembrano far crescere in maniera più regolare la domanda globale di energia. Paradossalmente sono proprio i derivati del petrolio a richiedere la più crescente domanda indiretta di energia. Ancora una volta, il confronto tra le due curve dei consumi energetici diretti e indiretti mostra non solo l'importanza della quantità (aumenti di consumi locali generano più che proporzionali aumenti globali), ma soprattutto l'importanza della qualità (mix di prodotti usati), dovuta al cambiamento della tipologia dei consumi (come si deduce in dettaglio dalla figura 5.10 e dalla relativa Tabella 2 del Capitolo 4). In questo caso, il passaggio è da prodotti a minore intensità energetica a prodotti a maggiore intensità, tali da spingere i consumi globali a livelli fino a 3-4 volte superiori a quelli locali.

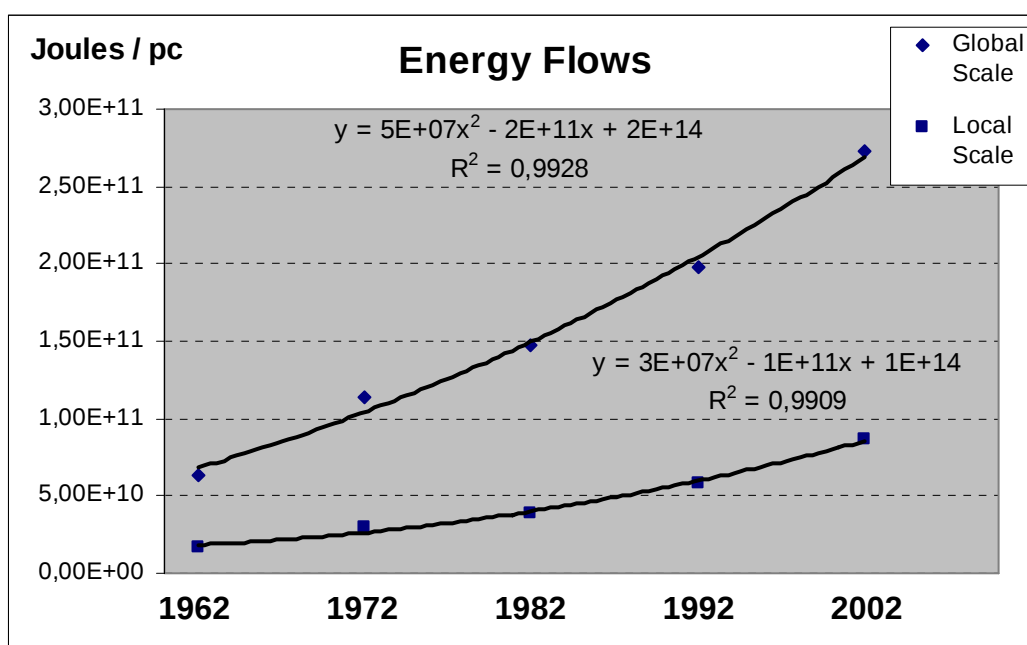


Figura 5.9

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti il consumo pro capite di energia locale e globale nel tempo.

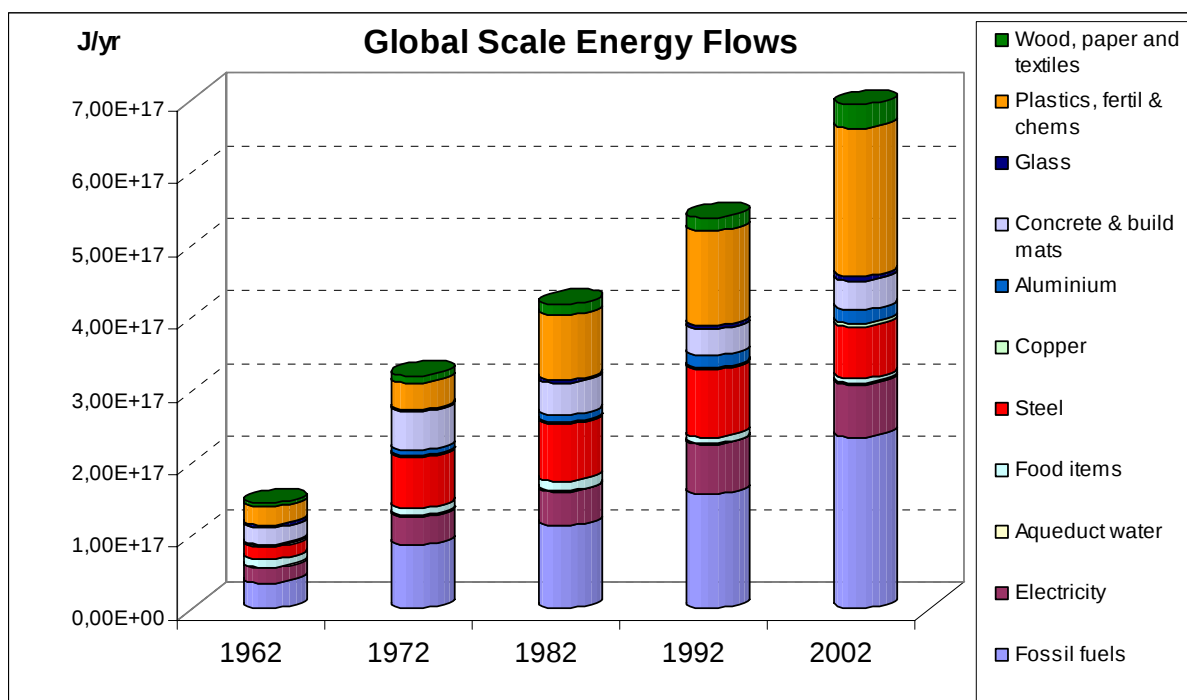


Figura 5.10
Consumo globale di energia suddiviso per categorie e per anno.

5.4 Indicatori di ecological footprint

Anche la crescita dell'Impronta Ecologica pro capite segue negli anni un andamento di tipo parabolico (Figura 5.11). L'Ecological Footprint è, per definizione, un indicatore calcolato solo sulla scala globale. Può tuttavia essere molto utile disaggregare il contributo dovuto ai prodotti alimentari e quello dovuto agli altri beni non-food. Osservando il grafico di Figura 5.12 si nota un'inversione di tendenza tra le categorie di tipo alimentare e le restanti voci rappresentate. Per meglio evidenziare tale differenza sono stati riprodotti due grafici separati rappresentanti l'andamento nel tempo dell'Impronta Ecologica pro capite "food" e "non-food" (Figure 5.13 e 5.14), messi poi a confronto nella Figura 5.15. Il primo grafico valuta l'andamento dell'Impronta Ecologica considerando il solo consumo di beni alimentari; il secondo traccia l'andamento nel tempo dell'Impronta Ecologica considerando tutte le categorie di beni esclusi quelli di tipo alimentare. Come si nota (Figure 5.13) l'andamento nel tempo dell'Impronta Ecologica che dipende dai soli beni di tipo alimentare, è di tipo logaritmico decrescente⁴. Come vedremo meglio nel capitolo successivo, ciò è dovuto sostanzialmente ad un'inversione di tendenza tipica di quelle società che nel tempo divengono via via più opulente. Ovvero se da una parte i consumi di materia e di energia crescono progressivamente, i consumi di tipo alimentare viceversa tendono a diminuire. Se da un lato però il consumo di territorio agricolo e di territorio destinato al pascolo tendono a diminuire, non si può dire altrettanto degli ettari di terra virtuale destinati all'assorbimento della CO₂. Infatti, l'andamento nel tempo del valore dell'Impronta Ecologica che esclude i beni alimentari, presenta una crescita di tipo quadratico (Figura 5.14). Sebbene a tale aumento contribuiscano anche la crescita dell'uso di territorio destinato al prelievo di materiale legnoso (foreste) e l'aumento di superficie edificata (Figura 5.12), ciò che determina in maniera

⁴ Sebbene il coefficiente di correlazione al quadrato mostri un valore non molto alto (Figura 5.13), la curva di interpolazione di tipo logaritmico decrescente è risultata essere comunque la migliore adattata. Tale valore del coefficiente è dovuto ad una forte fluttuazione nel tempo dei quantitativi di generi alimentari consumati.

enormemente maggiore l'impennata della curva di Figura 5.14, è la sempre più crescente domanda di ettari di territorio destinati all'assorbimento della CO₂ generata prevalentemente dai consumi energetici domestici e dal trasporto (Figura 5.12). E' infatti l'uso delle varie categorie di materiali che viene fatto all'interno della città, nonché il consumo di energia, a determinare l'aumento maggiore dell'Impronta Ecologica nel tempo. I processi industriali di produzione dei materiali e dell'energia che Roma consuma, generano infatti a livello globale una emissione di CO₂ la cui crescita vertiginosa richiede una quantità sempre più grande di ettari di superficie virtuale necessari al suo assorbimento. Dalla Figura 5.12 si evince ancora una volta che, anche per questo tipo di indicatore, i prodotti chimici e plastici posseggono un peso determinante. L'Impronta Ecologica legata a tali prodotti mostra una rapida crescita soprattutto negli ultimi anni (Figura 5.12 e relativa Tabella 8 del Capitolo 4). I combustibili fossili, aumentando progressivamente, rappresentano l'altra categoria che fornisce un notevole contributo al valore dell'Impronta Ecologica. Va evidenziato che questi ultimi aumentano il valore dell'Impronta Ecologica sia in modo diretto che indiretto; essi cioè comportano produzione di CO₂ sia a causa dei processi di produzione necessari alla loro distillazione e preparazione sia a motivo della combustione dovuta al loro uso.

Nel valutare l'Impronta Ecologica per i vari anni di riferimento, il presente studio ha tenuto conto del contributo all'aumento della CO₂ dovuto ai processi di produzione di tutti i tipi di materiali utilizzati nella città, inclusi il legno, la carta ed i prodotti tessili per i quali naturalmente è stata calcolata l'Impronta Ecologica anche in termini di territorio agricolo (coltivazione del cotone) e territorio forestale necessari a supportare la loro domanda.

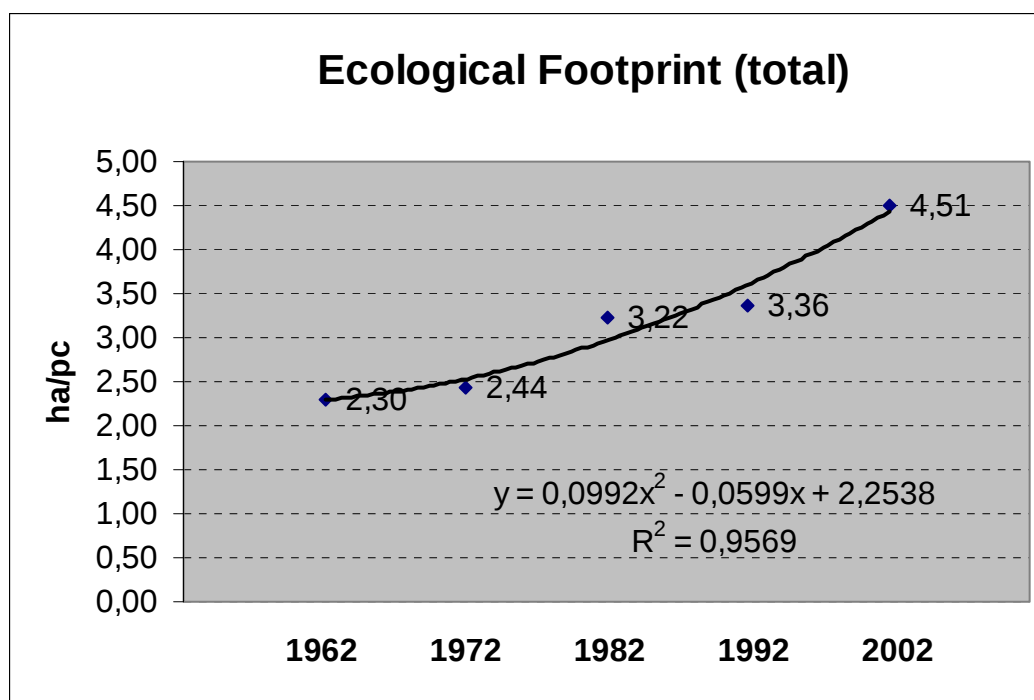


Figura 5.11

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo dell'impronta ecologica pro capite.

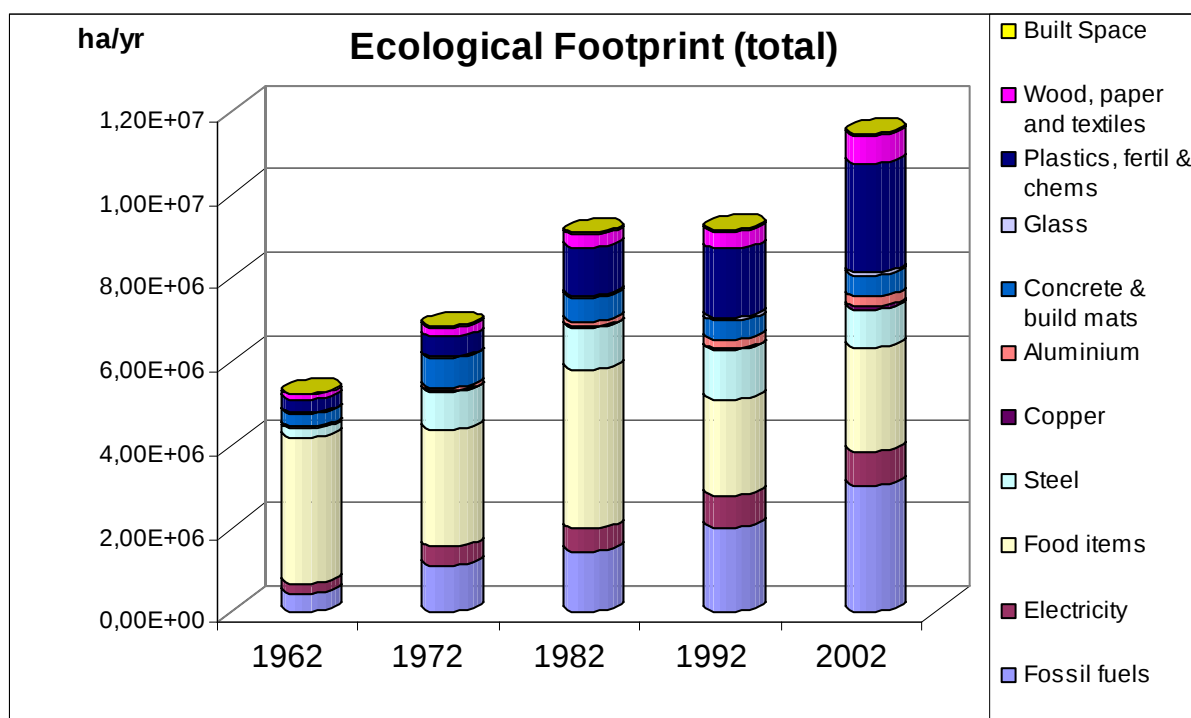


Figura 5.12

Valore dell'impronta ecologica suddiviso per categorie e per anno.

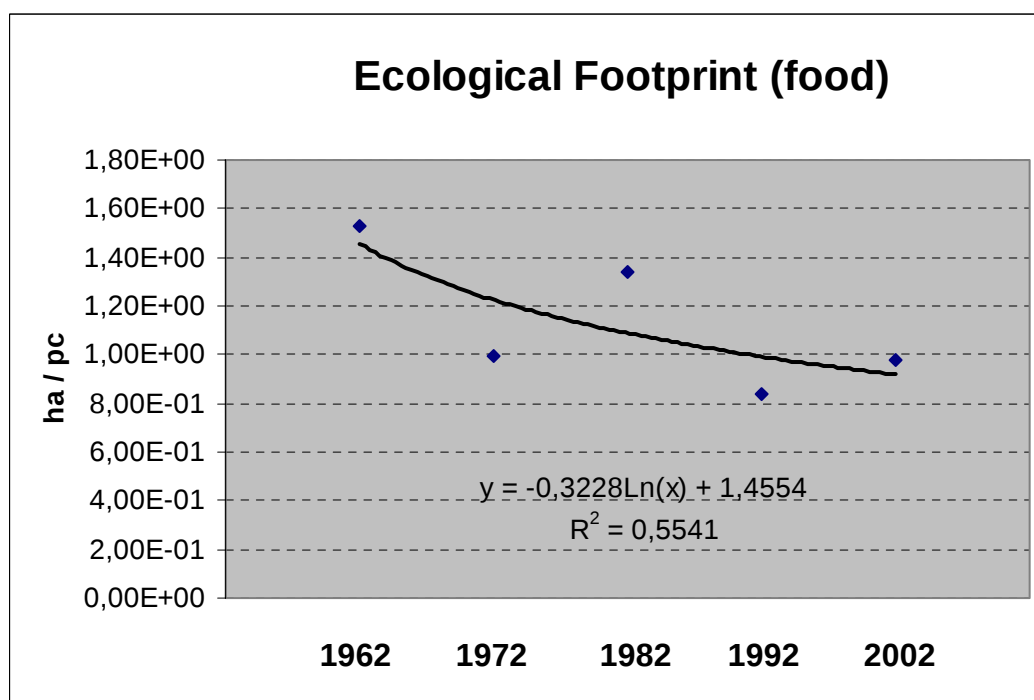


Figura 5.13

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo dell'impronta ecologica pro capite dovuta ai soli generi di tipo alimentare.

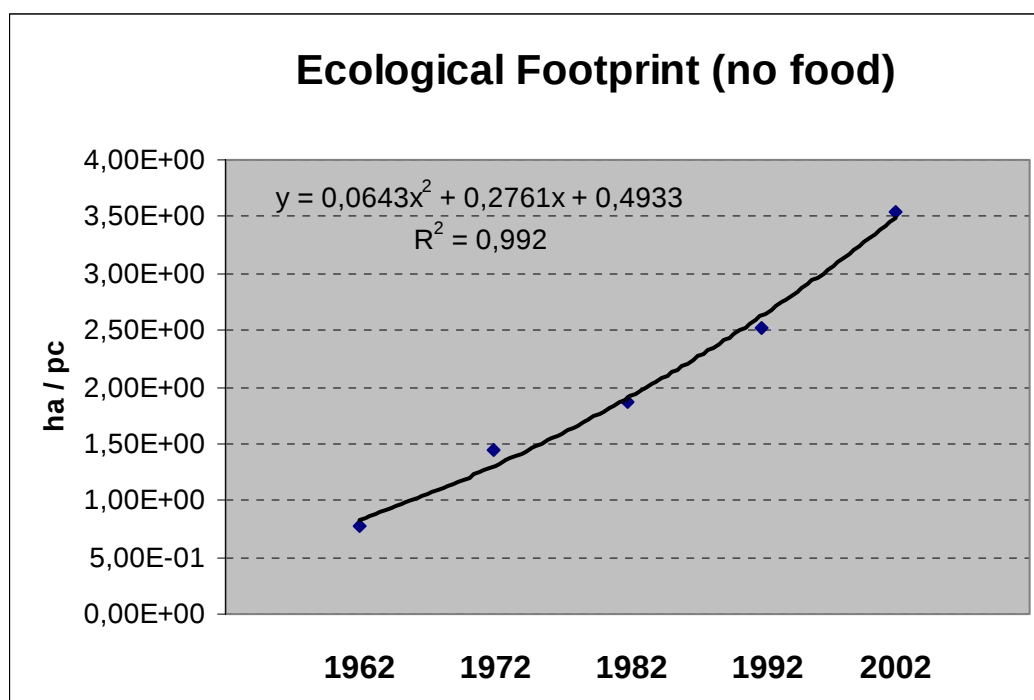


Figura 5.14

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo dell'impronta ecologica pro capite dovuta all'uso di tutti i beni esclusi quelli di tipo alimentare.

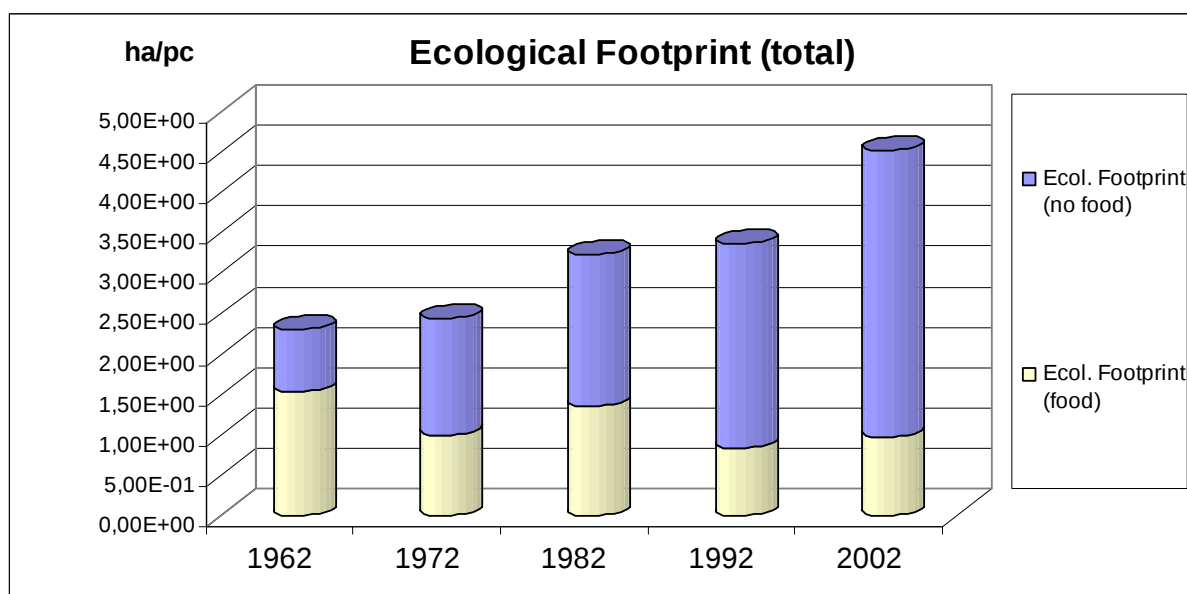


Figura 5.15

Valore dell'impronta ecologica suddiviso per anno e per la categoria alimentare e non alimentare.

5.5 Indicatori energetici

La Figura 5.16 mette in evidenza il cambiamento nel tempo delle varie componenti che contribuiscono alla formazione dell'Energia totale di Roma, in termini percentuali (si

guardino per confronto anche i valori energetici assoluti mostrati in Figura 5.17). Come si vede gli input energetici locali (rinnovabili e non rinnovabili) rimangono sostanzialmente immutati nel tempo, diminuendo di fatto il proprio peso percentuale. Infatti in un sistema urbano in crescita (non territoriale) le variazioni dei servizi ambientali sono trascurabili rispetto a quelle degli input commerciali. Il loro valore energetico è particolarmente basso: questa rappresenta una situazione tipicamente riscontrabile in altri studi energetici dei sistemi urbani moderni pubblicati in letteratura scientifica. Come si vede dalle Figure 5.16 e 5.17 i contributi energetici più significativi sono dati dai beni, dai servizi e dall'energia importata dalla città. In particolare, i servizi (energia incorporata come lavoro indiretto nei processi di produzione delle merci) sono strettamente associati ai beni importati, totalizzando insieme più del 50% dell'emergia totale che alimenta la vita economica e sociale della città. Le due figure indicano con chiarezza l'evoluzione temporale della città, che diviene sempre più un sistema fruitore anziché produttore di beni e servizi. Non inganni l'aumento dei consumi energetici, dovuto ai soli settori domestico e dei trasporti e non ad attività produttive in senso stretto. L'andamento decrescente dei beni di tipo alimentare, riscontrato nel precedente paragrafo mediante il calcolo dell'Impronta Ecologica, risulta essere confermato anche dal punto di vista energetico (Figure 5.16 e 5.17). Resta la domanda circa il ruolo della città. Se la città è un fruitore di beni manufatti e di energia, è lecito chiedersi quale sia il prodotto di questo assorbimento di risorse. Un assorbimento che non sia controbilanciato da un adeguato prodotto a favore del sistema circostante complessivo difficilmente può essere considerato sostenibile: non esiste in natura un componente di un ecosistema che non fornisca ad altri componenti un prodotto o almeno un feedback con funzione di controllo. Come abbiamo già accennato nei primi capitoli e come cercheremo di confermare nel seguito, la città assorbe risorse (esprese come materia diretta e indiretta, energia diretta e indiretta, superficie produttiva reale e virtuale, emergia), genera complessità e fornisce un particolare tipo di prodotto, l'informazione (cultura, leggi, know-how, progettualità, diversità sociale), che esercita un ruolo di organizzazione e controllo su tutti i livelli del sistema circostante, a monte e a valle. I modi per misurare tale informazione e connetterne l'andamento ai flussi di risorse in ingresso possono essere i più diversi e torneremo su questo aspetto nel prossimo capitolo.

La Figura 5.18 mostra l'andamento negli anni dei principali indicatori energetici, ciascuno dei quali capace di fornire una particolare indicazione circa le prestazioni del sistema, le sue relazioni con il sistema esterno, le sue potenzialità di ulteriore sviluppo, la sua sostenibilità in rapporto con la qualità delle risorse disponibili. L'Energia pro capite (Figura 5.18.a, una misura del potenziale medio di sviluppo) e la densità energetica (Figura 5.18.b, una misura dei vincoli imposti dal territorio) crescono nel tempo in maniera simile, con una rapidità di poco inferiore a quella di una retta, mentre il valore dell'Energia per unità di prodotto monetario (Figura 5.18.c, una misura di efficienza della conversione delle risorse in prodotto economico) decresce quadraticamente nel tempo. I primi due casi mettono in evidenza ancora una volta che il sistema urbano è mediamente in crescita, ossia che la quantità energetica di cui potenzialmente ogni individuo gode e la concentrazione di emergia di cui ogni metro quadrato di città è mediamente investito aumentano progressivamente. Il terzo caso invece mette in luce il fatto che se da un lato il sistema aumenta nel tempo la sua disponibilità economica (Figura 5.1), riesce anche ad accrescere l'efficienza della conversione di risorse in prodotto monetario. Se ciò sia dovuto a maggiore efficienza tecnologica, oppure a fenomeni inflattivi che accrescono il capitale monetario circolante oppure semplicemente alla creazione di meccanismi di mercato che attribuiscono sempre maggiore valore ai beni manufatti anziché alle risorse primarie, richiederebbe una ulteriore indagine, basata sulla disaggregazione degli andamenti dei fattori che compongono l'indice di Figura 5.18.c. In merito alla Figura 5.18.b, è interessante osservare la collocazione della città di Roma, nel suo insieme, nella graduatoria

di densità energetica pubblicata da Brown e Vivas (2005), Tabella 5.1. Questi autori hanno calcolato la densità energetica per ettaro per anno di una serie di sistemi naturali e tecnologici, ordinandoli poi secondo il logaritmo naturale della stessa, individuando un “Landscape Development Intensità Index” crescente a partire da sistemi completamente naturali a sistemi pesantemente tecnologici, come indicato in Tabella 5.1. Nel caso di Roma, il valore 2002 della densità energetica porta a un indice di intensità di sviluppo sul territorio pari a 9.28, che la collocherebbe – come molte altre metropoli di paesi sviluppati – nella parte alta della graduatoria di intensità territoriale. Tale collocazione indica una notevole distanza dalla situazione ambientale “incontaminata” e mostra un non trascurabile potenziale di diminuzione di intensità qualora si intendesse perseguire un riequilibrio della città con il proprio ambiente di riferimento.

Land use	Nonrenewable empower density (E14 sej/ha/yr)	Ln Nonrenewable empower density
Natural system	0.00	
Natural open water	0.00	
Pine plantation	5.10	1.63
Recreational / open space – low-intensity	6.55	1.88
Woodland pasture (with livestock)	8.00	2.08
Improved pasture (without livestock)	17.20	2.84
Improved pasture – low-intensity (with livestock)	33.31	3.51
Citrus	44.00	3.78
Improved pasture – high-intensity (with livestock)	46.74	3.84
Row crops	107.13	4.67
Single family residential – low-density	1077.00	6.98
Recreational / open space – high-intensity	1230.00	7.11
Agriculture – high intensity	1349.20	7.21
Single family residential – medium density)	2175.00	7.68
Single family residential – high density	2371.80	7.77
Mobile home (medium density)	2748.00	7.92
Highway (2 lane)	3080.00	8.03
Low-intensity commercial	3758.00	8.23
Institutional	4042.20	8.30
Highway (4 lane)	5020.00	8.52
Mobile home (high density)	5087.00	8.53
Industrial	5210.60	8.56
Multi-family residential (low rise)	7391.50	8.91
High-intensity commercial	12 661.00	9.45
Multi-family residential (high rise)	12 825.00	9.46
Central business district (average 2 stories)	16 150.30	9.69
Central business district (average 4 stories)	29 401.30	10.29

Tabella 5.1

Classificazione di uso del suolo in funzione della densità energetica (Brown e Vivas, 2005).

L’andamento decrescente di tipo parabolico dell’EYR (Figura 5.18.d) mostra chiaramente che nell’arco dei quarant’anni la città ha investito sempre meno sulle risorse localmente disponibili, utilizzando e accumulando per la sua crescita, in maniera sempre più esclusiva, risorse provenienti dall’esterno. L’indicatore EYR, per come è definito, è un indicatore di “openness”, ossia un indicatore sensibile alla natura interna/esterna dei flussi di risorse

utilizzate. A differenza della tranformity (indicatore centrale in analisi energetica) lo EYR non è sensibile all'efficienza dei processi di conversione, ma mette in luce la dipendenza da risorse importate dall'esterno e dunque evidenzia condizioni di maggiore o minore sostenibilità economica in senso lato. A complemento di questi indicatori, lo ELR (Environmental Loading Ratio, Figura 5.18.e) è sensibile alla rinnovabilità delle risorse, mostrando - per valori crescenti - l'allontanamento da condizioni di sostenibilità ambientale. L'andamento crescente dell'ELR, conferma il progressivo allontanamento di Roma dalle condizioni di equilibrio naturale, anche se la velocità di tale crescita accenna a diminuire. Ciò probabilmente trova spiegazioni nel fatto che le società economicamente sviluppate, dopo un periodo di veloce crescita in cui la tutela dell'ambiente assume un carattere decisamente secondario, tendono a riscoprire una certa sensibilità verso la natura e utilizzano risorse prodotte con minore degrado ambientale. Ciò sembra essere confermato anche dalle cosiddette *curve di Kuznet* (Kuznet, 1995) e dalla *piramide di Maslow* (Maslow, 1962) secondo la quale dopo il soddisfacimento dei più fondamentali *bisogni di mancanza*, negli individui emergerebbe la necessità di soddisfare bisogni via via sempre meno prioritari, fino ai *bisogni di tipo estetico*. Negli ultimi anni infatti nel Comune di Roma sono state istituite numerose nuove aree protette (parte di esse sottratte da territori agricoli del vecchio Agro Romano) e diversi ettari di verde pubblico in più. Tale aspetto è ribadito anche dall'andamento parabolico decrescente dell'ESI (Figura 5.18.f) che - sebbene confermi Roma come tipico sistema urbano moderno progredito, caratterizzato da una non trascurabile crescita di processi non sostenibili - mostra un rallentamento di tale dinamica fino a raggiungere una situazione di stabilizzazione che, se confermata in futuri rilevamenti, indicherebbe una decisa inversione di tendenza. E' bene osservare che l'ESI, definito come il rapporto tra EYR e ELR, aggrega insieme una valutazione economica (dinamica risorse locali/risorse importate) e ambientale (dinamica risorse rinnovabili/risorse non rinnovabili) e dunque è un indicatore aggregato di estremo interesse per quanto attiene i sistemi sociali e territoriali come appunto i sistemi urbani.

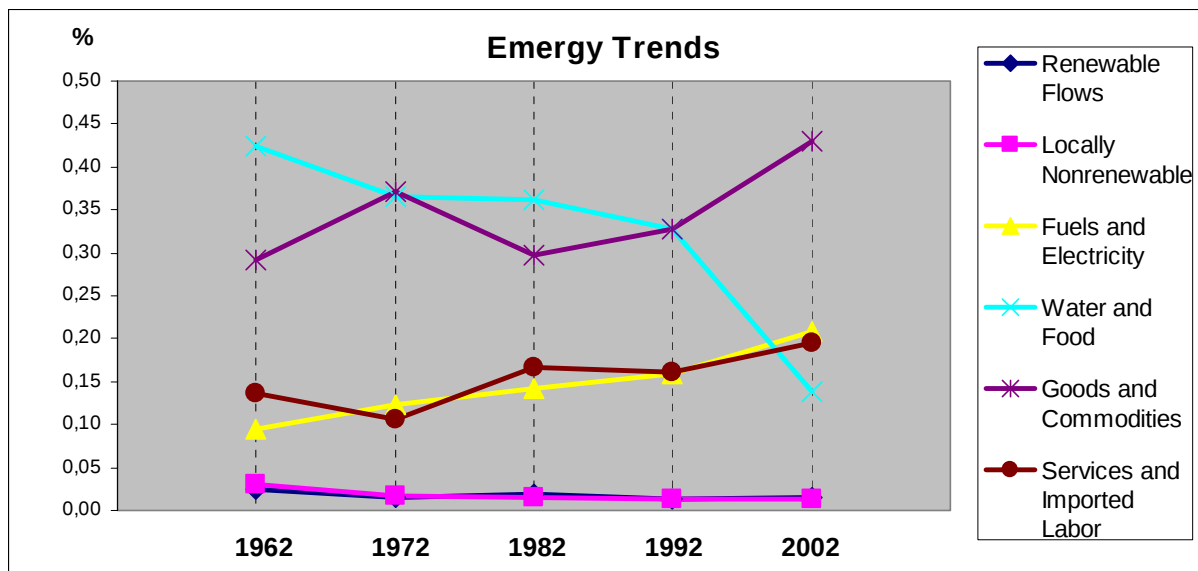


Figura 5.16

Andamento percentuale nel tempo delle principali categorie emergetiche.

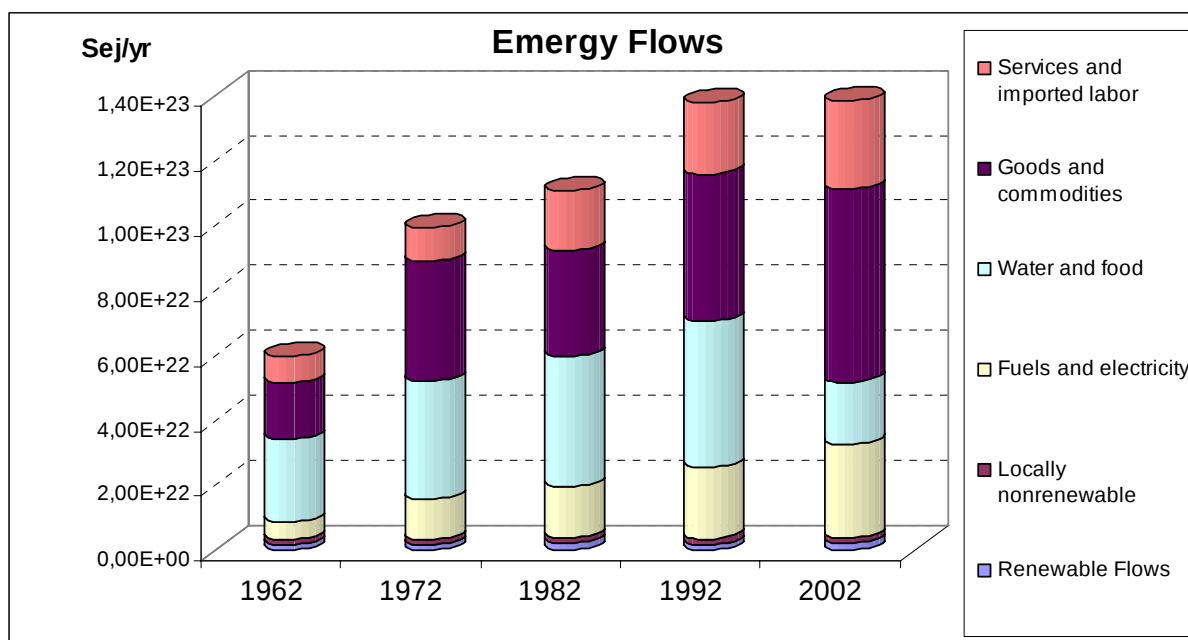


Figura 5.17
Variazione delle principali categorie energetiche nel tempo.

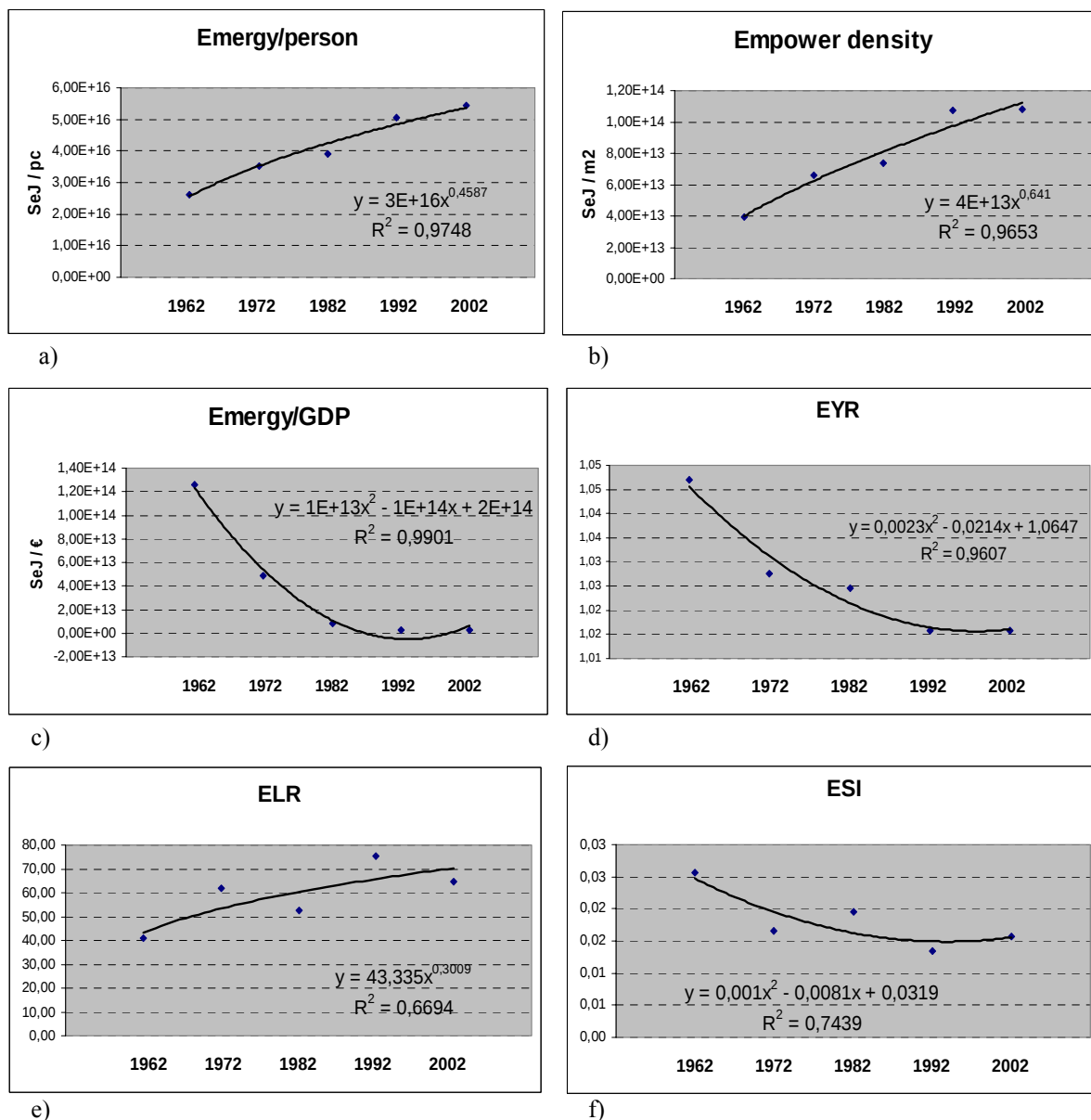


Figura 5.18

Curve d'interpolazione rappresentanti l'andamento nel tempo dei principali indicatori energetici.

5.6 Indicatori di emissione

Gli indicatori esaminati nei paragrafi precedenti sono indicatori di utilizzo delle risorse e, come tali, sono indicatori a monte (upstream) del processo esaminato. Distinguendo tra indicatori sulla scala locale e indicatori sulla scala globale abbiamo potuto evidenziare il minore impoverimento di risorse che si avrebbe in conseguenza di un comportamento "virtuoso" del sistema urbano, sia in termini di quantità che di qualità del mix di risorse utilizzato.

Gli indicatori esaminati nel presente paragrafo sono, invece, indicatori a valle (downstream), ossia indicatori di rilascio di specie chimiche capaci di influenzare fenomeni importanti come, ad esempio, il riscaldamento globale e l'acidificazione delle precipitazioni. Tali emissioni sono state calcolate come quantità totale e poi come emissioni pro-capite. I diagrammi delle Figure 5.19 - 5.24 descrivono l'andamento delle emissioni pro-capite calcolate sulla scala

locale e sulla scala globale. La scelta di focalizzarsi sulle emissioni procapite è dovuta al fatto che l'estensione del territorio comunale e la relativa popolazione sono cambiate nel tempo – come già accennato – a causa della separazione del Comune di Fiumicino – e pertanto i valori totali potrebbero dare una immagine alterata.

I diagrammi mostrano le emissioni di CO₂, CO, NO_x, N₂O, SO₂ e particolato. Tali emissioni contribuiscono in varia misura a più di una categoria di impatto ambientale (basti pensare agli NO_x, che contribuiscono sia all'aumento dell'effetto serra che all'acidità delle precipitazioni) e non sono le uniche emissioni del sistema urbano. Sono tuttavia quelle rilasciate in maggiore quantità e il cui impatto è relativamente noto. Ci siamo limitati, tuttavia, a confrontare l'andamento delle emissioni nel tempo e nello spazio, senza entrare nello specifico del loro contributo alle diverse categorie di impatto (facilmente rilevabile da manuali ormai entrati nella routine dell'analisi del ciclo di vita, come ad esempio Jensen et al. (1997). Quest'ultima valutazione si può anche effettuare facilmente o per confronto con dati di letteratura oppure per mezzo di software dedicato (ad esempio, SimaPro 7.0, che attinge a librerie di dati molto interessanti come Ecoindicator e CML).

I diagrammi suggeriscono alcune interessanti osservazioni:

- un aumento nel tempo di tutti i tipi di emissione, sia sulla scala locale che globale;
- una quantità di emissioni sulla scala globale sempre molto superiore a quelle della scala locale, come già osservato nel Capitolo 4 discutendo le emissioni del 2002.
- una diversa velocità di crescita: l'aumento è più contenuto sulla scala locale, grazie ai provvedimenti di controllo delle emissioni stesse effettuati dalle autorità preposte e grazie alle relative normative e tecnologie (ad esempio, normative europee sui motori Euro4);
- una divaricazione degli andamenti di SO₂ locali e globali. Ciò è dovuto alle normative che impongono l'uso di combustibili desolforizzati sia per trasporto (diesel) che per riscaldamento. Tale normativa non è altrettanto stringente sulla scala globale, dove è ancora consentito l'uso (ad esempio in centrali elettriche) di combustibili con un sia pur basso tenore di zolfo;

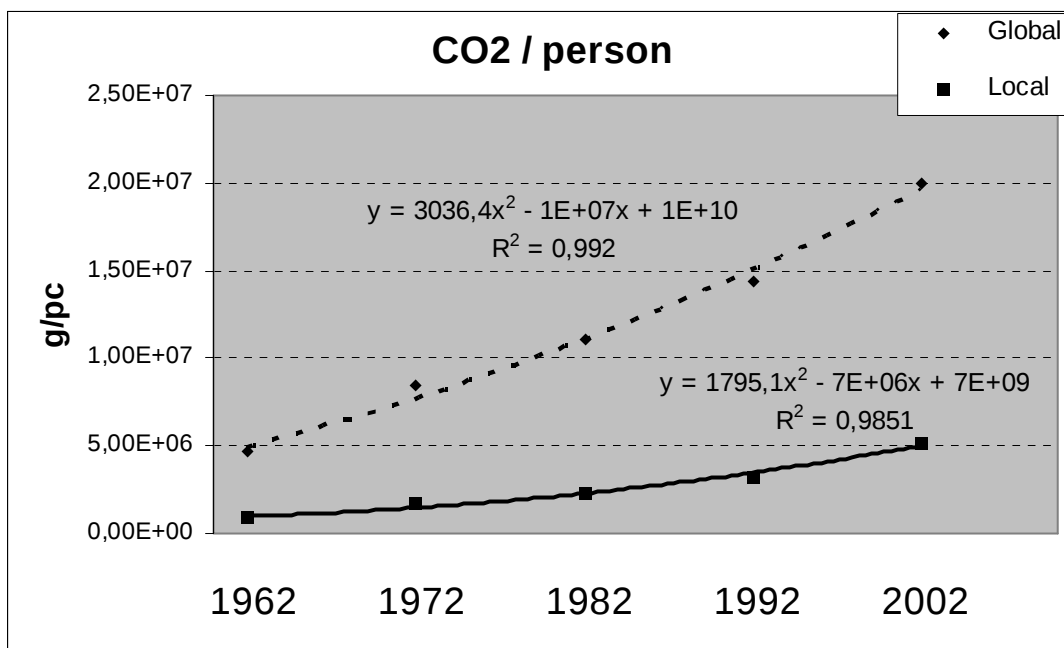


Figura 5.19

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di CO₂ locale e globale nel tempo.

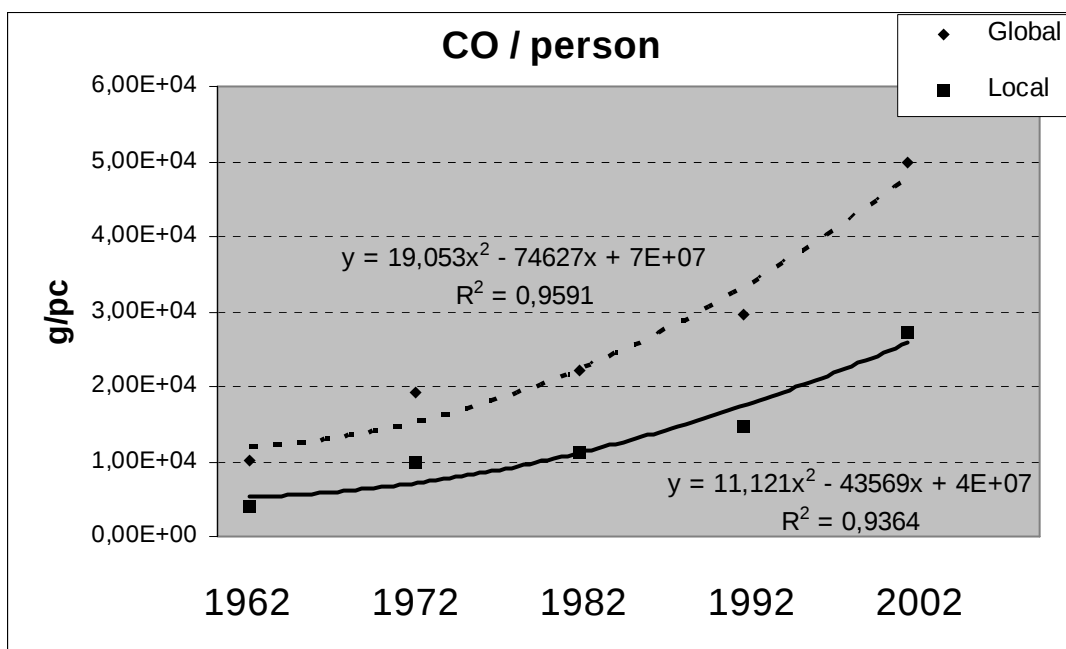


Figura 5.20

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di CO locale e globale nel tempo.

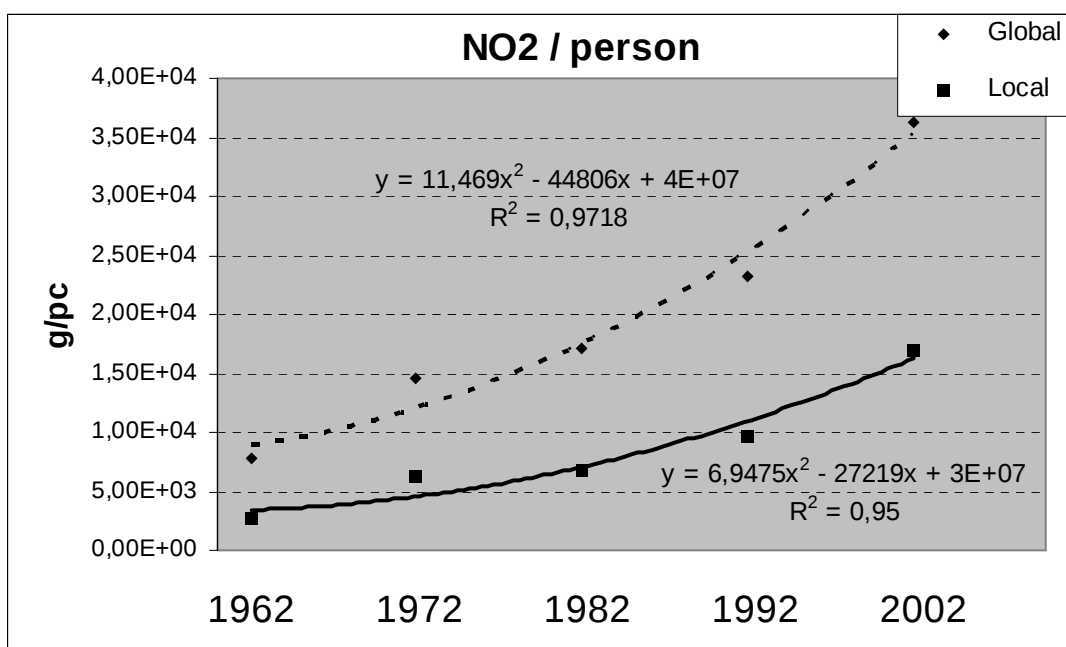


Figura 5.21

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di NO₂ locale e globale nel tempo.

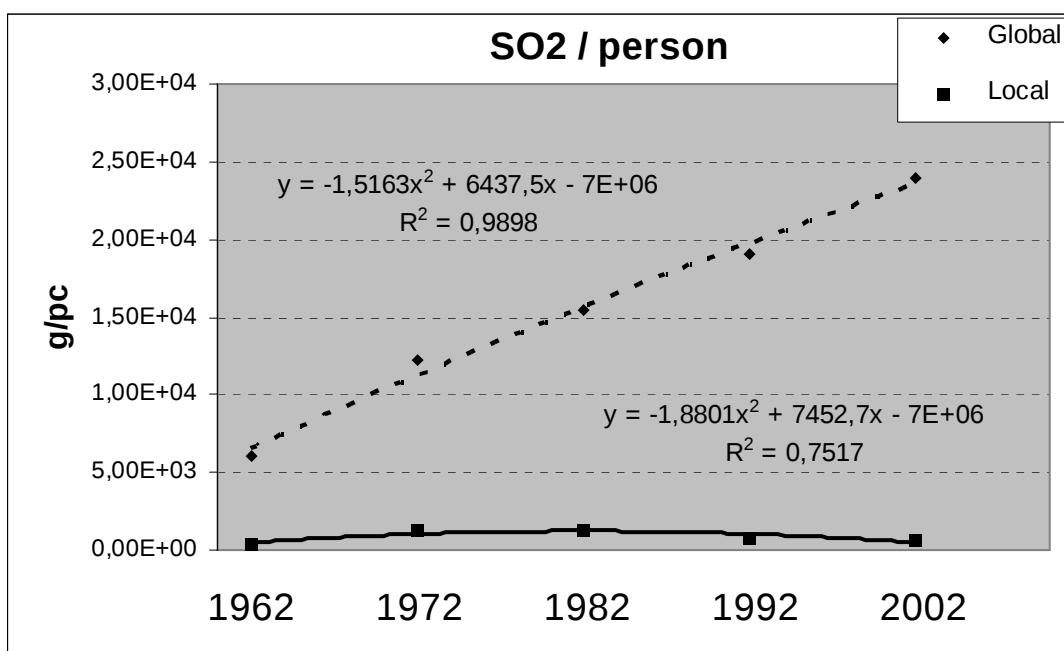


Figura 5.22

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di SO₂ locale e globale nel tempo.

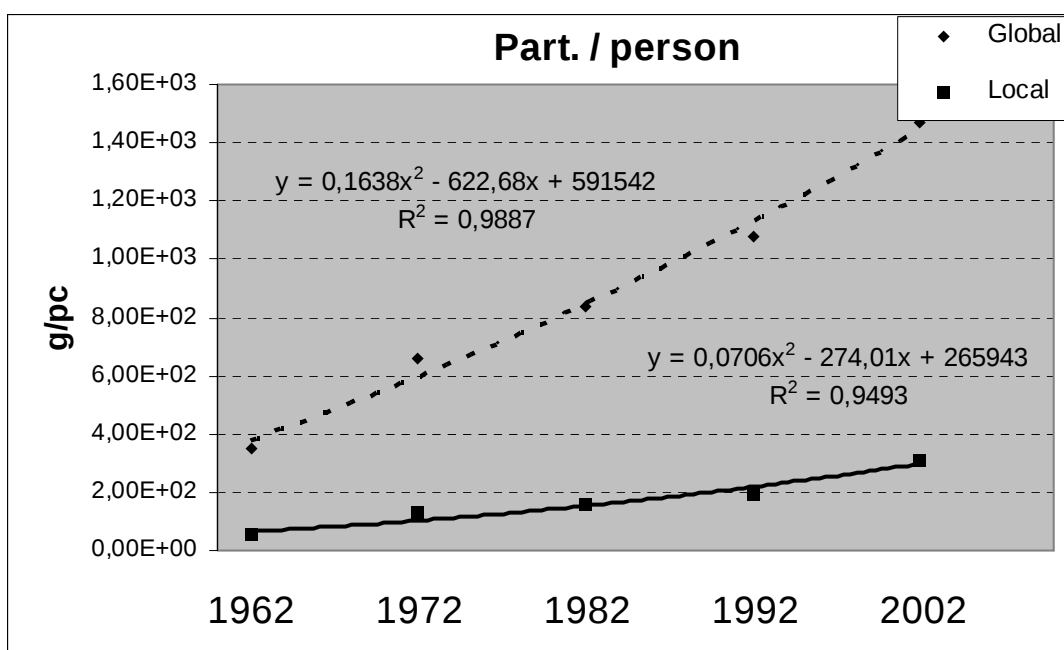


Figura 5.23

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di particolato locale e globale nel tempo.

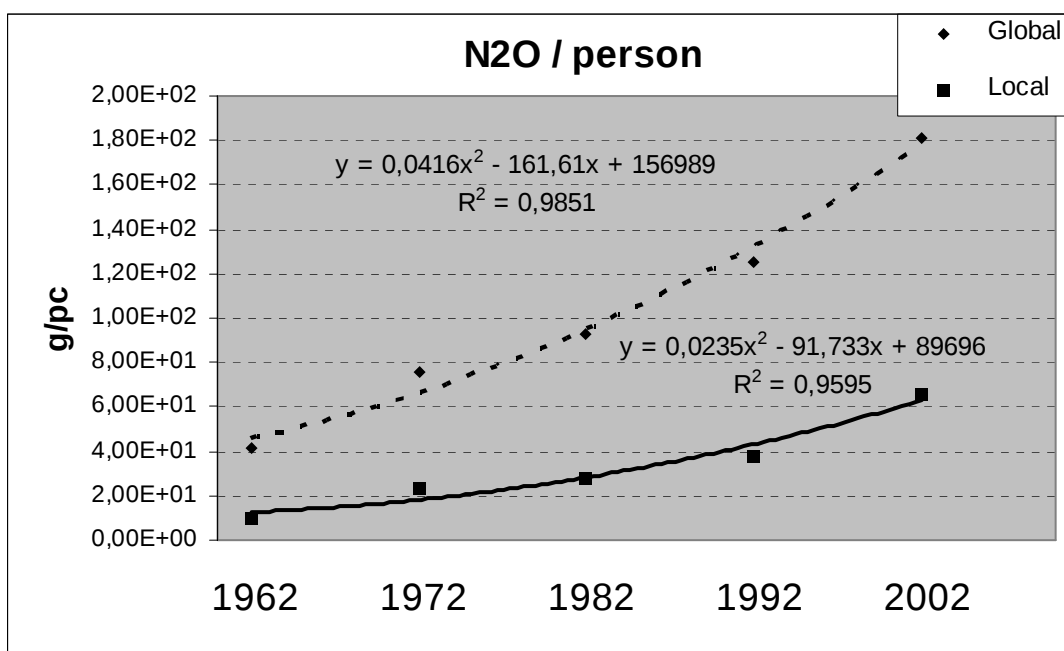


Figura 5.24

Confronto tra le curve d'interpolazione rappresentanti le emissioni pro capite di N₂O locale e globale nel tempo.

La grande diversità tra le quantità locali e le quantità globali è probabilmente il fattore più importante da considerare. Infatti, mentre le emissioni locali sono prevalentemente dovute a combustioni per trasporto e riscaldamento, quelle globali in più sono praticamente tutte dovute ai processi di produzioni di merci e al loro trasporto verso la città. La riduzione dei due tipi di emissioni va perseguita in due modi differenti:

- 1) le emissioni locali richiedono – a detta degli esperti - una diversa organizzazione dei metodi di riscaldamento (abbandono progressivo delle caldaie a gasolio; penetrazione del metano e, forse, dell'idrogeno; incremento dell'edilizia passiva, di accorgimenti di risparmio energetico e introduzione di apparati per lo sfruttamento dell'energia solare) e di trasporto (spostamento di quote sempre crescenti di traffico veicolare verso il trasporto collettivo, meglio se elettrico, e verso l'aumento degli spostamenti a piedi e in bicicletta); si tratta comunque di processi ancora sotto il diretto controllo del singolo cittadino.
- 2) Le emissioni globali – connesse in parte alle combustioni locali e in larga parte a processi industriali e agricoli esterni alla città – possono essere combattute solo con un meccanismo di controllo downstream sui prodotti acquistati, così da creare un circuito virtuoso. In pratica, si tratta di privilegiare i prodotti a basso consumo energetico, provenienti da distanze non eccessive, e destinati – per la loro tipologia costruttiva – a durare nel tempo. Perché questo avvenga, la scelta è ancora del consumatore, ma il presupposto è che tale consumatore sia informato e organizzato in gruppi di pressione.

Il verificarsi delle due ipotesi permetterebbe di abbattere in maniera significativa le emissioni su entrambe le scale spaziali e genererebbe indubbi benefici ambientali ed economici.

E' bene osservare che tale strategia vale anche per tutti gli indicatori di quantità delle risorse utilizzate, che già abbiamo esaminato in dettaglio nel Capitolo 4 per l'anno 2002 e il cui andamento nel tempo verrà discusso nel Capitolo 7. In generale, i flussi utilizzati direttamente

e indirettamente possono essere modificati con strategie di utilizzo più semplici, dove il singolo cittadino è facilmente coinvolto. Invece, per quanto riguarda la qualità dei diversi flussi, ossia il loro impatto indiretto a monte e a valle in termini di domanda di materia, di superficie produttiva e/o di supporto ambientale (energia), è possibile che piccoli flussi abbiano impatti elevati. La scelta tra diversi prodotti richiede un livello di consapevolezza che il singolo cittadino potrebbe non possedere. Spetta al policy-maker (amministratore, manager, pianificatore, etc) il compito di creare questa consapevolezza e predisporre idonei strumenti di scelta, di programmazione, di incentivo economico tali da orientare l'uso verso un consumo più sostenibile.

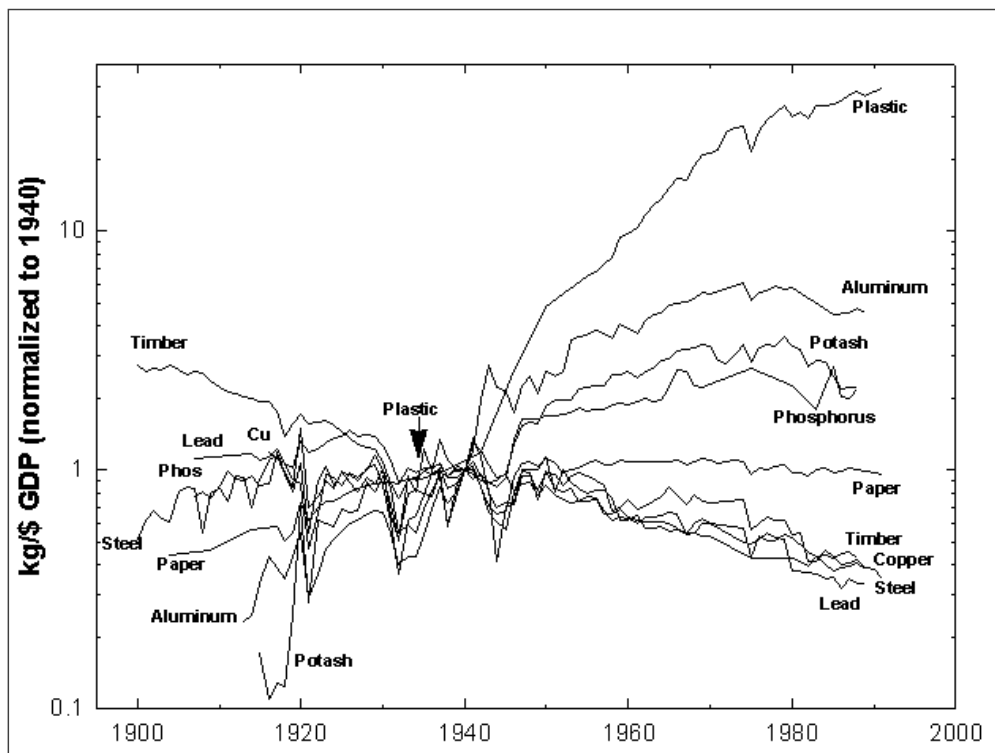


Figura 5.25
Cambiamento della base materiale delle società industrializzate (Fonte: Wernick et al., 1996)

APPENDICE AL CAPITOLO 5

Anno di riferimento: 1962

Mass balance of the city of Rome (1962)					
	Mass balance			MFA - Material Flow Accounting	
#	Description of flow	Units	Mass (local scale)	Mass abiotic g	Mass water g
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	4,67E+11	1,23E+11
Imported Input					
8	Gasoline	g/yr	1,69E+11	2,30E+11	1,64E+12
9	Diesel fuel	g/yr	1,13E+11	1,54E+11	1,10E+12
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	3,47E+10	4,72E+10	3,37E+11
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	1,16E+11	1,66E+11	1,20E+12
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	6,79E+10	8,28E+10	3,39E+10
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	1,07E+11	1,31E+11	5,35E+10
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	3,82E+10	4,67E+10	1,91E+10
13	Electricity	J/yr	8,45E+15	3,71E+12	1,50E+14
14	Water (from aqueduct)	g/yr	1,93E+14	0,00E+00	1,93E+14
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,79E+10	2,32E+10	0,00E+00
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,69E+10	1,62E+12	5,17E+13
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	6,83E+11	9,57E+11	0,00E+00
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,60E+11	1,06E+12	8,53E+13
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	4,08E+11	1,02E+12	2,18E+13
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	2,62E+11	0,00E+00	2,62E+11
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	3,06E+10	4,29E+11	6,83E+11
16	Steel and iron	g/yr	5,92E+11	6,50E+12	8,04E+13
17	Copper	g/yr	1,37E+10	2,46E+12	3,24E+12
18	Aluminium	g/yr	7,43E+09	1,41E+11	4,01E+12
19	Cement (Portland)	g/yr	1,93E+12	6,23E+12	3,27E+13
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	5,27E+12	1,11E+13	4,19E+13
21	Glass	g/yr	1,12E+11	3,32E+11	1,30E+12
22	Plastics	g/yr	1,99E+10	9,76E+10	5,37E+12
23	Asphalt	g/yr	5,90E+10	8,02E+10	5,72E+11
24	Chemicals	g/yr	2,05E+11	8,47E+11	2,50E+13
25	Wood	g/yr	1,86E+11	2,58E+11	4,05E+12
26	Textiles	g/yr	4,14E+09	3,45E+10	8,22E+12
27	Paper and derivatives	g/yr	7,61E+10	2,55E+11	9,44E+12
28	Fertilizers	g/yr	1,16E+11	6,99E+11	4,51E+12
Output					
	Total Material Flow			3,92E+13	7,27E+14
	Economic product (GDP)	€/yr	4,73E+08		
	Material Intensity Factors of GDP of Rome	g/€		82732,10	1536862,94

People supported	Units/yr	2,28E+06		
Material Intensity Factors of people of Rome	g/person		1,72E+07	3,19E+08

Energy Analysis (1962)					
#	Flow	units	raw amount	Oil equiv. demand (g oil eq)	Energy demand (J)

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	1,69E+11	2,54E+11	1,06E+16
9	Diesel fuel	g/yr	1,13E+11	1,45E+11	6,06E+15
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	3,47E+10	4,90E+10	2,05E+15
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	1,16E+11	1,42E+11	5,96E+15
12	Natural gas				
12a	Domestic use for cooking	g/yr	6,79E+10	7,81E+10	3,27E+15
12b	Domestic use for heating	g/yr	1,07E+11	1,23E+11	5,15E+15
12c	Other uses	g/yr	3,82E+10	4,40E+10	1,84E+15
13	Electricity	J/yr	8,45E+15	5,05E+11	2,11E+16
14	Water (from aqueduct)	g/yr	1,93E+14	2,53E+10	1,06E+15
15	Main Food Items				
15a	Fish	g/yr	1,79E+10	1,65E+10	6,91E+14
15b	Meat	g/yr	9,69E+10	9,50E+10	3,97E+15
15c	Fruits and Vegetables	g/yr	6,83E+11	4,34E+10	1,82E+15
15d	Milk, cheese and other derivatives	g/yr	1,60E+11	3,67E+10	1,54E+15
15e	Cereals and derivatives	g/yr	4,08E+11	5,67E+10	2,38E+15
15f	Wine and alcoholics	g/yr	2,62E+11	1,32E+10	5,51E+14
15g	Olive and seed oils	g/yr	3,06E+10	4,09E+08	1,71E+13
16	Steel and iron	g/yr	5,92E+11	4,07E+11	1,70E+16
17	Copper	g/yr	1,37E+10	3,03E+10	1,27E+15
18	Aluminium	g/yr	7,43E+09	5,05E+10	2,12E+15
19	Cement (Portland)	g/yr	1,93E+12	3,23E+11	1,35E+16
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	5,27E+12	1,10E+10	4,61E+14
21	Glass	g/yr	1,12E+11	7,12E+10	2,98E+15
22	Plastics	g/yr	1,99E+10	4,47E+10	1,87E+15
23	Asphalt	g/yr	5,90E+10	2,28E+11	9,56E+15
24	Chemicals	g/yr	2,05E+11	4,61E+11	1,93E+16
25	Wood	g/yr	1,86E+11	2,22E+10	9,29E+14
26	Textiles	g/yr	4,14E+09	2,09E+10	8,75E+14
27	Paper and derivatives	g/yr	7,61E+10	6,82E+10	2,85E+15
28	Fertilizers	g/yr	1,16E+11	8,88E+10	3,72E+15

Output

Total energy Flow			3,45E+12	1,45E+17
Economic product (GDP)	€/yr	4,73E+08		
Energy Intensity Factors of GDP of Rome			7297,735	305483192
People supported	Units/yr	2278882		
Energy Intensity Factors of people of Rome			1,52E+06	6,34E+10

Local emissions (1962)								
#	Flow	Energy (J)	Local CO ₂ (g CO ₂)	Local CO (g H ₂ O)	Local NO ₂ (g NO ₂)	Local SO ₂ (g SO ₂)	Local Part. (g part)	Local N ₂ O (g N ₂ O)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	7,45E+15	5,05E+11	8,50E+09	4,70E+09	3,43E+07	5,52E+07	1,42E+07
9	Diesel fuel	4,86E+15	3,71E+11	8,27E+07	9,72E+07	3,16E+07	1,60E+07	1,80E+06
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	1,61E+15	1,09E+11	2,58E+07	6,28E+07	4,67E+05	4,99E+06	3,06E+06
11	Heavy oil for domestic heating	4,93E+15	3,87E+11	7,40E+07	2,51E+08	7,40E+08	2,86E+07	1,68E+06
12	Natural gas							
12a	Domestic use for cooking	3,39E+15	1,92E+11	6,44E+07	2,91E+08	9,82E+05	4,74E+06	6,77E+05
12b	Domestic use for heating	5,34E+15	3,02E+11	1,01E+08	4,59E+08	1,55E+06	7,48E+06	1,07E+06
12c	Other uses	1,91E+15	1,08E+11	3,63E+07	1,64E+08	5,53E+05	2,67E+06	3,82E+05

Local emissions	g/yr	1,97E+12	8,88E+09	6,02E+09	8,09E+08	1,20E+08	2,28E+07
Total emissions per €	g/€	4,17E+03	1,88E+01	1,27E+01	1,71E+00	2,53E-01	4,82E-02
Total emissions per person	g/person	8,66E+05	3,90E+03	2,64E+03	3,55E+02	5,25E+01	1,00E+01

Economic product (GDP)	€/yr	4,73E+08
People supported	Units/yr	2278882

		Global emission flows (1962)					
#	Flow	Global CO ₂ (g CO ₂)	Global CO (g H ₂ O)	Global NO ₂ (g NO ₂)	Global SO ₂ (g SO ₂)	Global Part. (g part)	Global N ₂ O (g N ₂ O)
Imported Input							
8	Gasoline	7,20E+11	1,21E+10	6,70E+09	4,89E+07	7,87E+07	2,02E+07
9	Diesel fuel	4,62E+11	1,03E+08	1,21E+08	3,94E+07	2,00E+07	2,24E+06
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	1,39E+11	3,28E+07	7,99E+07	5,94E+05	6,35E+06	3,89E+06
11	Heavy oil for domestic heating	4,67E+11	8,94E+07	3,04E+08	8,94E+08	3,46E+07	2,03E+06
12	Natural gas						
12a	Domestic use for cooking	1,85E+11	6,21E+07	2,81E+08	9,48E+05	4,58E+06	6,54E+05
12b	Domestic use for heating	2,92E+11	9,79E+07	4,43E+08	1,49E+06	7,22E+06	1,03E+06
12c	Other uses	1,04E+11	3,50E+07	1,58E+08	5,34E+05	2,58E+06	3,68E+05
13	Electricity	1,33E+12	1,20E+09	1,42E+09	2,37E+09	1,48E+08	2,29E+07
14	Water (from aqueduct)	8,31E+10	1,59E+07	5,41E+07	1,59E+08	6,15E+06	3,61E+05
15	Main Food Items						
15a	Fish	5,15E+10	1,67E+08	9,81E+07	4,23E+06	2,85E+06	4,67E+05
15b	Meat	2,96E+11	9,60E+08	5,64E+08	2,43E+07	1,64E+07	2,69E+06
15c	Fruits and Vegetables	1,35E+11	4,39E+08	2,58E+08	1,11E+07	7,49E+06	1,23E+06
15d	Milk, cheese and other derivatives	1,15E+11	3,71E+08	2,18E+08	9,41E+06	6,33E+06	1,04E+06
15e	Cereals and derivatives	1,77E+11	5,74E+08	3,37E+08	1,45E+07	9,79E+06	1,61E+06
15f	Wine and alcoholics	4,11E+10	1,33E+08	7,83E+07	3,37E+06	2,27E+06	3,73E+05
15g	Olive and seed oils	1,28E+09	4,14E+06	2,43E+06	1,05E+05	7,06E+04	1,16E+04
16	Steel and iron	1,33E+12	2,55E+08	8,68E+08	2,55E+09	9,87E+07	5,79E+06
17	Copper	9,94E+10	1,90E+07	6,47E+07	1,90E+08	7,36E+06	4,31E+05

18	Aluminium	1,66E+11	3,17E+07	1,08E+08	3,17E+08	1,23E+07	7,19E+05
19	Cement (Portland)	1,06E+12	2,03E+08	6,90E+08	2,03E+09	7,85E+07	4,60E+06
20	Rocks and Sediments for building sector	3,61E+10	6,91E+06	2,35E+07	6,91E+07	2,67E+06	1,57E+05
21	Glass	2,34E+11	4,47E+07	1,52E+08	4,47E+08	1,73E+07	1,01E+06
22	Plastics	1,47E+11	2,81E+07	9,55E+07	2,81E+08	1,09E+07	6,36E+05
23	Asphalt	7,50E+11	1,43E+08	4,88E+08	1,43E+09	5,55E+07	3,25E+06
24	Chemicals	1,51E+12	2,89E+08	9,84E+08	2,89E+09	1,12E+08	6,56E+06
25	Wood	6,92E+10	2,25E+08	1,32E+08	5,69E+06	3,83E+06	6,28E+05
26	Textiles	6,52E+10	2,11E+08	1,24E+08	5,35E+06	3,60E+06	5,91E+05
27	Paper and derivatives	2,13E+11	6,89E+08	4,05E+08	1,75E+07	1,18E+07	1,93E+06
28	Fertilizers	2,52E+11	4,24E+09	2,34E+09	1,71E+07	2,75E+07	7,06E+06
Total global emissions		1,05E+13	2,28E+10	1,76E+10	1,38E+10	7,95E+08	9,45E+07
Total emissions per €		2,23E+04	4,81E+01	3,72E+01	2,92E+01	1,68E+00	2,00E-01
Total emissions per person		4,62E+06	1,00E+04	7,72E+03	6,07E+03	3,49E+02	4,15E+01

Ecological footprint (1962)						
#	Description of flow	Units	Mass	Mass of CO ₂	Ecological Footprint (ha)	Ecological Footprint (ha/pc)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	g/yr		7,62E+11	1,37E+05	6,00E-02
9	Diesel fuel	g/yr		4,34E+11	7,78E+04	3,42E-02
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr		1,47E+11	2,63E+04	1,16E-02
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr		4,27E+11	7,66E+04	3,36E-02
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr		2,34E+11	4,20E+04	1,84E-02
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr		3,69E+11	6,62E+04	2,91E-02
12c	<i>Other uses</i>	g/yr		1,32E+11	2,36E+04	1,04E-02
13	Electricity	g/yr		1,33E+12	2,38E+05	1,05E-01
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,79E+10		7,44E+05	3,27E-01
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,69E+10		1,98E+06	8,68E-01
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	6,83E+11		3,80E+04	1,67E-02
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,60E+11		2,14E+05	9,37E-02
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	4,08E+11		1,49E+05	6,53E-02
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	2,62E+11		3,09E+05	1,35E-01
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	3,06E+10		5,10E+04	2,24E-02
16	Steel and iron	g/yr		1,22E+12	2,19E+05	9,60E-02
17	Copper	g/yr		9,09E+10	1,63E+04	7,15E-03
18	Aluminium	g/yr		1,52E+11	2,72E+04	1,19E-02
19	Cement (Portland)	g/yr		9,70E+11	1,74E+05	7,63E-02
	Rocks and Sediments for building					
20	sector	g/yr		3,30E+10	5,92E+03	2,60E-03
21	Glass	g/yr		2,14E+11	3,83E+04	1,68E-02
22	Plastics	g/yr		1,34E+11	2,40E+04	1,06E-02
23	Asphalt	g/yr		6,85E+11	1,23E+05	5,39E-02

24	Chemicals	g/yr	1,38E+12	2,48E+05	1,09E-01
25	Wood	g/yr	1,86E+11	6,66E+10	2,69E+04
26	Textiles	g/yr	4,14E+09	6,27E+10	1,54E+04
27	Paper and derivatives	g/yr	7,61E+10	2,04E+11	6,12E+04
28	Fertilizers	g/yr	2,66E+11	4,77E+04	2,09E-02
29	Built Space			4,22E+04	1,85E-02
Output					
	Total Ecological Footprint			5,24E+06	2,30E+00
	Economic product (GDP)	€/yr	4,73E+08		
	Ecological Footprint per €			1,11E-02	
	Population of Rome	Units/yr	2,28E+06		

Table 1. Matter, energy and emergy flows supporting the urban system of Rome (1962)

#	Items	Units	Raw	Transformity (seJ/unit)	Emergy (seJ/yr)
Renewable Input (locally available)					
1	Sun	J/yr	7,54E+18	1	7,54E+18
2	Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface)	J/yr	2,61E+16	2,51E+03	6,54E+19
3	Evapotranspired Rain (Chemical Potential)	J/yr	1,48E+15	2,69E+04	3,97E+19
4	Run-in (river geopotential)	J/yr	1,39E+15	4,66E+04	6,49E+19
5	Waves	J/yr	1,76E+16	5,13E+04	9,03E+20
6	Tides	J/yr	2,87E+14	7,39E+04	2,12E+19
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, weathering)	g/yr	6,15E+11	2,87E+09	1,76E+21
Imported Input					
8	Gasoline	J/yr	7,45E+15	1,11E+05	8,27E+20
9	Diesel fuel	J/yr	4,86E+15	1,11E+05	5,40E+20
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	J/yr	1,61E+15	1,18E+05	1,90E+20
11	Heavy oil for domestic heating	J/yr	4,93E+15	1,11E+05	5,47E+20
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	J/yr	3,39E+15	8,05E+04	2,73E+20
12b	<i>Domestic use for heating</i>	J/yr	5,34E+15	8,05E+04	4,30E+20
12c	<i>Other uses</i>	J/yr	1,91E+15	8,05E+04	1,54E+20
13	Electricity	J/yr	8,45E+15	3,11E+05	2,63E+21
14	Water (from aqueduct)	g/yr	1,93E+14	3,76E+06	7,25E+20
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,79E+10	2,78E+11	4,97E+21
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,69E+10	3,00E+10	2,91E+21
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	6,83E+11	1,01E+09	6,89E+20
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,60E+11	1,44E+10	2,30E+21
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	4,08E+11	6,04E+08	2,47E+20
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	2,62E+11	1,41E+09	3,69E+20
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	3,06E+10	4,25E+11	1,30E+22
16	Steel and iron	g/yr	5,92E+11	3,16E+09	1,87E+21
17	Copper	g/yr	1,37E+10	3,36E+09	4,61E+19
18	Aluminium	g/yr	7,43E+09	7,76E+08	5,77E+18
19	Cement (Portland)	g/yr	1,93E+12	1,73E+09	3,35E+21

20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	5,27E+12	1,65E+09	8,71E+21
21	Glass	g/yr	1,12E+11	3,50E+09	3,94E+20
22	Plastics	g/yr	1,99E+10	9,68E+09	1,93E+20
23	Asphalt	g/yr	5,90E+10	9,56E+09	5,64E+20
24	Chemicals	g/yr	2,05E+11	6,38E+08	1,31E+20
25	Wood	g/yr	1,86E+11	6,79E+08	1,26E+20
26	Textiles	g/yr	4,14E+09	1,34E+11	5,54E+20
27	Paper and derivatives	g/yr	7,61E+10	6,55E+09	4,98E+20
28	Fertilizers	g/yr	1,16E+11	8,28E+09	9,62E+20
29	Services for imports	€/yr	2,76E+08	1,64E+12	4,52E+20
30	Imported Labor (Commuters)	people/yr	2,28E+05	3,60E+16	8,20E+21
31	Governmental support (salaries, health services, schools, etc)	€/yr	5,42E+07	1,64E+12	8,89E+19
32	Tourism (from Italy and outside)	\$/yr	4,05E+07	3,81E+12	1,54E+20
Output					
	Population	Units/yr	2,28E+06	2,61E+16	5,95E+22
	GDP	€/yr	4,73E+08	1,26E+14	5,95E+22

Table 2. Aggregate energy flows supporting Rome and calculated performance indicators.

		Units	Emergy flows	%
R	Renewable Emergy (maximum among items 1-6)	seJ/yr	9,03E+20	1,5%
N	Locally nonrenewable (item 7)	seJ/yr	1,76E+21	3,0%
F1	Imported emergy of fuels and electricity (sum of items 8-13)	seJ/yr	5,59E+21	9,4%
F2	Imported emergy of water and food (sum of items 14-15)	seJ/yr	2,52E+22	42,4%
F3	Imported emergy of goods and commodities (sum of items 16-28)	seJ/yr	1,74E+22	29,2%
SL _N	Nonrenewable fraction (94%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	8,14E+21	13,7%
SL _R	Renewable fraction (6%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	5,19E+20	0,9%
U	Total emergy without services and imported labor	seJ/yr	5,09E+22	85,5%
U _{LS}	Total emergy with services and imported labor	seJ/yr	5,95E+22	100,0%
Performance indicators				
GDP	Economic product	€/yr	4,73E+08	
U _{LS} /GDP	Emergy/GDP	seJ/€	1,26E+14	
P	People supported	Units/yr	2278882	
U _{LS} /P	Emergy/person	seJ/person	2,61E+16	
A	Area of Urban System	m ²	1,51E+09	
U _{LS} /A	Empower density	seJ/m ² /yr	3,95E+13	
EYR	Emergy Yield Ratio; $U_{LS}/(F1+F2+F3+SL_N+SL_R)$		1,05	
ELR	Environmental Loading Ratio; $(N+F1+F2+F3+SL_N)/(R+SL_R)$		40,85	

Anno di riferimento 1972:

Mass balance of the city of Rome (1972)					
	Mass balance			MFA - Material Flow Accounting	
#	Description of flow	Units	Mass (local scale)	Mass abiotic g	Mass water g

Nonrenewable Input (locally available)

7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	4,67E+11	1,23E+11
---	---------------------------------	------	----------	----------	----------

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	5,41E+11	7,35E+11	5,25E+12
9	Diesel fuel	g/yr	1,42E+11	1,93E+11	1,38E+12
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	9,52E+10	1,30E+11	9,24E+11
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	5,41E+11	7,73E+11	5,62E+12
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	7,62E+10	9,30E+10	3,81E+10
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	1,20E+11	1,47E+11	6,01E+10
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	4,29E+10	5,24E+10	2,15E+10
13	Electricity	J/yr	1,60E+16	7,01E+12	2,83E+14
14	Water (from acqueduct)	g/yr	3,00E+14	0,00E+00	3,00E+14
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	9,81E+09	1,28E+10	0,00E+00
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,66E+10	1,11E+12	3,55E+13
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	3,36E+11	4,71E+11	0,00E+00
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,39E+11	1,58E+12	1,28E+14
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,28E+11	1,31E+12	2,81E+13
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,46E+11	0,00E+00	3,46E+11
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,09E+10	8,54E+11	1,36E+12
16	Steel and iron	g/yr	2,43E+12	2,67E+13	3,31E+14
17	Copper	g/yr	2,28E+10	4,07E+12	5,38E+12
18	Aluminium	g/yr	2,36E+10	4,47E+11	1,27E+13
19	Cement (Portland)	g/yr	3,41E+12	1,10E+13	5,76E+13
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,01E+13	2,12E+13	8,00E+13
21	Glass	g/yr	1,08E+11	3,19E+11	1,25E+12
22	Plastics	g/yr	9,66E+10	4,73E+11	2,60E+13
23	Asphalt	g/yr	1,80E+11	2,45E+11	1,75E+12
24	Chemicals	g/yr	2,47E+11	1,02E+12	3,02E+13
25	Wood	g/yr	2,56E+11	3,57E+11	5,59E+12
26	Textiles	g/yr	5,52E+09	4,61E+10	1,10E+13
27	Paper and derivatives	g/yr	1,97E+11	6,62E+11	2,45E+13
28	Fertilizers	g/yr	1,37E+11	8,24E+11	5,31E+12

Output

Total Material Flow				8,23E+13	1,38E+15
Economic product (GDP)	€/yr	2,03E+09			
Material Intensity Factors of GDP of Rome	g/€			40618,50	681882,91
People supported	Units/yr	2,81E+06			

Energy Analysis (1972)					
#	Flow	units	raw amount	Oil equiv. demand (g oil eq)	Energy demand (J)
Imported Input					
8	Gasoline	g/yr	5,41E+11	8,11E+11	3,40E+16
9	Diesel fuel	g/yr	1,42E+11	1,82E+11	7,61E+15
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	9,52E+10	1,34E+11	5,62E+15
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	5,41E+11	6,65E+11	2,78E+16
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	7,62E+10	8,77E+10	3,67E+15
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	1,20E+11	1,38E+11	5,79E+15
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	4,29E+10	4,94E+10	2,07E+15
13	Electricity	J/yr	1,60E+16	9,54E+11	3,99E+16
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,00E+14	3,95E+10	1,65E+15
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	9,81E+09	9,06E+09	3,79E+14
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,66E+10	6,52E+10	2,73E+15
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	3,36E+11	2,14E+10	8,95E+14
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,39E+11	5,49E+10	2,30E+15
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,28E+11	7,34E+10	3,07E+15
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,46E+11	1,74E+10	7,26E+14
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,09E+10	8,14E+08	3,41E+13
16	Steel and iron	g/yr	2,43E+12	1,67E+12	6,99E+16
17	Copper	g/yr	2,28E+10	5,03E+10	2,10E+15
18	Aluminium	g/yr	2,36E+10	1,60E+11	6,71E+15
19	Cement (Portland)	g/yr	3,41E+12	5,70E+11	2,39E+16
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,01E+13	2,10E+10	8,81E+14
21	Glass	g/yr	1,08E+11	6,85E+10	2,87E+15
22	Plastics	g/yr	9,66E+10	2,17E+11	9,08E+15
23	Asphalt	g/yr	1,80E+11	6,99E+11	2,93E+16
24	Chemicals	g/yr	2,47E+11	5,56E+11	2,33E+16
25	Wood	g/yr	2,56E+11	3,06E+10	1,28E+15
26	Textiles	g/yr	5,52E+09	2,79E+10	1,17E+15
27	Paper and derivatives	g/yr	1,97E+11	1,77E+11	7,40E+15
28	Fertilizers	g/yr	1,37E+11	1,05E+11	4,38E+15
Output					
	Total energy Flow			7,66E+12	3,20E+17
	Economic product (GDP)	€/yr	2,03E+09		
	Energy Intensity Factors of GDP of Rome			3778,335	158161090
	People supported	Units/yr	2813011		
	Energy Intensity Factors of people of Rome			2,72E+06	1,14E+11

Local emissions (1972)								
#	Flow	Energy (J)	Local CO ₂ (g CO ₂)	Local CO (g H ₂ O)	Local NO ₂ (g NO ₂)	Local SO ₂ (g SO ₂)	Local Part. (g part)	Local N ₂ O (g N ₂ O)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	2,38E+16	1,61E+12	2,71E+10	1,50E+10	1,09E+08	1,76E+08	4,52E+07
9	Diesel fuel	6,11E+15	4,66E+11	1,04E+08	1,22E+08	3,97E+07	2,02E+07	2,26E+06
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	4,42E+15	2,99E+11	7,07E+07	1,72E+08	1,28E+06	1,37E+07	8,39E+06
	Heavy oil for domestic							
11	heating	2,30E+16	1,81E+12	3,45E+08	1,17E+09	3,45E+09	1,34E+08	7,83E+06
12	Natural gas							
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	3,80E+15	2,15E+11	7,23E+07	3,27E+08	1,10E+06	5,32E+06	7,61E+05
12b	<i>Domestic use for heating</i>	6,00E+15	3,39E+11	1,14E+08	5,16E+08	1,74E+06	8,40E+06	1,20E+06
12c	<i>Other uses</i>	2,14E+15	1,21E+11	4,07E+07	1,84E+08	6,21E+05	3,00E+06	4,29E+05

Local emissions	g/yr	4,86E+12	2,79E+10	1,75E+10	3,61E+09	3,60E+08	6,61E+07
Total emissions per €	g/€	2,40E+03	1,38E+01	8,63E+00	1,78E+00	1,78E-01	3,26E-02
Total emissions per person	g/person	1,73E+06	9,91E+03	6,22E+03	1,28E+03	1,28E+02	2,35E+01

Economic product (GDP)	€/yr	2,03E+09
People supported	Units/yr	2813011

		Global emission flows (1972)					
#	Flow	Global CO ₂ (g CO ₂)	Global CO (g H ₂ O)	Global NO ₂ (g NO ₂)	Global SO ₂ (g SO ₂)	Global Part. (g part)	Global N ₂ O (g N ₂ O)

Imported Input

8	Gasoline	2,30E+12	3,87E+10	2,14E+10	1,56E+08	2,51E+08	6,45E+07
9	Diesel fuel	5,80E+11	1,29E+08	1,52E+08	4,95E+07	2,51E+07	2,82E+06
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	3,81E+11	8,99E+07	2,19E+08	1,63E+06	1,74E+07	1,07E+07
11	Heavy oil for domestic heating	2,18E+12	4,17E+08	1,42E+09	4,17E+09	1,61E+08	9,46E+06
12	Natural gas						
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	2,08E+11	6,97E+07	3,16E+08	1,06E+06	5,14E+06	7,34E+05
12b	<i>Domestic use for heating</i>	3,28E+11	1,10E+08	4,98E+08	1,68E+06	8,10E+06	1,16E+06
12c	<i>Other uses</i>	1,17E+11	3,93E+07	1,78E+08	6,00E+05	2,89E+06	4,13E+05
13	Electricity	2,51E+12	2,26E+09	2,68E+09	4,48E+09	2,80E+08	4,34E+07
14	Water (from aqueduct)	1,30E+11	2,48E+07	8,43E+07	2,48E+08	9,58E+06	5,62E+05
15	Main Food Items						
15a	<i>Fish</i>	2,83E+10	9,16E+07	5,39E+07	2,32E+06	1,56E+06	2,56E+05
15b	<i>Meat</i>	2,03E+11	6,60E+08	3,88E+08	1,67E+07	1,13E+07	1,85E+06
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	6,67E+10	2,16E+08	1,27E+08	5,48E+06	3,69E+06	6,05E+05
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	1,71E+11	5,56E+08	3,27E+08	1,41E+07	9,47E+06	1,55E+06
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	2,29E+11	7,42E+08	4,36E+08	1,88E+07	1,27E+07	2,08E+06
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	5,41E+10	1,76E+08	1,03E+08	4,45E+06	2,99E+06	4,91E+05
15g	<i>Olive and seed oils</i>	2,54E+09	8,23E+06	4,84E+06	2,09E+05	1,40E+05	2,30E+04
16	Steel and iron	5,48E+12	1,05E+09	3,57E+09	1,05E+10	4,06E+08	2,38E+07
17	Copper	1,65E+11	3,16E+07	1,07E+08	3,16E+08	1,22E+07	7,16E+05
18	Aluminium	5,26E+11	1,01E+08	3,42E+08	1,01E+09	3,89E+07	2,28E+06

19	Cement (Portland)	1,87E+12	3,58E+08	1,22E+09	3,58E+09	1,38E+08	8,11E+06
20	Rocks and Sediments for building sector	6,91E+10	1,32E+07	4,49E+07	1,32E+08	5,11E+06	3,00E+05
21	Glass	2,25E+11	4,30E+07	1,46E+08	4,30E+08	1,66E+07	9,75E+05
22	Plastics	7,12E+11	1,36E+08	4,63E+08	1,36E+09	5,27E+07	3,09E+06
23	Asphalt	2,29E+12	4,39E+08	1,49E+09	4,39E+09	1,70E+08	9,95E+06
24	Chemicals	1,82E+12	3,49E+08	1,19E+09	3,49E+09	1,35E+08	7,91E+06
25	Wood	9,55E+10	3,10E+08	1,82E+08	7,85E+06	5,28E+06	8,67E+05
26	Textiles	8,69E+10	2,82E+08	1,66E+08	7,14E+06	4,81E+06	7,88E+05
27	Paper and derivatives	5,51E+11	1,79E+09	1,05E+09	4,53E+07	3,05E+07	5,00E+06
28	Fertilizers	2,96E+11	4,99E+09	2,76E+09	2,01E+07	3,24E+07	8,31E+06
Total global emissions		2,37E+13	5,42E+10	4,11E+10	3,44E+10	1,85E+09	2,13E+08
Total emissions per €		1,17E+04	2,67E+01	2,03E+01	1,70E+01	9,13E-01	1,05E-01
Total emissions per person		8,42E+06	1,93E+04	1,46E+04	1,22E+04	6,58E+02	7,56E+01

Ecological footprint (1972)						
#	Description of flow	Units	Mass	Mass of CO ₂	Ecological Footprint (ha)	Ecological Footprint (ha/pc)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	g/yr		2,43E+12	4,36E+05	1,55E-01
9	Diesel fuel	g/yr		5,46E+11	9,78E+04	3,48E-02
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr		4,03E+11	7,22E+04	2,57E-02
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr		1,99E+12	3,57E+05	1,27E-01
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr		2,63E+11	4,71E+04	1,68E-02
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr		4,15E+11	7,43E+04	2,64E-02
12c	<i>Other uses</i>	g/yr		1,48E+11	2,66E+04	9,44E-03
13	Electricity	g/yr		2,51E+12	4,51E+05	1,60E-01
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	9,81E+09		4,09E+05	1,45E-01
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,66E+10		1,36E+06	4,83E-01
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	3,36E+11		1,87E+04	6,64E-03
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,39E+11		3,19E+05	1,14E-01
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,28E+11		1,92E+05	6,84E-02
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,46E+11		4,07E+05	1,45E-01
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,09E+10		1,01E+05	3,61E-02
16	Steel and iron	g/yr		5,01E+12	8,99E+05	3,19E-01
17	Copper	g/yr		1,51E+11	2,70E+04	9,61E-03
18	Aluminium	g/yr		4,81E+11	8,62E+04	3,06E-02
19	Cement (Portland)	g/yr		1,71E+12	3,06E+05	1,09E-01
	Rocks and Sediments for building					
20	sector	g/yr		6,31E+10	1,13E+04	4,02E-03
21	Glass	g/yr		2,05E+11	3,68E+04	1,31E-02
22	Plastics	g/yr		6,51E+11	1,17E+05	4,15E-02
23	Asphalt	g/yr		2,10E+12	3,76E+05	1,34E-01
24	Chemicals	g/yr		1,67E+12	2,99E+05	1,06E-01
25	Wood	g/yr	2,56E+11	9,19E+10	3,71E+04	1,32E-02

26	Textiles	g/yr	5,52E+09	8,36E+10	2,05E+04	7,29E-03
27	Paper and derivatives	g/yr	1,97E+11	5,30E+11	1,59E+05	5,64E-02
28	Fertilizers	g/yr		3,14E+11	5,62E+04	2,00E-02
29	Built Space				5,21E+04	1,85E-02
Output						
	Total Ecological Footprint				6,85E+06	2,44E+00
	Economic product (GDP)	€/yr	2,03E+09			
	Ecological Footprint per €				3,38E-03	
	Population of Rome	Units/yr	2,81E+06			

Table 1. Matter, energy and emergy flows supporting the urban system of Rome (1972)

#	Items	Units	Raw	Transformity (seJ/unit)	Emergy (seJ/yr)
Renewable Input (locally available)					
1	Sun	J/yr	7,54E+18	1	7,54E+18
2	Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface)	J/yr	2,61E+16	2,51E+03	6,54E+19
3	Evapotranspired Rain (Chemical Potential)	J/yr	1,48E+15	2,69E+04	3,97E+19
4	Run-in (river geopotential)	J/yr	1,39E+15	4,66E+04	6,49E+19
5	Waves	J/yr	1,76E+16	5,13E+04	9,03E+20
6	Tides	J/yr	2,87E+14	7,39E+04	2,12E+19
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, weathering)	g/yr	6,15E+11	2,87E+09	1,76E+21
Imported Input					
8	Gasoline	J/yr	2,38E+16	1,11E+05	2,64E+21
9	Diesel fuel	J/yr	6,11E+15	1,11E+05	6,78E+20
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	J/yr	4,42E+15	1,18E+05	5,21E+20
11	Heavy oil for domestic heating	J/yr	2,30E+16	1,11E+05	2,56E+21
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	J/yr	3,80E+15	8,05E+04	3,06E+20
12b	<i>Domestic use for heating</i>	J/yr	6,00E+15	8,05E+04	4,83E+20
12c	<i>Other uses</i>	J/yr	2,14E+15	8,05E+04	1,72E+20
13	Electricity	J/yr	1,60E+16	3,11E+05	4,97E+21
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,00E+14	3,76E+06	1,13E+21
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	9,81E+09	2,78E+11	2,73E+21
15b	<i>Meat</i>	g/yr	6,66E+10	3,00E+10	2,00E+21
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	3,36E+11	1,01E+09	3,39E+20
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,39E+11	1,44E+10	3,45E+21
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,28E+11	6,04E+08	3,19E+20
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,46E+11	1,41E+09	4,87E+20
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,09E+10	4,25E+11	2,58E+22
16	Steel and iron	g/yr	2,43E+12	3,16E+09	7,69E+21
17	Copper	g/yr	2,28E+10	3,36E+09	7,65E+19
18	Aluminium	g/yr	2,36E+10	7,76E+08	1,83E+19
19	Cement (Portland)	g/yr	3,41E+12	1,73E+09	5,90E+21
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,01E+13	1,65E+09	1,66E+22
21	Glass	g/yr	1,08E+11	3,50E+09	3,79E+20

22	Plastics	g/yr	9,66E+10	9,68E+09	9,35E+20
23	Asphalt	g/yr	1,80E+11	9,56E+09	1,73E+21
24	Chemicals	g/yr	2,47E+11	6,38E+08	1,58E+20
25	Wood	g/yr	2,56E+11	6,79E+08	1,74E+20
26	Textiles	g/yr	5,52E+09	1,34E+11	7,39E+20
27	Paper and derivatives	g/yr	1,97E+11	6,55E+09	1,29E+21
28	Fertilizers	g/yr	1,37E+11	8,28E+09	1,13E+21
29	Services for imports	€/yr	7,08E+08	1,64E+12	1,16E+21
30	Imported Labor (Commuters)	people/yr	2,81E+05	3,60E+16	1,01E+22
	Governmental support (salaries, health services, schools, etc)	€/yr	2,32E+08	1,64E+12	3,81E+20
32	Tourism (from Italy and outside)	\$/yr	1,73E+08	3,81E+12	6,59E+20

Output

Population	Units/yr	2,81E+06	3,53E+16	9,94E+22
GDP	€/yr	2,03E+09	4,91E+13	9,94E+22

Table 2. Aggregate energy flows supporting Rome and calculated performance indicators.

		Units	Emergy flows	%
R	Renewable Emergy (maximum among items 1-6)	seJ/yr	9,03E+20	0,9%
N	Locally nonrenewable (item 7)	seJ/yr	1,76E+21	1,8%
F1	Imported emergy of fuels and electricity (sum of items 8-13)	seJ/yr	1,23E+22	12,4%
F2	Imported emergy of water and food (sum of items 14-15)	seJ/yr	3,63E+22	36,5%
F3	Imported emergy of goods and commodities (sum of items 16-28)	seJ/yr	3,69E+22	37,1%
SL _N	Nonrenewable fraction (94%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	1,06E+22	10,7%
SL _R	Renewable fraction (6%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	6,77E+20	0,7%
U	Total emergy without services and imported labor	seJ/yr	8,81E+22	88,6%
U _{LS}	Total emergy with services and imported labor	seJ/yr	9,94E+22	100,0%
Performance indicators				
GDP	Economic product	€/yr	2,03E+09	
U _{LS} /GDP	Emergy/GDP	seJ/€	4,91E+13	
P	People supported	Units/yr	2813011	
U _{LS} /P	Emergy/person	seJ/person	3,53E+16	
A	Area of Urban System	m ²	1,51E+09	
U _{LS} /A	Empower density	seJ/m ² /yr	6,60E+13	
EYR	Emergy Yield Ratio; $U_{LS}/(F1+F2+F3+SL_N+SL_R)$		1,03	
ELR	Environmental Loading Ratio; $(N+F1+F2+F3+SL_N)/(R+SL_R)$		61,94	
ESI	Emergy Index of Sustainability (EYR/ELR)		0,02	

Anno di riferimento: 1982

Mass balance of the city of Rome (1982)					
	Mass balance			MFA - Material Flow Accounting	
#	Description of flow	Units	Mass (local scale)	Mass abiotic g	Mass water g
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	4,67E+11	1,23E+11
Imported Input					
8	Gasoline	g/yr	6,04E+11	8,21E+11	5,86E+12
9	Diesel fuel	g/yr	6,37E+11	8,67E+11	6,18E+12
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,12E+11	1,53E+11	1,09E+12
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	5,07E+11	7,25E+11	5,28E+12
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	5,57E+10	6,80E+10	2,79E+10
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	8,78E+10	1,07E+11	4,39E+10
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	3,14E+10	3,83E+10	1,57E+10
13	Electricity	J/yr	1,91E+16	8,38E+12	3,39E+14
14	Water (from acqueduct)	g/yr	3,02E+14	0,00E+00	3,02E+14
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,63E+10	2,12E+10	0,00E+00
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,71E+10	1,62E+12	5,18E+13
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	4,88E+11	6,83E+11	0,00E+00
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,89E+11	1,91E+12	1,54E+14
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,02E+11	1,25E+12	2,68E+13
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,71E+11	0,00E+00	3,71E+11
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,11E+10	8,58E+11	1,37E+12
16	Steel and iron	g/yr	2,76E+12	3,02E+13	3,75E+14
17	Copper	g/yr	1,70E+10	3,05E+12	4,02E+12
18	Aluminium	g/yr	3,54E+10	6,72E+11	1,91E+13
19	Cement (Portland)	g/yr	2,27E+12	7,31E+12	3,84E+13
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	6,45E+12	1,36E+13	5,12E+13
21	Glass	g/yr	1,50E+11	4,42E+11	1,74E+12
22	Plastics	g/yr	1,49E+11	7,29E+11	4,01E+13
23	Asphalt	g/yr	1,72E+11	2,34E+11	1,67E+12
24	Chemicals	g/yr	7,51E+11	3,10E+12	9,16E+13
25	Wood	g/yr	2,90E+11	4,03E+11	6,32E+12
26	Textiles	g/yr	1,82E+10	1,52E+11	3,61E+13
27	Paper and derivatives	g/yr	2,56E+11	8,59E+11	3,18E+13
28	Fertilizers	g/yr	1,38E+11	8,29E+11	5,34E+12
Output					
	Total Material Flow			7,96E+13	1,59E+15
	Economic product (GDP)	€/yr	1,33E+10		
	Material Intensity Factors of GDP of Rome	g/€		5980,85	119870,48
	People supported	Units/yr	2,82E+06		
	Material Intensity Factors of people of Rome	g/person		2,82E+07	5,65E+08

Energy Analysis (1982)					
#	Flow	units	raw amount	Oil equiv. demand (g oil eq)	Energy demand (J)

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	6,04E+11	9,06E+11	3,79E+16
9	Diesel fuel	g/yr	6,37E+11	8,16E+11	3,41E+16
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,12E+11	1,58E+11	6,63E+15
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	5,07E+11	6,24E+11	2,61E+16
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	5,57E+10	6,41E+10	2,68E+15
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	8,78E+10	1,01E+11	4,23E+15
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	3,14E+10	3,61E+10	1,51E+15
13	Electricity	J/yr	1,91E+16	1,14E+12	4,78E+16
14	Water (from aqueduct)	g/yr	3,02E+14	3,96E+10	1,66E+15
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,63E+10	1,50E+10	6,30E+14
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,71E+10	9,51E+10	3,98E+15
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	4,88E+11	3,10E+10	1,30E+15
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,89E+11	6,63E+10	2,78E+15
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,02E+11	6,98E+10	2,92E+15
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,71E+11	1,86E+10	7,79E+14
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,11E+10	8,18E+08	3,42E+13
16	Steel and iron	g/yr	2,76E+12	1,89E+12	7,93E+16
17	Copper	g/yr	1,70E+10	3,76E+10	1,57E+15
18	Aluminium	g/yr	3,54E+10	2,41E+11	1,01E+16
19	Cement (Portland)	g/yr	2,27E+12	3,80E+11	1,59E+16
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	6,45E+12	1,35E+10	5,64E+14
21	Glass	g/yr	1,50E+11	9,48E+10	3,97E+15
22	Plastics	g/yr	1,49E+11	3,34E+11	1,40E+16
23	Asphalt	g/yr	1,72E+11	6,65E+11	2,78E+16
24	Chemicals	g/yr	7,51E+11	1,69E+12	7,06E+16
25	Wood	g/yr	2,90E+11	3,46E+10	1,45E+15
26	Textiles	g/yr	1,82E+10	9,17E+10	3,84E+15
27	Paper and derivatives	g/yr	2,56E+11	2,29E+11	9,60E+15
28	Fertilizers	g/yr	1,38E+11	1,05E+11	4,40E+15

Output

Total energy Flow				9,99E+12	4,18E+17
Economic product (GDP)	€/yr	1,33E+10			
Energy Intensity Factors of GDP of Rome				750,6249	31421159
People supported	Units/yr	2824382			
Energy Intensity Factors of people of Rome				3,54E+06	1,48E+11

Local emissions (1982)								
#	Flow	Energy (J)	Local CO ₂ (g CO ₂)	Local CO (g H ₂ O)	Local NO ₂ (g NO ₂)	Local SO ₂ (g SO ₂)	Local Part. (g part)	Local N ₂ O (g N ₂ O)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	2,66E+16	1,80E+12	3,03E+10	1,67E+10	1,22E+08	1,97E+08	5,05E+07
9	Diesel fuel	2,74E+16	2,09E+12	4,66E+08	5,48E+08	1,78E+08	9,04E+07	1,01E+07
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	5,21E+15	3,53E+11	8,34E+07	2,03E+08	1,51E+06	1,62E+07	9,90E+06
	Heavy oil for domestic heating							
11	heating	2,16E+16	1,69E+12	3,24E+08	1,10E+09	3,24E+09	1,25E+08	7,35E+06
12	Natural gas							
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	2,78E+15	1,57E+11	5,28E+07	2,39E+08	8,06E+05	3,89E+06	5,56E+05
12b	<i>Domestic use for heating</i>	4,38E+15	2,48E+11	8,33E+07	3,77E+08	1,27E+06	6,14E+06	8,77E+05
12c	<i>Other uses</i>	1,57E+15	8,86E+10	2,97E+07	1,35E+08	4,54E+05	2,19E+06	3,13E+05

Local emissions	g/yr	6,43E+12	3,13E+10	1,93E+10	3,55E+09	4,41E+08	7,96E+07
Total emissions per €	g/€	4,83E+02	2,35E+00	1,45E+00	2,66E-01	3,31E-02	5,98E-03
Total emissions per person	g/person	2,28E+06	1,11E+04	6,85E+03	1,26E+03	1,56E+02	2,82E+01

Economic product (GDP)	€/yr	1,33E+10
People supported	Units/yr	2824382

		Global emission flows (1982)					
#	Flow	Global CO ₂ (g CO ₂)	Global CO (g H ₂ O)	Global NO ₂ (g NO ₂)	Global SO ₂ (g SO ₂)	Global Part. (g part)	Global N ₂ O (g N ₂ O)

Imported Input

8	Gasoline	2,57E+12	4,32E+10	2,39E+10	1,74E+08	2,81E+08	7,20E+07
9	Diesel fuel	2,60E+12	5,80E+08	6,83E+08	2,22E+08	1,13E+08	1,26E+07
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	4,50E+11	1,06E+08	2,59E+08	1,92E+06	2,06E+07	1,26E+07
11	Heavy oil for domestic heating	2,05E+12	3,92E+08	1,33E+09	3,92E+09	1,51E+08	8,88E+06
12	Natural gas						
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	1,52E+11	5,09E+07	2,31E+08	7,78E+05	3,75E+06	5,36E+05
12b	<i>Domestic use for heating</i>	2,39E+11	8,03E+07	3,64E+08	1,23E+06	5,92E+06	8,46E+05
12c	<i>Other uses</i>	8,55E+10	2,87E+07	1,30E+08	4,38E+05	2,11E+06	3,02E+05
13	Electricity	3,01E+12	2,70E+09	3,21E+09	5,35E+09	3,35E+08	5,19E+07
14	Water (from aqueduct)	1,30E+11	2,49E+07	8,46E+07	2,49E+08	9,62E+06	5,64E+05
15	Main Food Items						
15a	<i>Fish</i>	4,69E+10	1,52E+08	8,94E+07	3,85E+06	2,59E+06	4,26E+05
15b	<i>Meat</i>	2,97E+11	9,62E+08	5,66E+08	2,44E+07	1,64E+07	2,69E+06
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	9,66E+10	3,13E+08	1,84E+08	7,94E+06	5,34E+06	8,77E+05
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	2,07E+11	6,71E+08	3,94E+08	1,70E+07	1,14E+07	1,88E+06
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	2,18E+11	7,06E+08	4,15E+08	1,79E+07	1,20E+07	1,97E+06
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	5,80E+10	1,88E+08	1,11E+08	4,77E+06	3,21E+06	5,26E+05

15g	<i>Olive and seed oils</i>	2,55E+09	8,27E+06	4,86E+06	2,10E+05	1,41E+05	2,31E+04
16	Steel and iron	6,21E+12	1,19E+09	4,04E+09	1,19E+10	4,60E+08	2,69E+07
17	Copper	1,23E+11	2,36E+07	8,03E+07	2,36E+08	9,13E+06	5,35E+05
18	Aluminium	7,89E+11	1,51E+08	5,13E+08	1,51E+09	5,84E+07	3,42E+06
19	Cement (Portland)	1,25E+12	2,38E+08	8,11E+08	2,38E+09	9,22E+07	5,40E+06
20	Rocks and Sediments for building sector	4,42E+10	8,46E+06	2,88E+07	8,46E+07	3,27E+06	1,92E+05
21	Glass	3,11E+11	5,96E+07	2,02E+08	5,96E+08	2,30E+07	1,35E+06
22	Plastics	1,10E+12	2,10E+08	7,13E+08	2,10E+09	8,11E+07	4,75E+06
23	Asphalt	2,18E+12	4,18E+08	1,42E+09	4,18E+09	1,61E+08	9,46E+06
24	Chemicals	5,53E+12	1,06E+09	3,60E+09	1,06E+10	4,09E+08	2,40E+07
25	Wood	1,08E+11	3,50E+08	2,06E+08	8,88E+06	5,98E+06	9,80E+05
26	Textiles	2,86E+11	9,28E+08	5,45E+08	2,35E+07	1,58E+07	2,60E+06
27	Paper and derivatives	7,15E+11	2,32E+09	1,36E+09	5,87E+07	3,95E+07	6,49E+06
28	Fertilizers	2,98E+11	5,02E+09	2,77E+09	2,03E+07	3,26E+07	8,37E+06
Total global emissions		3,12E+13	6,22E+10	4,82E+10	4,37E+10	2,36E+09	2,63E+08
Total emissions per €		2,34E+03	4,67E+00	3,63E+00	3,28E+00	1,78E-01	1,98E-02
Total emissions per person		1,10E+07	2,20E+04	1,71E+04	1,55E+04	8,37E+02	9,32E+01

Ecological footprint (1982)						
#	Description of flow	Units	Mass	Mass of CO ₂	Ecological Footprint (ha)	Ecological Footprint (ha/pc)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	g/yr		2,72E+12	4,87E+05	1,72E-01
9	Diesel fuel	g/yr		2,45E+12	4,39E+05	1,55E-01
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr		4,75E+11	8,52E+04	3,02E-02
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr		1,87E+12	3,35E+05	1,19E-01
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr		1,92E+11	3,44E+04	1,22E-02
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr		3,03E+11	5,43E+04	1,92E-02
12c	<i>Other uses</i>	g/yr		1,08E+11	1,94E+04	6,87E-03
13	Electricity	g/yr		3,01E+12	5,39E+05	1,91E-01
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,63E+10		6,79E+05	2,40E-01
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,71E+10		1,98E+06	7,02E-01
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	4,88E+11		2,71E+04	9,59E-03
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,89E+11		3,86E+05	1,37E-01
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,02E+11		1,83E+05	6,48E-02
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,71E+11		4,36E+05	1,54E-01
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,11E+10		1,02E+05	3,61E-02
16	Steel and iron	g/yr		5,68E+12	1,02E+06	3,61E-01
17	Copper	g/yr		1,13E+11	2,02E+04	7,16E-03
18	Aluminium	g/yr		7,22E+11	1,29E+05	4,58E-02
19	Cement (Portland)	g/yr		1,14E+12	2,04E+05	7,23E-02
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr		4,04E+10	7,25E+03	2,57E-03
21	Glass	g/yr		2,85E+11	5,10E+04	1,81E-02
22	Plastics	g/yr		1,00E+12	1,80E+05	6,36E-02
23	Asphalt	g/yr		1,99E+12	3,58E+05	1,27E-01

24	Chemicals	g/yr		5,06E+12	9,07E+05	3,21E-01
25	Wood	g/yr	2,90E+11	1,04E+11	4,20E+04	1,49E-02
26	Textiles	g/yr	1,82E+10	2,75E+11	6,75E+04	2,39E-02
27	Paper and derivatives	g/yr	2,56E+11	6,88E+11	2,06E+05	7,29E-02
28	Fertilizers	g/yr		3,16E+11	5,66E+04	2,00E-02
29	Built Space				5,24E+04	1,85E-02
Output						
	Total Ecological Footprint				9,09E+06	3,22E+00
	Economic product (GDP)	€/yr	1,33E+10			
	Ecological Footprint per €				6,83E-04	
	Population of Rome	Units/yr	2,82E+06			

Table 1. Matter, energy and emergy flows supporting the urban system of Rome (1982)

#	Items	Units	Raw	Transformity (seJ/unit)	Emergy (seJ/yr)
Renewable Input (locally available)					
1	Sun	J/yr	7,54E+18	1	7,54E+18
2	Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface)	J/yr	2,61E+16	2,51E+03	6,54E+19
3	Evapotranspired Rain (Chemical Potential)	J/yr	1,48E+15	2,69E+04	3,97E+19
4	Run-in (river geopotential)	J/yr	1,39E+15	4,66E+04	6,49E+19
5	Waves	J/yr	1,76E+16	5,13E+04	9,03E+20
6	Tides	J/yr	2,87E+14	7,39E+04	2,12E+19
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	2,87E+09	1,76E+21
Imported Input					
8	Gasoline	J/yr	2,66E+16	1,11E+05	2,95E+21
9	Diesel fuel	J/yr	2,74E+16	1,11E+05	3,04E+21
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	J/yr	5,21E+15	1,18E+05	6,15E+20
11	Heavy oil for domestic heating	J/yr	2,16E+16	1,11E+05	2,40E+21
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	J/yr	2,78E+15	8,05E+04	2,24E+20
12b	<i>Domestic use for heating</i>	J/yr	4,38E+15	8,05E+04	3,53E+20
12c	<i>Other uses</i>	J/yr	1,57E+15	8,05E+04	1,26E+20
13	Electricity	J/yr	1,91E+16	3,11E+05	5,94E+21
14	Water (from acqueduct)	g/yr	3,02E+14	3,76E+06	1,13E+21
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,63E+10	2,78E+11	4,53E+21
15b	<i>Meat</i>	g/yr	9,71E+10	3,00E+10	2,92E+21
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	4,88E+11	1,01E+09	4,92E+20
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	2,89E+11	1,44E+10	4,16E+21
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	5,02E+11	6,04E+08	3,03E+20
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	3,71E+11	1,41E+09	5,22E+20
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	6,11E+10	4,25E+11	2,60E+22
16	Steel and iron	g/yr	2,76E+12	3,16E+09	8,71E+21
17	Copper	g/yr	1,70E+10	3,36E+09	5,72E+19
18	Aluminium	g/yr	3,54E+10	7,76E+08	2,75E+19
19	Cement (Portland)	g/yr	2,27E+12	1,73E+09	3,93E+21

20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	6,45E+12	1,65E+09	1,07E+22
21	Glass	g/yr	1,50E+11	3,50E+09	5,24E+20
22	Plastics	g/yr	1,49E+11	9,68E+09	1,44E+21
23	Asphalt	g/yr	1,72E+11	9,56E+09	1,64E+21
24	Chemicals	g/yr	7,51E+11	6,38E+08	4,79E+20
25	Wood	g/yr	2,90E+11	6,79E+08	1,97E+20
26	Textiles	g/yr	1,82E+10	1,34E+11	2,43E+21
27	Paper and derivatives	g/yr	2,56E+11	6,55E+09	1,68E+21
28	Fertilizers	g/yr	1,38E+11	8,28E+09	1,14E+21
29	Services for imports	€/yr	5,72E+09	1,64E+12	9,39E+21
30	Imported Labor (Commuters)	people/yr	2,82E+05	3,60E+16	1,02E+22
31	Governmental support (salaries, health services, schools, etc)	€/yr	1,74E+09	1,64E+12	2,85E+21
32	Tourism (from Italy and outside)	\$/yr	1,14E+09	3,81E+12	4,33E+21
Output					
	Population	Units/yr	2,82E+06	3,92E+16	1,11E+23
	GDP	€/yr	1,33E+10	8,33E+12	1,11E+23

Table 2. Aggregate energy flows supporting Rome and calculated performance indicators.

		Units	Emergy flows	%
R	Renewable Emergy (maximum among items 1-6)	seJ/yr	9,03E+20	0,8%
N	Locally nonrenewable (item 7)	seJ/yr	1,76E+21	1,6%
F1	Imported emergy of fuels and electricity (sum of items 8-13)	seJ/yr	1,56E+22	14,1%
F2	Imported emergy of water and food (sum of items 14-15)	seJ/yr	4,00E+22	36,1%
F3	Imported emergy of goods and commodities (sum of items 16-28)	seJ/yr	3,29E+22	29,7%
SL _N	Nonrenewable fraction (94%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	1,84E+22	16,6%
SL _R	Renewable fraction (6%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	1,17E+21	1,1%
U	Total emergy without services and imported labor	seJ/yr	9,13E+22	82,4%
U _{LS}	Total emergy with services and imported labor	seJ/yr	1,11E+23	100,0%
Performance indicators				
GDP	Economic product	€/yr	1,33E+10	
U _{LS} /GDP	Emergy/GDP	seJ/€	8,33E+12	
P	People supported	Units/yr	2824382	
U _{LS} /P	Emergy/person	seJ/person	3,92E+16	
A	Area of Urban System	m ²	1,51E+09	
U _{LS} /A	Empower density	seJ/m ² /yr	7,35E+13	
EYR	Emergy Yield Ratio; $U_{LS}/(F1+F2+F3+SL_N+SL_R)$		1,02	
ELR	Environmental Loading Ratio; $(N+F1+F2+F3+SL_N)/(R+SL_R)$		52,38	

Anno di riferimento: 1992

Mass balance of the city of Rome (1992)					
Mass balance				MFA - Material Flow Accounting	
#	Description of flow	Units	Mass (local scale)	Mass abiotic g	Mass water g

Nonrenewable Input (locally available)

7	Top soil (erosion, wheathering)	g/yr	6,15E+11	4,67E+11	1,23E+11
---	---------------------------------	------	----------	----------	----------

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	7,63E+11	1,04E+12	7,40E+12
9	Diesel fuel	g/yr	8,84E+11	1,20E+12	8,58E+12
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,56E+11	2,12E+11	1,51E+12
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	2,65E+11	3,79E+11	2,76E+12
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	7,88E+10	9,62E+10	3,94E+10
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	4,13E+11	5,04E+11	2,06E+11
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	3,12E+11	3,80E+11	1,56E+11
13	Electricity	J/yr	2,77E+16	1,21E+13	4,90E+14
14	Water (from aqueduct)	g/yr	2,91E+14	0,00E+00	2,91E+14
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,39E+10	1,80E+10	0,00E+00
15b	<i>Meat</i>	g/yr	4,99E+10	8,33E+11	2,66E+13
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,10E+11	2,94E+11	0,00E+00
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,65E+11	1,09E+12	8,80E+13
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	6,40E+11	1,59E+12	3,41E+13
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	6,23E+10	0,00E+00	6,23E+10
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	8,39E+10	1,18E+12	1,87E+12
16	Steel and iron	g/yr	3,24E+12	3,56E+13	4,40E+14
17	Copper	g/yr	2,40E+10	4,30E+12	5,68E+12
18	Aluminium	g/yr	5,70E+10	1,08E+12	3,08E+13
19	Cement (Portland)	g/yr	2,48E+12	7,97E+12	4,19E+13
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,15E+13	2,42E+13	9,12E+13
21	Glass	g/yr	1,81E+11	5,32E+11	2,09E+12
22	Plastics	g/yr	2,71E+11	1,33E+12	7,30E+13
23	Asphalt	g/yr	1,11E+11	1,50E+11	1,07E+12
24	Chemicals	g/yr	1,03E+12	4,24E+12	1,25E+14
25	Wood	g/yr	4,85E+11	6,75E+11	1,06E+13
26	Textiles	g/yr	1,45E+10	1,21E+11	2,88E+13
27	Paper and derivatives	g/yr	3,43E+11	1,15E+12	4,26E+13

28 Fertilizers	g/yr	2,63E+11	1,58E+12	1,02E+13
Output				
Total Material Flow			1,04E+14	1,86E+15
Economic product (GDP)	€/yr	4,59E+10		
Material Intensity Factors of GDP of Rome	g/€		2273,85	40456,92
People supported	Units/yr	2,72E+06		
Material Intensity Factors of people of Rome	g/person		3,83E+07	6,81E+08

Energy Analysis (1992)					
#	Flow	units	raw amount	Oil equiv. demand (g oil eq)	Energy demand (J)

Imported Input

8	Gasoline	g/yr	7,63E+11	1,14E+12	4,79E+16
9	Diesel fuel	g/yr	8,84E+11	1,13E+12	4,74E+16
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,56E+11	2,20E+11	9,21E+15
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	2,65E+11	3,26E+11	1,36E+16
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr	7,88E+10	9,07E+10	3,80E+15
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr	4,13E+11	4,75E+11	1,99E+16
12c	<i>Other uses</i>	g/yr	3,12E+11	3,58E+11	1,50E+16
13	Electricity	J/yr	2,77E+16	1,65E+12	6,92E+16
14	Water (from aqueduct)	g/yr	2,91E+14	3,82E+10	1,60E+15
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,39E+10	1,28E+10	5,36E+14
15b	<i>Meat</i>	g/yr	4,99E+10	4,89E+10	2,05E+15
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,10E+11	1,34E+10	5,59E+14
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,65E+11	3,79E+10	1,59E+15
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	6,40E+11	8,89E+10	3,72E+15
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	6,23E+10	3,13E+09	1,31E+14
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	8,39E+10	1,12E+09	4,70E+13
16	Steel and iron	g/yr	3,24E+12	2,23E+12	9,32E+16
17	Copper	g/yr	2,40E+10	5,31E+10	2,22E+15
18	Aluminium	g/yr	5,70E+10	3,88E+11	1,62E+16
19	Cement (Portland)	g/yr	2,48E+12	4,14E+11	1,73E+16
	Rocks and Sediments for building				
20	sector	g/yr	1,15E+13	2,40E+10	1,00E+15
21	Glass	g/yr	1,81E+11	1,14E+11	4,78E+15
22	Plastics	g/yr	2,71E+11	6,08E+11	2,55E+16
23	Asphalt	g/yr	1,11E+11	4,28E+11	1,79E+16
24	Chemicals	g/yr	1,03E+12	2,30E+12	9,65E+16
25	Wood	g/yr	4,85E+11	5,80E+10	2,43E+15
26	Textiles	g/yr	1,45E+10	7,31E+10	3,06E+15
27	Paper and derivatives	g/yr	3,43E+11	3,07E+11	1,29E+16
28	Fertilizers	g/yr	2,63E+11	2,01E+11	8,40E+15

Output

Total energy Flow		1,28E+13	5,38E+17
Economic product (GDP)	€/yr	4,59E+10	
Energy Intensity Factors of GDP of Rome		279,9319	1,2E+07
People supported	Units/yr	2,72E+06	
Energy Intensity Factors of people of Rome		4,72E+06	1,97E+11

Local emissions (1992)								
#	Flow	Energy (J)	Local CO ₂ (g CO ₂)	Local CO (g H ₂ O)	Local NO ₂ (g NO ₂)	Local SO ₂ (g SO ₂)	Local Part. (g part)	Local N ₂ O (g N ₂ O)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	3,36E+16	2,27E+12	3,82E+10	2,11E+10	1,54E+08	2,48E+08	6,37E+07
9	Diesel fuel	3,80E+16	2,90E+12	6,47E+08	7,61E+08	2,47E+08	1,26E+08	1,41E+07
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	7,24E+15	4,91E+11	1,16E+08	2,82E+08	2,10E+06	2,24E+07	1,38E+07
11	Heavy oil for domestic heating	1,13E+16	8,85E+11	1,69E+08	5,76E+08	1,69E+09	6,55E+07	3,84E+06
12	Natural gas							
12a	Domestic use for cooking	3,93E+15	2,23E+11	7,47E+07	3,38E+08	1,14E+06	5,51E+06	7,87E+05
12b	Domestic use for heating	2,06E+16	1,17E+12	3,91E+08	1,77E+09	5,97E+06	2,88E+07	4,12E+06
12c	Other uses	1,55E+16	8,80E+11	2,95E+08	1,34E+09	4,51E+06	2,18E+07	3,11E+06

Local emissions	g/yr	8,81E+12	3,99E+10	2,62E+10	2,11E+09	5,18E+08	1,03E+08
Total emissions per €	g/€	1,92E+02	8,71E-01	5,71E-01	4,60E-02	1,13E-02	2,25E-03
Total emissions per person	g/person	3,24E+06	1,47E+04	9,62E+03	7,74E+02	1,90E+02	3,80E+01

Economic product (GDP)	€/yr	4,59E+10
People supported	Units/yr	2,72E+06

				Global emission flows (1992)					
#	Flow	units	raw amount	Global CO ₂ (g CO ₂)	Global CO (g H ₂ O)	Global NO ₂ (g NO ₂)	Global SO ₂ (g SO ₂)	Global Part. (g part)	Global N ₂ O (g N ₂ O)
Imported Input									
8	Gasoline	g/yr	7,63E+11	3,24E+12	5,46E+10	3,02E+10	2,20E+08	3,54E+08	9,10E+07
9	Diesel fuel	g/yr	8,84E+11	3,61E+12	8,06E+08	9,48E+08	3,08E+08	1,56E+08	1,75E+07
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr	1,56E+11	6,24E+11	1,47E+08	3,59E+08	2,67E+06	2,86E+07	1,75E+07
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr	2,65E+11	1,07E+12	2,05E+08	6,96E+08	2,05E+09	7,91E+07	4,64E+06
12	Natural gas								
12a	Domestic use for cooking	g/yr	7,88E+10	2,15E+11	7,21E+07	3,26E+08	1,10E+06	5,31E+06	7,59E+05
12b	Domestic use for heating	g/yr	4,13E+11	1,13E+12	3,78E+08	1,71E+09	5,76E+06	2,78E+07	3,98E+06
12c	Other uses	g/yr	3,12E+11	8,49E+11	2,85E+08	1,29E+09	4,35E+06	2,10E+07	3,00E+06
13	Electricity	J/yr	2,77E+16	4,35E+12	3,91E+09	4,65E+09	7,75E+09	4,85E+08	7,51E+07
14	Water (from aqueduct)	g/yr	2,91E+14	1,25E+11	2,40E+07	8,16E+07	2,40E+08	9,28E+06	5,44E+05
15	Main Food Items								
15a	Fish	g/yr	1,39E+10	3,99E+10	1,30E+08	7,61E+07	3,28E+06	2,21E+06	3,62E+05

15b	<i>Meat</i>	g/yr	4,99E+10	1,52E+11	4,94E+08	2,91E+08	1,25E+07	8,43E+06	1,38E+06
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,10E+11	4,17E+10	1,35E+08	7,94E+07	3,42E+06	2,31E+06	3,78E+05
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,65E+11	1,18E+11	3,83E+08	2,25E+08	9,71E+06	6,54E+06	1,07E+06
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	6,40E+11	2,77E+11	8,99E+08	5,29E+08	2,28E+07	1,53E+07	2,52E+06
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	6,23E+10	9,75E+09	3,16E+07	1,86E+07	8,01E+05	5,39E+05	8,85E+04
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	8,39E+10	3,50E+09	1,13E+07	6,67E+06	2,87E+05	1,93E+05	3,17E+04
16	Steel and iron	g/yr	3,24E+12	7,31E+12	1,40E+09	4,75E+09	1,40E+10	5,41E+08	3,17E+07
17	Copper	g/yr	2,40E+10	1,74E+11	3,33E+07	1,13E+08	3,33E+08	1,29E+07	7,55E+05
18	Aluminium	g/yr	5,70E+10	1,27E+12	2,43E+08	8,28E+08	2,43E+09	9,41E+07	5,52E+06
19	Cement (Portland)	g/yr	2,48E+12	1,36E+12	2,60E+08	8,84E+08	2,60E+09	1,01E+08	5,89E+06
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,15E+13	7,88E+10	1,51E+07	5,12E+07	1,51E+08	5,83E+06	3,42E+05
21	Glass	g/yr	1,81E+11	3,75E+11	7,18E+07	2,44E+08	7,18E+08	2,77E+07	1,63E+06
22	Plastics	g/yr	2,71E+11	2,00E+12	3,82E+08	1,30E+09	3,82E+09	1,48E+08	8,66E+06
23	Asphalt	g/yr	1,11E+11	1,40E+12	2,69E+08	9,14E+08	2,69E+09	1,04E+08	6,09E+06
24	Chemicals	g/yr	1,03E+12	7,56E+12	1,45E+09	4,92E+09	1,45E+10	5,59E+08	3,28E+07
25	Wood	g/yr	4,85E+11	1,81E+11	5,86E+08	3,45E+08	1,49E+07	1,00E+07	1,64E+06
26	Textiles	g/yr	1,45E+10	2,28E+11	7,40E+08	4,35E+08	1,87E+07	1,26E+07	2,07E+06
27	Paper and derivatives	g/yr	3,43E+11	9,59E+11	3,11E+09	1,83E+09	7,88E+07	5,30E+07	8,70E+06
28	Fertilizers	g/yr	2,63E+11	5,68E+11	9,57E+09	5,29E+09	3,86E+07	6,21E+07	1,60E+07
Total global emissions				3,93E+13	8,06E+10	6,33E+10	5,20E+10	2,93E+09	3,42E+08
Total emissions per €				8,57E+02	1,76E+00	1,38E+00	1,13E+00	6,39E-02	7,45E-03
Total emissions per person				1,44E+07	2,96E+04	2,33E+04	1,91E+04	1,08E+03	1,25E+02

Ecological footprint (1992)						
#	Description of flow	Units	Mass	Mass of CO ₂	Ecological Footprint (ha)	Ecological Footprint (ha/pc)

Imported (with renewable and nonrenewable fractions)

8	Gasoline	g/yr		3,43E+12	6,15E+05	2,26E-01
9	Diesel fuel	g/yr		3,40E+12	6,09E+05	2,24E-01
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	g/yr		6,60E+11	1,18E+05	4,34E-02
11	Heavy oil for domestic heating	g/yr		9,78E+11	1,75E+05	6,44E-02
12	Natural gas					
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	g/yr		2,72E+11	4,88E+04	1,79E-02
12b	<i>Domestic use for heating</i>	g/yr		1,42E+12	2,55E+05	9,38E-02
12c	<i>Other uses</i>	g/yr		1,08E+12	1,93E+05	7,08E-02
13	Electricity	g/yr		4,35E+12	7,81E+05	2,87E-01
15	Main Food Items					
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,39E+10		5,78E+05	2,12E-01
15b	<i>Meat</i>	g/yr	4,99E+10		1,02E+06	3,74E-01
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,10E+11		1,17E+04	4,29E-03
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,65E+11		2,20E+05	8,09E-02
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	6,40E+11		2,33E+05	8,56E-02
15f	<i>Wine and alcoholics</i>	g/yr	6,23E+10		7,33E+04	2,69E-02
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	8,39E+10		1,40E+05	5,13E-02
16	Steel and iron	g/yr		6,68E+12	1,20E+06	4,40E-01
17	Copper	g/yr		1,59E+11	2,85E+04	1,05E-02
18	Aluminium	g/yr		1,16E+12	2,08E+05	7,65E-02
19	Cement (Portland)	g/yr		1,24E+12	2,23E+05	8,18E-02
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr		7,20E+10	1,29E+04	4,74E-03
21	Glass	g/yr		3,43E+11	6,14E+04	2,26E-02

22	Plastics	g/yr	1,83E+12	3,27E+05	1,20E-01
23	Asphalt	g/yr	1,28E+12	2,30E+05	8,45E-02
24	Chemicals	g/yr	6,91E+12	1,24E+06	4,55E-01
25	Wood	g/yr	4,85E+11	1,74E+11	7,03E+04
26	Textiles	g/yr	1,45E+10	2,19E+11	5,38E+04
27	Paper and derivatives	g/yr	3,43E+11	9,22E+11	2,76E+05
28	Fertilizers	g/yr	6,02E+11	1,08E+05	3,96E-02
29	Built Space			5,05E+04	1,85E-02
Output					
	Total Ecological Footprint			9,16E+06	3,36E+00
	Economic product (GDP)	€/yr	4,59E+10		
	Ecological Footprint per €			2,00E-04	
	Population of Rome	Units/yr	2,72E+06		

Table 1. Matter, energy and emergy flows supporting the urban system of Rome (1992)

#	Items	Units	Raw	Transformity (seJ/unit)	Emergy (seJ/yr)
Renewable Input (locally available)					
1	Sun	J/yr	6,43E+18	1	6,43E+18
2	Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface)	J/yr	2,22E+16	2,51E+03	5,58E+19
3	Evapotranspired Rain (Chemical Potential)	J/yr	1,48E+15	2,69E+04	3,97E+19
4	Run-in (river geopotential)	J/yr	1,39E+15	4,66E+04	6,49E+19
5	Waves	J/yr	7,62E+15	5,13E+04	3,91E+20
6	Tides	J/yr	1,24E+14	7,39E+04	9,20E+18
Nonrenewable Input (locally available)					
7	Top soil (erosion, weathering)	g/yr	6,15E+11	2,87E+09	1,76E+21
Imported Input					
8	Gasoline	J/yr	3,36E+16	1,11E+05	3,72E+21
9	Diesel fuel	J/yr	3,80E+16	1,11E+05	4,22E+21
10	LPG (Liquid Petroleum Gas)	J/yr	7,24E+15	1,18E+05	8,54E+20
11	Heavy oil for domestic heating	J/yr	1,13E+16	1,11E+05	1,25E+21
12	Natural gas				
12a	<i>Domestic use for cooking</i>	J/yr	3,93E+15	8,05E+04	3,17E+20
12b	<i>Domestic use for heating</i>	J/yr	2,06E+16	8,05E+04	1,66E+21
12c	<i>Other uses</i>	J/yr	1,55E+16	8,05E+04	1,25E+21
13	Electricity	J/yr	2,77E+16	3,11E+05	8,60E+21
14	Water (from aqueduct)	g/yr	2,91E+14	3,76E+06	1,09E+21
15	Main Food Items				
15a	<i>Fish</i>	g/yr	1,39E+10	2,78E+11	3,86E+21
15b	<i>Meat</i>	g/yr	4,99E+10	3,00E+10	1,50E+21
15c	<i>Fruits and Vegetables</i>	g/yr	2,10E+11	1,01E+09	2,12E+20
15d	<i>Milk, cheese and other derivatives</i>	g/yr	1,65E+11	1,44E+10	2,38E+21
15e	<i>Cereals and derivatives</i>	g/yr	6,40E+11	6,04E+08	3,86E+20
15f	<i>Wine and alcohols</i>	g/yr	6,23E+10	1,41E+09	8,76E+19
15g	<i>Olive and seed oils</i>	g/yr	8,39E+10	4,25E+11	3,56E+22
16	Steel and iron	g/yr	3,24E+12	3,16E+09	1,02E+22
17	Copper	g/yr	2,40E+10	3,36E+09	8,07E+19

18	Aluminium	g/yr	5,70E+10	7,76E+08	4,43E+19
19	Cement (Portland)	g/yr	2,48E+12	1,73E+09	4,28E+21
20	Rocks and Sediments for building sector	g/yr	1,15E+13	1,65E+09	1,90E+22
21	Glass	g/yr	1,81E+11	3,50E+09	6,32E+20
22	Plastics	g/yr	2,71E+11	9,68E+09	2,62E+21
23	Asphalt	g/yr	1,11E+11	9,56E+09	1,06E+21
24	Chemicals	g/yr	1,03E+12	6,38E+08	6,55E+20
25	Wood	g/yr	4,85E+11	6,79E+08	3,30E+20
26	Textiles	g/yr	1,45E+10	1,34E+11	1,94E+21
27	Paper and derivatives	g/yr	3,43E+11	6,55E+09	2,25E+21
28	Fertilizers	g/yr	2,63E+11	8,28E+09	2,17E+21
29	Services for imports	€/yr	8,37E+09	1,64E+12	1,37E+22
30	Imported Labor (Commuters)	people/yr	2,72E+05	3,60E+16	9,80E+21
	Governmental support (salaries, health services, schools, etc)	€/yr	4,83E+09	1,64E+12	7,92E+21
32	Tourism (from Italy and outside)	\$/yr	3,92E+09	3,81E+12	1,49E+22
Output					
	Population	Units/yr	2,72E+06	5,07E+16	1,38E+23
	GDP	€/yr	4,59E+10	3,01E+12	1,38E+23

Table 2. Aggregate energy flows supporting Rome and calculated performance indicators.

		Units	Emergy flows	%
R	Renewable Emergy (maximum among items 1-6)	seJ/yr	3,91E+20	0,3%
N	Locally nonrenewable (item 7)	seJ/yr	1,76E+21	1,3%
F1	Imported emergy of fuels and electricity (sum of items 8-13)	seJ/yr	2,19E+22	15,9%
F2	Imported emergy of water and food (sum of items 14-15)	seJ/yr	4,51E+22	32,7%
F3	Imported emergy of goods and commodities (sum of items 16-28)	seJ/yr	4,53E+22	32,8%
SL _N	Nonrenewable fraction (94%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	2,21E+22	16,0%
SL _R	Renewable fraction (6%) of imported labor & of services for imports (items 29-30)	seJ/yr	1,41E+21	1,0%
U	Total emergy without services and imported labor	seJ/yr	1,14E+23	82,9%
U _{LS}	Total emergy with services and imported labor	seJ/yr	1,38E+23	100,0%
Performance indicators				
GDP	Economic product	€/yr	4,59E+10	
U _{LS} /GDP	Emergy/GDP	seJ/€	3,01E+12	
P	People supported	Units/yr	2723327	
U _{LS} /P	Emergy/person	seJ/person	5,07E+16	
A	Area of Urban System	m ²	1,29E+09	
U _{LS} /A	Empower density	seJ/m ² /yr	1,07E+14	

EYR	Emergy Yield Ratio; $U_{LS}/(F1+F2+F3+SL_N+SL_R)$	1,02
ELR	Environmental Loading Ratio; $(N+F1+F2+F3+SL_N)/(R+SL_R)$	75,54
ESI	Emergy Index of Sustainability (EYR/ELR)	0,01

I fattori di intensità materiale, energetica, ed emergetica nonché i valori di rendimento medio annuale relativi al calcolo dell'impronta ecologica e i fattori di emissione di combustione dei carburanti sono gli stessi utilizzati nel Capitolo 4 e sono pertanto riportati rispettivamente nelle Tabelle 4.3, 4.4, 4.10, 4.9 e 4.6.

Le footnotes delle procedure di calcolo per ciascun anno sono riportate nell'APPENDICE A in coda alla tesi.

Capitolo 6

COMPLESSITA' E SISTEMI ANTROPICI

6.1 Introduzione

La crescita di complessità di un qualunque tipo di sistema in natura comporta sempre un aumento dell'entropia all'esterno del sistema considerato. Tale aumento di entropia si traduce in aumento del disordine e riduzione del livello di organizzazione. Pertanto la crescita di complessità di un sistema comporta sempre la diminuzione di complessità altrove. Ovvero se un sistema aumenta la sua complessità è perché da qualche altra parte all'esterno di esso, in uno o più sistemi, la complessità si va riducendo. Ma può un sistema aumentare le sue dimensioni e la sua complessità all'infinito? La risposta ovviamente è no, o meglio non può esistere alcun sistema di nessun tipo nell'Universo in grado di aumentare la sua complessità all'infinito dal momento che, sebbene non limitato, quello da noi conosciuto è un Universo finito (Lorentz et al., 1952). Allora la domanda è piuttosto la seguente: quanto la complessità di un sistema può crescere, o fino a che punto può spingersi l'aumento di complessità di un sistema? Vi è senz'altro un criterio generale per accingersi allo studio di questa questione, consistente nel fatto che quanto la complessità di un sistema possa crescere dipende sempre da tre fattori: il sistema considerato, il/i sistema/i da cui esso dipende ed il tipo di interazione che lega le parti. Per quanto riguarda i sistemi viventi, è noto che la crescita in dimensioni fisiche di un ecosistema ad esempio, dipende dalla sua capacità di sfruttamento delle risorse disponibili. A tale aumento delle dimensioni può accompagnarsi, anche se non sempre, un aumento della sua complessità. Inizialmente la domanda di risorse necessaria a supportare la crescita del sistema aumenta in modo esponenziale. Col tempo il sistema tende a rallentare sempre di più la crescita in dimensioni fisiche e le risorse disponibili sono sempre più utilizzate per supportare la crescente complessità metabolica, necessaria al mantenimento del sistema. Le dimensioni cessano di aumentare quando il sistema giunge al punto di respirare quanto riesce ad acquisire. Il sistema raggiunge dunque la sua *capacità portante*. Non solo gli ecosistemi ma anche le popolazioni di molte specie presentano un tipo di crescita che segue tale andamento (specie tendenti alla K strategia), descrivibile mediante un modello matematico semplificato (curva di Lotka-Volterra, o anche detta logistica). Se la complessità di un sistema cresce esso aumenterà la sua capacità di reperimento delle risorse dall'esterno e molto probabilmente sarà poi in grado conseguentemente di permettersi delle dimensioni maggiori o comunque con un maggior consumo di risorse, come già accennato nel Capitolo 2.

6.2 Complessità negli organismi

Nel corso della storia evolutiva, una crescente capacità di adattamento all'ambiente in genere ha coinciso con un aumento della complessità degli organismi. Il processo inverso, sebbene in determinate circostanze possa rappresentare una soluzione vincente (regressione evolutiva), è tendenzialmente un fenomeno meno frequente in natura. Ciò è particolarmente vero nei vertebrati dove nel corso dell'evoluzione sono state escogitate sempre nuove soluzioni per migliorare e rendere più efficienti le strutture e i meccanismi di funzionamento degli organismi, al fine di porli ogni volta in vantaggio nella lotta per la sopravvivenza. Tale dinamica ha dato come risultato l'evolversi di specie sempre più adatte ai loro ambienti e sempre più capaci ed efficienti nell'utilizzare e procurarsi le risorse necessarie, e ciò è evidentemente avvenuto nella direzione di un aumento della complessità (a titolo di esempio, si pensi, nel passaggio dai pesci fino ai mammiferi, alla crescita di complessità: del sistema cardiaco, del sistema respiratorio, del sistema nefritico, dell'apparato digerente, del sistema nervoso centrale). La tendenza all'aumento della complessità nell'organizzazione biologica degli organismi (fermo restando la capacità dell'ambiente di poterla supportare), risponde alla necessità di aumentare le probabilità di sopravvivenza. Un organismo (sistema) più complesso è un organismo biologicamente più diversificato, e di conseguenza possiede maggiori possibilità di far fronte in maniera appropriata alle diverse sfide poste dall'ambiente, aumentando le sue probabilità di sopravvivenza: esso è in grado di fornire diverse risposte appropriate a problemi ambientali diversi.

Tuttavia va considerato che le maggiori probabilità di sopravvivenza di un organismo più complesso sono dovute anche al sorgere delle *proprietà emergenti*⁵. Le proprietà emergenti

⁵ L'interrelazione tra le componenti di un sistema spesso dà vita a caratteristiche nuove che non è possibile rilevare mediante l'osservazione delle singole parti costituenti il sistema. Se taluni elementi singolarmente possiedono determinate proprietà, il tipo di rapporto che si stabilisce tra essi genera sistemi caratterizzati da proprietà che dipendono dalle modalità di associazione di tali elementi. Pertanto queste proprietà emergono in seguito all'associarsi degli elementi, e prendono perciò il nome di proprietà emergenti. Esse contraddistinguono un determinato sistema, ed emergono solo con la tipologia di associazioni che i suoi elementi formano. Infatti gli stessi elementi combinati in modo differente possono dar vita a sistemi diversi, caratterizzati da altre proprietà emergenti. A causa dell'enorme difficoltà di poter prevedere quali proprietà emergenti possano venir fuori da una particolare combinazione di elementi, lo studio dei sistemi viene spesso effettuato proprio a partire dalle loro proprietà emergenti. Un tipo di analisi che miri alla comprensione di un sistema complesso mediante approccio puramente riduzionistico risulta essere poco conveniente. Infatti teoricamente la determinazione delle proprietà emergenti di un sistema complesso, a partire dallo studio delle sue componenti, sarebbe possibile solo conoscendo la condizione in cui si trovano tutti gli elementi, istante per istante, soprattutto in relazione con ciascuno degli altri elementi. Si dovrebbe poter cogliere ogni infinitesimale sfumatura, ciascuna delle quali è potenzialmente determinante per l'evoluzione dell'intero sistema in una direzione piuttosto che in un'altra (il cosiddetto *effetto farfalla*). Tutto ciò nella ipotesi di possedere strumenti matematici così potenti da permettere di effettuare le elaborazioni di tali dati. Dal punto di vista matematico molti sistemi possono essere modellizzati con equazioni differenziali alle derivate parziali. Le soluzioni di queste equazioni spesso utilizzano funzioni esponenziali e quindi anche una modesta variazione dei dati in ingresso si ripercuote sulla soluzione con un andamento esponenziale potendo quindi alterare in modo determinante l'andamento del modello in funzione del tempo. Il clima, il mercato azionario, sono esempi di sistemi complessi studiati in questo modo, per i quali effettuare previsioni diventa tanto più difficile, quanto più le previsioni sono fatte a lungo termine. Di fatto oltre un certo margine temporale non è più possibile spingersi poiché le previsioni non sono più attendibili. Naturalmente tutto questo è tanto più impensabile quanto più complesso diventa il sistema. Pertanto lo studio di sistemi molto complessi come quelli viventi risulta molto più conveniente se effettuato partendo dalle proprietà emergenti osservabili. Banalmente, ad esempio, un organismo costituisce un sistema complesso che sarebbe impossibile da descrivere disponendo delle sole conoscenze riguardanti le sue cellule; oppure, non è possibile studiare un ecosistema conoscendo solo la biologia delle varie specie che vi fanno parte: è necessario conoscere il tipo di relazioni che lega queste ultime, nonché la struttura dei popolamenti delle specie.

fanno sì che un sistema non sia identificabile con l'insieme delle sue componenti. Il valore aggiunto che deriva dall'organizzazione delle sue parti è qualcosa di nuovo e diverso, superiore alla "somma" delle parti. Disporre di tutta la materia disaggregata di cui un organismo è fatto non è la stessa cosa che avere l'organismo vivo⁶. L'organizzazione sia strutturale che funzionale degli elementi di un sistema conferisce al sistema stesso determinate peculiarità che possono tradursi nella capacità di svolgere alcune funzioni che le singole parti individualmente non sono in grado di realizzare. La capacità di ottenere attraverso l'organizzazione collettiva nuovi risultati che siano di beneficio per tutte le componenti è tipico dei sistemi viventi. Si pensi a titolo di esempio, alla conquista evolutiva della pluricellularità. All'interno di un organismo pluricellulare le singole cellule hanno maggiori probabilità di vita, godendo di vantaggi che individualmente non potevano avere. Le diverse parti, che singolarmente sono adatte a risolvere i "propri" problemi adattativi, lavorando insieme sono in grado di risolvere ulteriori problemi a causa del sorgere delle proprietà emergenti. Le maggiori probabilità di sopravvivenza che ne derivano sono dovute alla conquista di soluzioni adattative di maggiore "potenza", capaci di emergere solo attraverso l'unione sinergica delle singole parti. Quindi quanto più l'organismo è complesso e quindi diversificato, più alto è il numero di combinazioni che collettivamente possono essere fornite in risposta ai problemi adattativi.

Naturalmente in tutto ciò è inclusa l'evoluzione del sistema nervoso e delle sue funzioni comprese quelle che riguardano il comportamento. Pertanto l'aumento di complessità del sistema nervoso si traduce anche in comportamenti sempre più complessi.

Comportamenti sempre più elaborati, come l'aumento della "socialità" od un sempre maggior coinvolgimento di elementi esterni agli organismi, altro non sono che la manifestazione esteriore della crescita di complessità del sistema nervoso centrale, ovvero la sua attuazione, finalizzata ad un migliore adattamento all'ambiente, e pertanto ad un aumento delle possibilità di sopravvivenza. Anche se paradossalmente l'aumento di complessità del sistema nervoso centrale rappresenta "solo" una delle tante strategie messe a punto dall'evoluzione, per far fronte alla continua esigenza di aumentare la capacità di adattamento all'ambiente.

Nell'uomo la complessità del sistema nervoso centrale raggiunge i massimi livelli conosciuti. Essa è tale da aver conferito alla specie umana una enorme capacità di adattamento anche ad ambienti che non corrispondono all'ambiente di origine in cui è avvenuta la sua evoluzione e la sua speciazione. Di fatto l'enorme complessità del sistema nervoso centrale, ha messo l'uomo in condizioni di escogitare soluzioni adattative tali da renderlo addirittura capace di adattare l'ambiente a se stesso, asservendolo ai propri bisogni.

Lo sviluppo di una abilità sempre maggiore nell'articolazione e nel coordinamento delle mani, rese libere molto tempo prima dalla posizione eretta tipica degli ominidi, ha conferito alla nostra specie la capacità di dominare la materia in una maniera che non ha precedenti nella storia evolutiva. Come è noto ciò è il risultato di un lento processo di coevoluzione tra il cervello e le mani. Durante l'evoluzione, infatti, quando l'uomo iniziò a cibarsi anche di carne, più migliorava la sua capacità di realizzare strumenti adatti a spezzare ed a tagliare la carne più aumentava l'apporto di nuove proteine al cervello che in questo modo aveva la possibilità di evolversi e diventare sempre più complesso. A tale evoluzione del cervello corrispondeva a sua volta una sempre migliore capacità di coordinamento delle mani e delle dita che si traduceva in un'abilità via via crescente nel realizzare utensili capaci di aumentare, così, sempre di più l'apporto di carne. Tale coevoluzione ha conferito all'uomo una enorme

⁶ Ciò vale per ogni tipo di sistema, anche per quelli di tipo artificiale, i quali svolgono le proprie funzioni solo se le loro componenti sono organizzate in un certo modo (in una macchina elettrica, ad esempio: le connessioni dei cavi elettrici, i resistori, gli induttori, ecc). In altre parole avere tutte le parti di una macchina ammassate insieme non significa godere della macchina.

creatività rendendolo in grado di plasmare la materia con grande inventiva mettendolo così in condizioni di realizzare “opere” capaci di migliorare sempre di più il suo adattamento all’ambiente ed aumentare in modo sempre maggiore la sua efficienza nello sfruttamento delle risorse. La concomitante evoluzione di un sistema di comunicazione sempre più sofisticato (la lingua), hanno dotato l’uomo di una sempre maggiore socialità. Ed è infatti il gruppo un altro aspetto peculiare capace di fornire all’uomo una forza maggiore (proprietà emergenti) nella competizione per le risorse e conseguentemente un maggiore successo adattativo. La possibilità di coadiuvarsi a vicenda nei vari tipi di situazioni e di attività, di suddividersi i compiti, di scambiarsi informazioni frutto anche dell’esperienza di uno solo, di portare a compimento opere ed imprese realizzabili solo in coesione, sono alcuni dei vantaggi che sono rappresentati dall’adattamento a vivere in gruppo che complessivamente aumenta le probabilità di sopravvivenza per ognuno dei singoli individui che vi fanno parte. Un linguaggio sempre più sofisticato migliorando la comunicazione non fa altro che favorire la condizione del gruppo. Se dunque il gruppo ha rappresentato una carta vincente nell’evoluzione dell’uomo è stata contemporaneamente necessaria una concomitante evoluzione della complessità cerebrale che riguardasse la regolazione dei rapporti sociali ed il linguaggio. Una specie che trae sempre più forza dal suo stare in gruppo aumenta inevitabilmente la complessità dei suoi rapporti sociali, espressione di una corrispondente complessità al livello del sistema nervoso centrale.

Tuttavia va considerato anche che l’aspetto che conferisce un potenziale adattativo enormemente maggiore alla specie umana rispetto alle altre sta nella sua possibilità di avvalersi di mezzi esterni per poter memorizzare quelle informazioni che prima potevano essere conservate esclusivamente in seno al proprio cervello.

La possibilità di fissare informazioni su cera, argilla, papiro, carta e più recentemente mediante strumento informatico, forniscono all’uomo la capacità di conservare informazioni che se affidate alla sola memoria cerebrale andrebbero perse. Ciò conferisce ai gruppi umani la capacità di aumentare in maniera teoricamente smisurata il numero di informazioni accumulabili e di conseguenza la complessità degli stessi gruppi umani. Le società tecnologiche sono così complesse perché l’uomo moderno usufruisce di una quantità di informazioni enorme frutto dell’accumulo di migliaia d’anni. Tale accumulo è stato possibile grazie all’utilizzo dei vari strumenti di raccolta delle informazioni che si è fatto nel corso della storia. Per circa 590 mila anni gli individui della nostra specie sono vissuti da cacciatori-raccoglitori, progredendo lentamente nella tecnica. I due eventi che hanno aumentato bruscamente la velocità di sviluppo della tecnica sono stati l’introduzione dell’agricoltura e della scrittura (quest’ultima determinata dalla prima), circa diecimila anni fa. Sebbene la nostra specie abbia sempre posseduto (tra l’altro come propria prerogativa) la capacità di utilizzare strumenti per fissare informazioni (es. disegni sulle pareti delle caverne), è stato solo dopo l’introduzione dell’agricoltura che ha attuato un impiego sistematico di tale capacità, con la scrittura. Come, difatti è noto, l’esigenza della scrittura emerge in seguito alla necessità di misurazione e di quantificazione di terreni e raccolti, che poi gradualmente, a causa degli aumenti di popolazione e di complessità delle società, dovuti proprio alla maggiore disponibilità di cibo che l’agricoltura⁷ fornisce rispetto al periodo in cui l’uomo era cacciatore-raccoglitore, l’impiego della scrittura cresce sempre di più, divenendo sempre più necessario ed indispensabile per la gestione di società che andavano aumentando via via nelle dimensioni e nella complessità.

⁷ Di fatto è da questo momento in poi che l’uomo sempre di più svincola da se il doversi adattare all’ambiente e comincia ad adattare via via l’ambiente a se stesso.

6.3 Influenza reciproca tra disponibilità delle risorse e complessità

Dunque la peculiarità dei gruppi umani di riuscire ad accumulare una quantità enorme di informazioni culturali grazie all'ausilio di supporti esterni, ha messo le popolazioni umane in condizioni di accrescere enormemente la propria complessità. L'esigenza di ricorrere ad un uso sistematico di supporti esterni è scaturita in seguito all'invenzione dell'agricoltura, la quale costituisce di fatto la prima rivoluzione tecnica della storia, o meglio, grazie ad essa, la storia può avere inizio. Da tale rivoluzione tecnica l'uomo sarà in grado di godere di un quantitativo di risorse inimmaginabile ai tempi della preistoria, che determinerà un enorme aumento delle dimensioni e della complessità delle popolazioni.

Dunque per i gruppi umani, la conquista della tecnica agricola costituisce il raggiungimento di una nuova soluzione adattativa molto potente che corrisponde all'acquisizione di nuove informazioni culturali e conseguentemente ad un aumento della complessità. Tale guadagno di complessità pone i gruppi umani in grado di sfruttare le risorse naturali in maniera decisamente più intensa ed efficiente. Dall'aumento delle risorse disponibili scaturiscono a loro volta ulteriori conquiste della tecnica, tra le prime vi è la scrittura, capace di aumentare ulteriormente la complessità dei gruppi umani. La scrittura infatti aumentando enormemente il numero di informazioni memorizzabili e disponibili (mediante strumenti esterni), aumenta enormemente la complessità dei gruppi umani. La capacità dell'uomo di fissare informazioni originariamente memorizzabili solo mediante connessioni cerebrali, in maniera esterna, lo rende capace di accumulare ulteriore complessità. Praticamente quasi tutta la complessità delle società umane (strutturale e funzionale), visibilmente osservabile per lo più nelle opere e nelle attività dell'uomo, è la traduzione in atto di tali informazioni. Le opere dell'uomo e tutto ciò che producono le società sono la realizzazione della complessità che risiede nelle informazioni di cui l'uomo dispone. La complessità che ha caratterizzato le varie società nel corso della storia è stata il frutto di un vicendevole influsso stabilitosi tra capacità di reperimento delle risorse e livello di complessità dei sistemi. Tale meccanismo fa sì che l'uno influenzi l'altro e viceversa, sia in positivo che in negativo, pertanto sia nella direzione di un incremento che in quella di una diminuzione, costituendo la motivazione basilare del fiorire, del crescere, del persistere e del decadere delle civiltà (Tainter, 1990). Anche le attuali società industrializzate sono il risultato di un protratto ciclo a feedback (anche se non di tipo lineare) tra crescita nell'approvvigionamento delle risorse ed aumento di complessità. In particolare l'enorme complessità che le caratterizza (probabilmente senza precedenti storici) è spiegabile alla luce della "recente" acquisizione di un nuovo tipo di risorse: i combustibili fossili. Di essi non è chiaro quanto ancora siano in grado di spostare ulteriormente in alto la capacità portante dell'uomo, ma soprattutto una volta raggiunta non è noto per quanto tempo siano capaci di mantenerla.

6.4 Componenti e relazioni

Le società umane aumentano la loro complessità moltiplicando il numero di componenti ed il numero di relazioni che si stabiliscono fra tali componenti. Valutare il numero delle componenti risulta relativamente facile, una volta stabilita la tipologia delle componenti da considerare (i singoli individui o il numero di mestieri o una combinazione di entrambe le categorie). Più elaborata sembrerebbe invece essere la determinazione del numero di relazioni che esistono tra le componenti di un gruppo umano. Le relazioni possono essere di vario genere. Un primo tipo è costituito dalle *relazioni di tipo lavorativo*. Esse permettono il fluire delle risorse, inteso sia come scambio di beni e servizi che come scambio di informazioni. Il trasferimento delle risorse tra le componenti del sistema permette l'appagamento dei differenti tipi di *bisogni* dell'uomo (Maslow, 1962). Poi vi sono le *relazioni di tipo affettivo* che

possono essere in parte favorite dalle relazioni di tipo lavorativo (i rapporti di tipo lavorativo possono essere importanti nella misura in cui favoriscono il numero di incontri), finalizzate all'appagamento dei bisogni della *sfera affettiva* e della *sfera sociale* (relazioni genitore-figlio, uomo-donna, fratello-fratello, amico-amico, ecc). Tale tipo di relazioni sono di importanza fondamentale, poiché dalla sfera affettiva dipendono tutte le altre sfere, inclusa quella sociale. Di conseguenza nonostante gli equilibri di un sistema antropico siano regolati dal fluire delle risorse tra le sue parti, e tra esso e l'ambiente esterno, non va dimenticato che ciò implicitamente avviene presupponendo comunque un certo "livello medio" di appagamento della sfera affettiva degli individui. Determinate macro-tendenze che a livello di sistema possono essere più o meno osservabili e quantificabili per mezzo di modelli di descrizione semplificata, dipendono a monte dalla natura dei singoli individui la cui complessità caratteriale e psicologica si basa sulla sfera affettiva. I bisogni umani sono di vario tipo, ed il loro mancato appagamento, a seconda del livello gerarchico occupato all'interno della *Piramide di Maslow* (Maslow, 1962), può comportare un'innumerabile quantità di reazioni diverse. E' noto ad esempio che l'aggressività tendenzialmente cresce al diminuire della disponibilità delle risorse. Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più scarse divengono le risorse, e quanto più ad essere interessate sono quelle risorse necessarie a soddisfare i bisogni primari, (come il cibo, i vestiti, la casa, in seguito i bisogni culturali ed estetici). Tuttavia molte "disfunzioni" comportamentali anche se gravi non derivano dal mancato appagamento di bisogni primari, dovuti alla scarsità di talune risorse. Sebbene la questione tutt'oggi sia ancora oggetto di dibattito, è oramai acquisito che un inadeguato appagamento della sfera affettiva sia la causa principale di atteggiamenti di squilibrio negli individui. La molteplicità degli atteggiamenti umani che a livello di sistema si traducono in tendenze o scelte di insieme, e che contingentemente indirizzano il sistema in una direzione piuttosto che in un'altra, dipendono dunque dal grado di appagamento dei singoli individui. Si intuisce dunque l'importanza cruciale delle relazioni di tipo affettivo che sebbene in se stesse non riguardino lo scambio di risorse, risultando per questo quasi impossibili da quantificare, rimangono comunque intimamente e celatamente a fondamento dell'equilibrio dei sistemi antropici. In particolare, molto probabilmente, una cura maggiore e più appropriata di tale tipo di relazioni potrebbe avere effetti strutturalmente diversi sulla costituzione delle società, mutando dal profondo la loro impostazione e di conseguenza il loro orientamento verso determinate tendenze piuttosto che altre.

Le relazioni di tipo lavorativo - invece - per essere costruite tra gli individui all'interno di un sistema antropico comportano a seconda dei casi un impiego quantitativo differente delle risorse. Per costruire relazioni lavorative in cui avvenga lo scambio di informazioni (risorse) ad esempio di tipo culturale, c'è bisogno di costruire scuole, università, centri di ricerca, teatri, di impiegare risorse per disporre degli strumenti di ricerca, per diffondere le informazioni mediante la pubblicazione di libri, riviste, giornali, per usufruire di mezzi informatici, per formare e pagare gli intellettuali, ecc. Anche per garantire lo scambio di risorse di altro tipo destinate all'appagamento di altri tipi di bisogni sono richieste a loro volta risorse. Ad esempio per soddisfare il *bisogno di appartenenza* è necessario impiegare risorse per realizzare strutture destinate all'incontro e alla ricreazione come ad esempio spazi, giardini, parchi, locali pubblici, bar, ristoranti, e per pagare il personale o le organizzazioni di ricreazione. Il *bisogno fisiologico* del godimento di buona salute necessita per la sua soddisfazione della realizzazione di ospedali, di strutture mediche, della preparazione di personale medico, nonché di palestre, piscine, campi, formazione di allenatori, necessari anche alla soddisfazione congiunta dei *bisogni estetici*⁸.

⁸ Secondo i dati raccolti in Italia da recenti indagini (anno 2000 - Ministero degli affari sociali) su di un campione rappresentativo di 2000 italiani intervistati, risulterebbe che, nella propria città, i servizi ritenuti carenti

E' ipotizzabile che la qualità e la quantità delle relazioni tra gli individui di un sistema siano fra i punti più critici dei sistemi stessi. Probabilmente esse sono il punto più fragile delle nostre società, alla base della grande maggioranza dei problemi interni alle stesse società. Mentre il numero di componenti aumenta sempre in qualità e quantità (numero di persone, o numero di mestieri, o numero di persone nei vari mestieri), la qualità e la quantità delle connessioni rimane bassa. Ciò comporta che il fluire delle risorse all'interno dei sistemi venga affetto da "fenomeni di congestione". L'eccessiva squilibrio nella distribuzione delle risorse che non di rado ne consegue, è alla causa del sorgere di molte patologie sociali che sfociano molto spesso nello scatenarsi di problemi endogeni che tendenzialmente hanno ripercussioni negative sulla complessità dei sistemi stessi e che nel lungo termine porterebbero poi al loro declino (Tainter, 1990).

6.5 Relazioni di tipo lavorativo e valore aggiunto

Come visto nel precedente paragrafo le relazioni di tipo lavorativo permettono lo scambio delle risorse consentendo il loro fluire all'interno del sistema. Per questa ragione esse potrebbero costituire un tipo di relazioni più facilmente quantificabili. Esse inoltre possono dar vita indirettamente a relazioni di tipo affettivo. Ogni volta che due individui si relazionano per dare luogo ad uno scambio di risorse (relazione di tipo lavorativo), avviene un incremento del valore monetario della risorsa trasferita. Ciò avviene perché tra un trasferimento e quello successivo, la risorsa viene investita di un *valore aggiunto* per il fatto che essa non è più la stessa. Essa infatti subisce una trasformazione dovuta a processo industriale o artigianale che le conferiscono nuove proprietà che prima non possedeva. In effetti quando si produce un nuovo bene, per la sua realizzazione vengono impiegate più risorse (materie prime, macchinari, energia, mano d'opera, ecc) ciascuna delle quali ha un suo costo in termini monetari. Il valore del nuovo bene (o risorsa) prodotto non è uguale alla somma dei costi di tutte le risorse che sono state impiegate per produrlo, ma bensì presenta un valore più elevato. Il produttore infatti volendo trarre profitto dalla sua attività, ha bisogno che il valore del nuovo bene sia superiore alla somma dei costi sostenuti. Viceversa non sarebbe interessato alla sua produzione. Naturalmente poiché il prezzo segue la legge della domanda e dell'offerta, il produttore nell'attribuire il valore al nuovo bene, dovrà comunque attenersi ai valori di mercato. In caso contrario egli rimarrebbe fuori dal mercato venendo meno al suo scopo⁹.

Anche nel caso in cui la risorsa non sia trasformata, ma semplicemente trasferita, il suo valore aumenta per il semplice fatto che è stata resa maggiormente disponibile (magari perché trasportata dal mercato all'ingrosso al negozio sottocasa; oppure perché trasferita da luoghi lontani fin nel cuore della città). Anche qui sono implicati dei costi, pertanto chi attribuirà al bene un valore aggiunto, per il fatto di averlo reso più disponibile, deve comunque attenersi alle leggi di mercato. Lo stesso discorso vale anche quando ad essere scambiati sono dei servizi che non comportano il trasferimento di beni materiali tra individui. Chi offre il servizio deve sostenere dei costi, e per trarre profitto dalla sua attività ha bisogno di creare un valore aggiunto.

Se dunque ad ogni scambio corrisponde un evento di relazione (di tipo lavorativo), e se ciascuno scambio implica un aumento del valore aggiunto, il numero di connessioni esistenti

non sono quelli di carattere macro-commerciale, per i quali si nota al contrario una smisurata proliferazione, ma bensì un altro tipo di servizi: spazi sportivi e parchi (45%), cinema (36%), teatri (31%), sale per concerti (soprattutto musica rock e contemporanea), (26%).

⁹ In economia lo scopo di un'impresa è la sua sopravvivenza. A tale fine è necessario che i guadagni siano superiori ai costi. Da qui si intuisce (anche per i non addetti ai lavori) come fa il mercato ad essere un sistema che si auto-organizza.

in un gruppo umano, in una nazione, in una regione, o in una città è funzione del valore aggiunto totale del sistema antropico considerato.

Dunque la determinazione di un valore quantitativo della complessità per i sistemi antropici sembrerebbe essere fattibile alla luce di quanto considerato. Del resto tutto ciò che si osserva nei sistemi antropici, tutte le opere dell'uomo, passano attraverso relazioni di tipo lavorativo. Dunque la complessità che caratterizza un sistema umano, la quale può essere esternamente più o meno osservabile nei vari aspetti che caratterizzano una società, potrebbe essere colta e misurata mediante la costruzione di un indice che tenga conto del valore aggiunto. Se una tale cosa funzionasse presenterebbe il vantaggio di non dover entrare nel merito di quali aspetti della società considerare per determinare la sua complessità. Svincolandosi da tali problemi un indice di questo tipo difficilmente rischierebbe di tralasciare eventuali aspetti della complessità meno "visibili".

Il valore aggiunto inoltre incorpora in se sia la quantità che la qualità di risorsa fluita, fornendo indicazioni quindi anche sul livello di "intensità" della connessione stabilitasi. Infatti ciascuno scambio prevede un proprio trasferimento di risorse. Tuttavia da ciò non è possibile determinare come le connessioni stabilitesi siano distribuite tra le varie parti del sistema. Ad esempio non si può capire se le relazioni esistenti siano equamente distribuite all'interno del sistema o siano prevalentemente concentrate tra poche componenti. Per aver informazioni riguardo tale aspetto abbiamo bisogno di coniugare insieme le informazioni riguardanti il livello di connessioni esistenti con informazioni che descrivono la struttura del sistema.

In effetti anche gran parte di quelle relazioni che non sono di tipo lavorativo, rientrano in tale conteggio. Ad esempio usufruire per la propria ricreazione di spazi pubblici gratuiti, apparentemente non comporta lo scambio di risorse tra due parti. Tuttavia va tenuto conto che per produrre e/o mantenere costantemente uno spazio pubblico in condizioni di fruibilità, è necessario l'intervento di qualcuno. Normalmente il comune, la regione, lo stato o l'ente parco, provvedono a tali attività. Naturalmente dietro tali "sigle" vi è il lavoro di diverse parti e di conseguenza il trasferimento di risorse lungo diversi step. Il circuito viene chiuso dal fruitore che attraverso il sistema di tassazione, di fatto, finisce col relazionarsi anch'esso con altre parti mediante relazioni di tipo lavorativo. Dunque all'interno del valore aggiunto totale sono incorporati anche tutti questi passaggi che comportano il trasferimento di risorse e quindi lo stabilirsi di relazioni. Tutto ciò che un qualsiasi ente (stato, regione, provincia, ecc) può offrire in modo gratuito o meno gratuito, come ad esempio la scuola, la sanità o altri servizi, passa comunque attraverso relazioni di tipo lavorativo. Dunque se da un lato le leggi di mercato garantiscono che i singoli valori aggiunti non assumano pesi sproporzionati, dall'altro lato si ha la certezza che ogni volta che subentra un singolo valore aggiunto è avvenuto uno scambio di risorse e quindi una relazione di tipo lavorativo. Tuttavia, di tutto il valore aggiunto prodotto, convenzionalmente nell'arco di un anno, ciò che comporta di fatto gli scambi è la parte corrispondente al *consumo*. Infatti la quantità restante costituita dal cosiddetto *risparmio* viene tolta dal circuito economico ed in seguito parzialmente reintrodotta per mezzo degli *investimenti*¹⁰. Inoltre, nonostante l'azione del mercato, che con la legge della domanda e dell'offerta funge da volano nei confronti dello sbalzo dei prezzi, i fenomeni di inflazione fisiologici al sistema stesso potrebbero determinare uno sfasamento nel rapporto tra valore aggiunto e quantità di connessioni. Se dunque si intende intraprendere la

¹⁰ L'alimentazione del circuito economico dovuto agli investimenti avviene in un secondo momento, in periodi convenzionalmente successivi all'anno di riferimento in cui viene conteggiato il valore aggiunto. Ciò avviene attraverso i consumi futuri che l'investimento ha determinato. Naturalmente però non tutti i tipi di investimento hanno successive ricadute sull'economia. Alcuni investimenti soprattutto di tipo finanziario non comportano l'alimentazione dell'economia di un paese.

strada di costruire un indice che misuri la complessità di un sistema antropico, mediante l'utilizzo del valore aggiunto non si può non tenere conto del tasso di inflazione e del fatto che è il consumo ad essere effettivamente indicativo degli scambi.

6.6 Indice di complessità σ

Proviamo a dare una prima definizione generale di complessità da un punto di vista quantitativo, mediante relazione matematica. Dato un sistema S , formato da N componenti e da R connessioni esistenti tra le componenti (Figura 6.1), la complessità può essere definita tramite la seguente espressione algebrica:

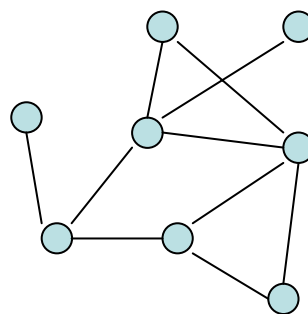
$$c = N \times R \quad (1)$$

Ossia il livello di complessità del sistema considerato può essere valutato moltiplicando il numero di componenti per il numero di connessioni. Inoltre il numero di connessioni possibili è incluso all'interno del seguente intervallo (Shannon 1950):

$$N-1 \leq C \leq N(N-1)/2 \quad (2)$$

Nel caso di un sistema antropico delle dimensioni di una città ad esempio, è estremamente improbabile che il numero di connessioni raggiunga il suo valore massimo. Ovvero è impensabile che ogni singolo individuo appartenente ad un sistema del genere sia in relazione con tutti gli altri individui del sistema.

S = sistema



N = numero di componenti

R = numero di relazioni

Figura 6.1

Sistema generico S formato da N componenti ed R relazioni.

Da un punto di vista strutturale, usufruendo dell'indice di Shannon è possibile definire un indice di complessità che riguarda la struttura del sistema. Assumendo che il sistema S sia un sistema antropico e che le sue componenti siano i singoli individui, distribuiti tra diverse categorie che assumiamo siano i mestieri che ciascuno svolge, possiamo utilizzare la seguente espressione:

$$H' = - \sum_{i=1}^s (n_i/N \log n_i/N) \quad (3)$$

dove s è il numero di mestieri, n_i il numero di individui che svolgono l' i -esimo mestiere ed N il numero totale di individui appartenenti al sistema. Tale indice fornisce informazioni esclusivamente sulla struttura del sistema, senza entrare nel merito delle relazioni esistenti tra le componenti. L'indice di Shannon fornisce informazioni sulla distribuzione degli individui tra le varie categorie di appartenenza (nel nostro caso i mestieri), ed è usato in ecologia per misurare la *diversità specifica* di un ecosistema ed il livello di equidistribuzione degli organismi tra le varie specie di appartenenza. Esso risulta prestarsi molto bene per valutare la struttura dell'ecosistema, misurandone la sua complessità. Inoltre da un punto di vista matematico risulta essere un indice molto robusto. A differenza di altri indici infatti all'aumentare del numero di specie non manifesta distorsioni.

Nella maniera in cui la (1) è concepita, impiegando N , considera il semplice numero totale di individui, che sono sì le componenti del sistema ma così come sono poste, non rendono altro che l'informazione algebrica del loro ammontare, esclusivamente in termini di somma. Ricorrendo invece alla (3) che presenta il vantaggio di considerare le diverse componenti così come sono distribuite all'interno del sistema, si potrebbe costruire un indice di complessità che risulti essere più descrittivo, in grado cioè di fornire un'informazione qualitativamente migliore.

Definiamo dunque un nuovo indice di complessità costituito nel seguente modo:

$$\sigma = - \sum_{i=1}^s (n_i/N \log n_i/N) \times R \quad (4)$$

anche uguale a:

$$\sigma = H' \times R \quad (5)$$

Dove R è il numero di connessioni del sistema. Tale relazione fornisce informazioni, congiuntamente, sulla struttura del sistema e sulle relazioni esistenti fra gli elementi che ve ne fanno parte. Alla luce delle considerazioni fatte nel precedente paragrafo, poniamo:

$$R = f(C) \quad (6)$$

Ossia, in un sistema antropico, il numero di connessioni o relazioni R è funzione del consumo C praticato dai suoi individui. Se assumiamo dunque che il numero di connessioni cresca all'aumentare del consumo, la (6) diventa:

$$\frac{dR}{dC} = \rho \quad (7)$$

e pertanto:

$$dR = \rho dC \quad (8)$$

Se ρ a sua volta dipende da C , prima di effettuare l'integrazione, ne dovremmo determinare la funzione che la lega a C . Nella ipotesi più semplice in cui ρ è una costante il numero di relazioni esistenti è dato da:

$$\int_{R_0}^R dR = \rho \int_{C_0}^C dC \quad (9)$$

$$R - R_0 = \rho (C - C_0) \quad (10)$$

$$R = \rho (C - C_0) + R_0 \quad (11)$$

dove R_0 e C_0 sono rispettivamente: il numero di relazioni iniziali ed il consumo iniziale.

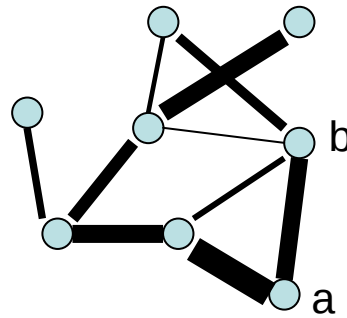
Il significato del coefficiente di proporzionalità ρ è legato all'intensità dello scambio di risorse. Infatti il suo reciproco $\chi = 1/\rho$ è la quantità di risorse trasferite ad ogni scambio unitario. Ovviamente però non esiste un unico valore per χ . Durante ogni singolo scambio l'ammontare delle risorse trasferite è del tutto variabile. Esso dipende dal tipo di scambio effettuato, ossia dalla qualità e dalla quantità delle risorse trasferite. Tuttavia anche nella ipotesi di stimarne un valore teorico, inteso come quantità media di risorse trasferite durante ogni singolo scambio tra due componenti del sistema, va tenuto conto che con estrema probabilità esso varia anche al variare del consumo; molto probabilmente tale valore teorico cresce all'aumentare del consumo complessivo¹¹.

Consideriamo tuttavia il sistema di Figura 6.1. Le componenti sono tra di loro collegate tramite un certo numero di relazioni. Da un sistema così rappresentato è possibile ricavare informazioni solo sul numero di connessioni. Oltre a constatare l'esistenza o meno della singola connessione, supponiamo invece di voler ricavare informazioni anche sull'*intensità* di tale connessione (Figura 6.2). Definiamo dunque l'intensità di una connessione come: la *quantità di risorse trasferita nell'unità di tempo*, da una parte all'altra, ovvero dalla componente generica a alla componente generica b (Figura 6.2). Tale trasferimento può avvenire nell'ambito di una o più interazioni (*contatto*) stabilitesi tra le due componenti durante l'intervallo di tempo preso a riferimento. Definiamo convenzionalmente contatto: la *singola interazione nell'ambito della quale il quantitativo di risorse trasferito assume un valore elementare di riferimento*, arbitrariamente scelto.

Se anziché considerare il numero di connessioni esistenti in un sistema valutiamo il numero di contatti, le relazioni funzionali tra le sue componenti possono essere determinate in termini dinamici. Pertanto diviene possibile considerare un sistema non più solo in senso statico ma bensì anche dal punto di vista del suo divenire nel tempo. Assumiamo dunque il contatto come l'unità di interazione base, corrispondente ad un quantitativo elementare di risorse prestabilito. Quindi a termine di un lasso di tempo definito, anche se il trasferimento di risorse è avvenuto in una sola volta, lo immaginiamo suddiviso in un determinato numero di trasferimenti più piccoli, corrispondenti al numero di contatti in cui esso è divisibile. Analogamente, se alla fine dell'intervallo di tempo, il trasferimento di risorse si è realizzato in diversi momenti separati, considereremo sempre il complessivo ammontare delle risorse, suddiviso nelle quantità elementari riferibili al numero di contatti in cui l'intero trasferimento è scomponibile (Figura 6.3).

¹¹ Tale funzione potrebbe essere ricavata empiricamente e poi validata, attraverso tecniche di "data mining" e simulazione numerica, ma come vedremo in seguito ciò non risulta rilevante ai fini del discorso che vogliamo portare avanti.

S = sistema



N = numero di componenti

R = numero di relazioni

Figura 6.2

Il sistema rappresentato è lo stesso sistema di Figura 6.1. A differenza della prima illustrazione, però, qui sono rappresentate anche le *intensità* delle connessioni.

Se dunque assumiamo che R nella (7) sia il numero di contatti anziché il numero di connessioni, allora ρ è costante, ed il suo reciproco χ diviene uguale proprio al *quantitativo elementare di risorse trasferito durante un singolo contatto*. Quindi se ρ è costante l'integrazione della (8) può essere impostata così come nella (9) e di conseguenza il numero di contatti sarà dato dalla (11). Naturalmente il contatto costituisce una congettura astratta che nella realtà non esiste. Tuttavia esso rappresenta un modo per considerare quantitativamente le connessioni mediante una base comune costituita da un'unità fondamentale di riferimento. Se all'interno della (4) sostituiamo R con l'espressione (11), otteniamo:

$$\sigma = - \sum_{i=1}^S (n_i/N \log n_i/N) \times [\rho (C - C_0) + R_0] \quad (12)$$

Fissiamo arbitrariamente il valore di ρ ponendolo per semplicità uguale ad uno. Poiché la quantità $(C - C_0)$ è espressa in €, per rendere adimensionale l'indice σ , l'unità di misura di ρ è l'€⁻¹. Per scorporare da R connessioni fittizie, dovute all'esistenza di fenomeni inflazionistici, è necessario dividere il consumo per $1 + t$ (t = tasso di inflazione). Inoltre se consideriamo che il consumo del valore aggiunto effettuato dall'inizio dell'anno, parta convenzionalmente dal valore zero e che i contatti, di conseguenza, comincino a stabilirsi a partire dal consumo iniziale, allora R_0 e C_0 sono entrambi uguali a zero e la (12) diviene:

$$\sigma = - \sum_{i=1}^s (n_i/N \log n_i/N) \times \frac{1}{1+t} (\rho C) \quad (13)$$

Il valore di R fornisce informazioni esclusivamente sul numero di contatti esistenti, senza entrare nel merito della loro distribuzione all'intero del sistema. Viceversa H' come precedentemente visto fornisce indicazioni solo sulla struttura del sistema, ovvero sulla distribuzione degli individui fra le diverse categorie di appartenenza. Dalla combinazione di R con H' è possibile ottenere ulteriori informazioni. Infatti dato un determinato valore di R in base al peso assunto da H' l'indice σ assumerà aspetti diversi che cambiano a seconda del livello di distribuzione degli individui tra le varie categorie di appartenenza. Gli innumerevoli valori assunti dall'indice σ sono indicativi di una vasta gamma di situazioni che possono caratterizzare i sistemi osservati. Il valore di R , da solo rivestito di scarso significato, acquisisce all'interno dell'indice σ una nuova capacità descrittiva molto più eloquente di ciascuno dei due parametri usati singolarmente. Un sistema antropico ad esempio caratterizzato da un discreto valore di R ma che presenta un grado di diversità molto basso non conferisce all'indice di complessità σ un livello elevato. Esso potrebbe ad esempio essere indicativo di una società le cui connessioni sono concentrate soprattutto tra alcune delle sue componenti. Viceversa con una R alta ed un valore di H' molto elevato, l'aspetto assunto dall'indice σ potrebbe essere rappresentativo di una condizione di ottima equidistribuzione tra gli individui, le categorie e le relazioni che li collegano. Le situazioni potenzialmente riscontrabili sono molteplici ed a ciascuna di esse corrisponderà un valore di σ capace di caratterizzare il sistema. Casi particolari come quelli in cui valori di σ molto simili corrispondono a sistemi in condizioni molto diverse fra loro, possono essere compresi individuando il peso che ciascuna delle due componenti (H' e R) ha sulla formazione della σ : studiando quali rapporti hanno con la σ ed in quali rapporti si trovano reciprocamente. Lo studio della complessità di un sistema antropico può essere coadiuvato anche dalla costruzione di un indice *sigma relativo*:

$$\sigma_r = e \times \frac{R}{\rho VA} \quad (14)$$

dove VA è il valore aggiunto ed e è data dalla seguente espressione:

$$e = - \frac{1}{\log s} \sum_{i=1}^s (n_i/N \log n_i/N) \quad (15)$$

Questa espressione è anche conosciuta come *indice di omogeneità di Pielou*. Esso in ecologia è utilizzato per misurare l'*equitabilità* ossia il grado di equidistribuzione degli organismi tra le varie specie in un ecosistema. Fermo restando s , il massimo valore che l'indice di Shannon può assumere è dato proprio dal $\log s$, ovvero $H'_{max} = \log s$. Il che vuol dire che la diversità specifica viene pesata sul suo massimo valore ottenibile. Di conseguenza e è un indice i cui valori variano tra 0 e 1. Analogamente, per un determinato anno di riferimento, il massimo consumo teorico è costituito da VA . Pertanto il massimo valore possibile per R è dato proprio da ρVA . Il rapporto $R / \rho VA$ è allora anch'esso un numero che varia tra 0 e 1 ed è indicativo della percentuale di connessioni stabilite rispetto ad un massimo teorico.

Naturalmente σ è tanto più descrittivo quanto maggiori sono i livelli di dettaglio forniti dai database disponibili. Se i dati forniti presentano raggruppamenti delle categorie di appartenenza troppo generici, lo studio diviene poco eloquente e l'utilità dell'indice σ per lo studio della complessità, finisce con l'essere molto scarsa. E' necessario operare ricerche accurate che avvolte possono diventare molto lunghe dal momento che trattandosi di sistemi antropici i dati a riguardo spesso possono essere dispersi in mille uffici amministrativi. Lo sforzo diventa ancora maggiore quando ad essere studiati sono sistemi antropici di periodi passati. In questi casi le difficoltà sono tanto più grandi quanto più ci si spinge indietro nel tempo, con dati che per essere scovati spesso richiedono l'accesso a dimenticate "retro-biblioteche".

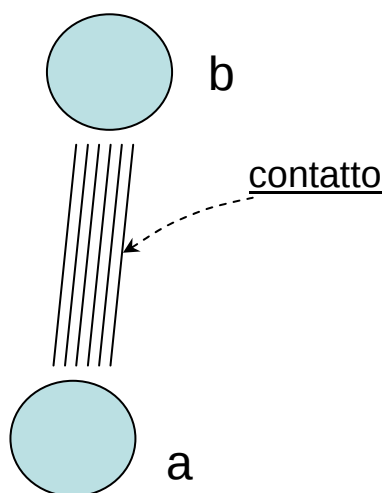


Figura 6.3

L'illustrazione mette in evidenza in maniera schematica il concetto di *contatto*. Tale Figura rappresenta una zoomata dell'interazione tra le componenti generiche a e b di Figura 6.2. La connessione tra le due componenti è suddivisibile in un determinato numero di singoli *contatti* (in questo caso 6). Il *contatto* rappresenta l'interazione elementare durante la quale il quantitativo di risorse trasferito assume un valore fondamentale, scelto arbitrariamente come riferimento. In questo modo è possibile assumere che ogni interazione fra due componenti sia formata da un certo numero di *contatti* la cui somma determina l'intensità dell'interazione stessa.

6.7 Calcolo alternativo di H'

Partendo dalla definizione di emergenza e dai valori emergetici calcolati in questo lavoro di tesi, si propone, anche, il calcolo del termine H' (e di conseguenza dell'indice σ) attraverso le diverse categorie di input emergetici, confrontate con il valore dell'emergia totale che, di anno in anno, alimenta il funzionamento del sistema considerato. La proposta parte dal presupposto insito nell'approccio emergetico, secondo cui l'emergia misura le risorse e le risorse alimentano la crescita di complessità. Ulgiati e Brown (2007) identificano nella diversità dei vari input emergetici (ossia nel diverso mix di risorse fornite a un sistema) una delle principali forze motrici che contribuiscono alla crescita di diversità e complessità. L'emergia misura il supporto ambientale alla generazione delle risorse, e le risorse sono il supporto ambientale alle componenti del sistema. A ogni mestiere è associato un investimento emergetico per la formazione (come Odum, Brown e Bardi hanno dimostrato in più di un articolo sui costi emergetici dell'Università della Florida) e un costo emergetico per il mantenimento. Tale valore emergetico associato al lavoro è a sua volta suddivisibile in categorie (% solare, % topsoil, % fules, % elettricità, etc per persona per anno). Se dunque i valori n_i nella (13) vengono identificati con le quantità dei diversi apporti emergetici al sistema e rapportati al valore totale N dell'emergia fornita al sistema in un dato periodo, si possono derivare dei valori di "probabilità di Shannon" basati sull'emergia e dunque tali da rappresentare in maniera "donor-side" anche le altre categorie che sono generate nel sistema stesso grazie agli apporti emergetici. Dalla (3) è pertanto possibile ottenere il fattore H' ponendo il rapporto n_i/N uguale a: (emergia del flusso i -esimo)/(emergia totale).

COMPLESSITÀ DEL SISTEMA ANTROPICO OGGETTO DI STUDIO

7.1 Introduzione

Secondo la teoria della complessità (Odum. E., 1983) la crescita in dimensioni di una popolazione nel tempo, segue l'andamento della curva di Lotka-Volterra, (anche detta curva logistica), caratteristica delle specie tendenti alla *K strategia*. Inizialmente la popolazione aumenta esponenzialmente, in seguito la velocità di crescita rallenta seguendo un andamento di tipo lineare, dopodiché l'aumento della popolazione tende a rallentare sempre di più raggiungendo in modo asintotico la cosiddetta *capacità portante*. La capacità portante è un massimo teorico che intrinsecamente racchiude in sé un certo numero di fattori riguardanti il rapporto che la popolazione ha col suo ambiente (ad esempio: fenomeni di competizione intraspecifici ed interspecifici, associazioni simbiotiche, ecc). Di conseguenza la popolazione avrà una determinata capacità di sfruttamento delle risorse disponibili, che determinerà le sue dimensioni all'interno dell'ecosistema a cui appartiene. Anche la crescita delle popolazioni umane è descrivibile attraverso tale tipo di andamento. In particolare all'aumento delle dimensioni si accompagna un aumento della complessità della società che cresce. Col tempo il sistema tende a rallentare sempre di più la crescita in dimensioni e le risorse disponibili sono sempre più utilizzate per supportare la crescente complessità metabolica, necessaria al mantenimento del sistema. Le dimensioni cessano di aumentare quando il sistema giunge al punto di "respirare" quanto riesce ad acquisire. Il sistema raggiunge dunque la sua *capacità portante*. Come già visto precedentemente, l'utilizzo dei combustibili fossili ha determinato uno spostamento della capacità portante dell'uomo ulteriormente in alto rispetto al passato, ed è tutt'oggi ancora in crescita. Molti paesi in via di sviluppo presentano ancora una crescita di tipo esponenziale mentre nei paesi occidentali la crescita sembra essersi tendenzialmente arrestata (se non si tiene conto del fenomeno dell'immigrazione). Ciò nonostante la maggior parte dei paesi occidentali sembra utilizzare un quantitativo di risorse sempre crescente. Se le dimensioni di una popolazione non aumentano più ma il quantitativo di risorse utilizzate rimane crescente è evidente, come visto precedentemente, in accordo con la teoria della complessità (Odum. E., 1983) che tali risorse vengono ad essere destinate ad un aumento della complessità del sistema.

Il sistema antropico da noi analizzato (Roma) non presenta più una crescita della popolazione da almeno una ventina d'anni (immigrati inclusi). Partendo da tale presupposto ci siamo chiesti dunque se a tale stasi nella crescita della popolazione corrisponda o meno un crescente reperimento delle risorse comportando dunque inevitabilmente una crescita della complessità del sistema. In particolare con il presente studio ci proponiamo di verificare le due seguenti ipotesi:

Sebbene il sistema urbano di Roma, durante l'arco di tempo da noi considerato (1962-2002), mostri una stabilizzazione delle dimensioni della popolazione per ettaro¹² secondo il tipo di equazione e la curva di interpolazione rappresentate in Figura 7.1,

- 1) La velocità di reperimento dei vari tipi di risorse, considerate nel presente studio, aumenterebbe progressivamente, ovvero le funzioni ($f(x)$) rappresentative del reperimento di risorse nel tempo presenterebbero tendenzialmente un andamento crescente di tipo parabolico (o quadratico), o comunque la loro derivata prima sarebbe una funzione crescente ($f'(x) > 0$).
- 2) La funzione rappresentativa della crescita di complessità del sistema, sarebbe di grado superiore a quello delle funzioni che descrivono l'approvvigionamento delle risorse nel tempo.

L'eventuale verifica della prima ipotesi equivarrebbe sostanzialmente a dimostrare che la velocità con cui vengono reperite le risorse, aumenta nel tempo¹³. Se le funzioni rappresentative del reperimento delle risorse dovessero essere delle rette allora la prima ipotesi non sarebbe verificata, poiché la derivata prima di una retta è una costante; di conseguenza la velocità di reperimento delle risorse sarebbe costante. Tanto meno se le funzioni rappresentative del reperimento delle risorse dovessero essere crescenti ma avere la propria funzione derivata prima decrescente, significherebbe che la velocità di reperimento delle risorse è in diminuzione. Tuttavia, anche se si dovessero verificare gli ultimi due casi, ciò comporterebbe comunque che la complessità del sistema debba aumentare, poiché le funzioni che descrivono il reperimento delle risorse in entrambi i casi sarebbero funzioni crescenti. Ovvero l'aumento nel tempo dell'approvvigionamento delle risorse in un sistema che non cresce più in dimensioni scatuisce inevitabilmente in un aumento della sua complessità. Lotka suggerisce anche che un'eventuale sopravvenuta scarsità di risorse (approvvigionamento decrescente) spingerebbe il sistema a privilegiare l'efficienza (e.g., forme di collaborazione tra componenti) anziché la velocità di dissipazione, così da evitare o almeno rallentare una eventuale decrescita di complessità (semplificazione del sistema), ma non sembra che questo sia ancora il caso del sistema urbano considerato. Ciò che noi ci proponiamo di verificare con la prima ipotesi è una particolare situazione che naturalmente potrebbe anche non sussistere o sussistere in parte (potrebbe valere solo per alcune categorie di risorse). Tuttavia il verificarsi degli ultimi due casi menzionati dimostrano comunque che il sistema sta aumentando la sua complessità. Ed è proprio in quest'ottica che si colloca la seconda ipotesi. Ossia fermo restando il verificarsi della prima ipotesi o degli ultimi due casi,

¹² La Figura 7.1 mostra l'andamento della densità di popolazione nel Comune di Roma a cavallo tra il 1962 ed il 2002. E' possibile effettuare il confronto anche con l'equazione e con la curva di interpolazione relative al valore assoluto della popolazione (Figura 7.2). Tuttavia va tenuto conto che la curva di Figura 7.2 mostra un calo apparente della popolazione che non corrisponde esattamente alla realtà. Esso è infatti dovuto alla riduzione dell'estensione territoriale del Comune di Roma avvenuta in seguito alla formazione del nuovo Comune di Fiumicino (vedi Capitolo 2, Parag. 2). Pertanto, ai fini della verifica delle nostre due ipotesi, si è scelto di fare riferimento alla densità di popolazione.

¹³ Il sistema si autoorganizza in maniera tale da consumare sempre più risorse pro-capite ed essere sempre più dissipativo (ossia si dota di strutture tecnologiche e di servizio: trasporti, bruciatori, industrie), fino a quando questo gli viene consentito dalla disponibilità di risorse. Ciò equivarrebbe a una conferma del fatto che anche questo tipo di sistemi segue il Maximum Power Principle di Lotka (1922a,b) in situazioni di abbondanza di risorse.

che attestano che vi è un aumento della complessità in atto, come sarebbe la funzione che descrive tale crescita di complessità? In particolare mediante la formulazione della seconda ipotesi ci aspettiamo che tale funzione sia di grado superiore a quello delle funzioni che descrivono il reperimento delle risorse nel tempo. Tale ipotesi potrebbe non essere verificata anche solo per il fatto che entrambe i due tipi di funzione non sono di tipo polinomiale.

Per determinare le funzioni rappresentative del reperimento delle risorse intendiamo servirci dei dati utilizzati nei capitoli 4 e 5 per le stesse annualità dal 1962 al 2002, relativamente alle stesse categorie di risorse importate (esprese in grammi o in Joules dove indicato), e naturalmente prendendo esclusivamente i valori riguardanti i consumi locali (non vengono considerate le quantità consumate a monte dei processi, valutabili con la Total Material Requirement, TMR, l'Embodied Energy Analysis, EEA, e con la Emergy Analysis, EA). Tali dati sono riportati nelle tabelle presenti nell'Appendice del capitolo 5. A partire quindi da questi dati si costruiranno le funzioni di interpolazione.

Analogamente per costruire la funzione che esprime la variazione di complessità del sistema nel tempo, intendiamo servirci dell'indice di complessità (13) costruito nel precedente capitolo, calcolando il suo valore per gli stessi anni di riferimento e ricavando così la curva di interpolazione.

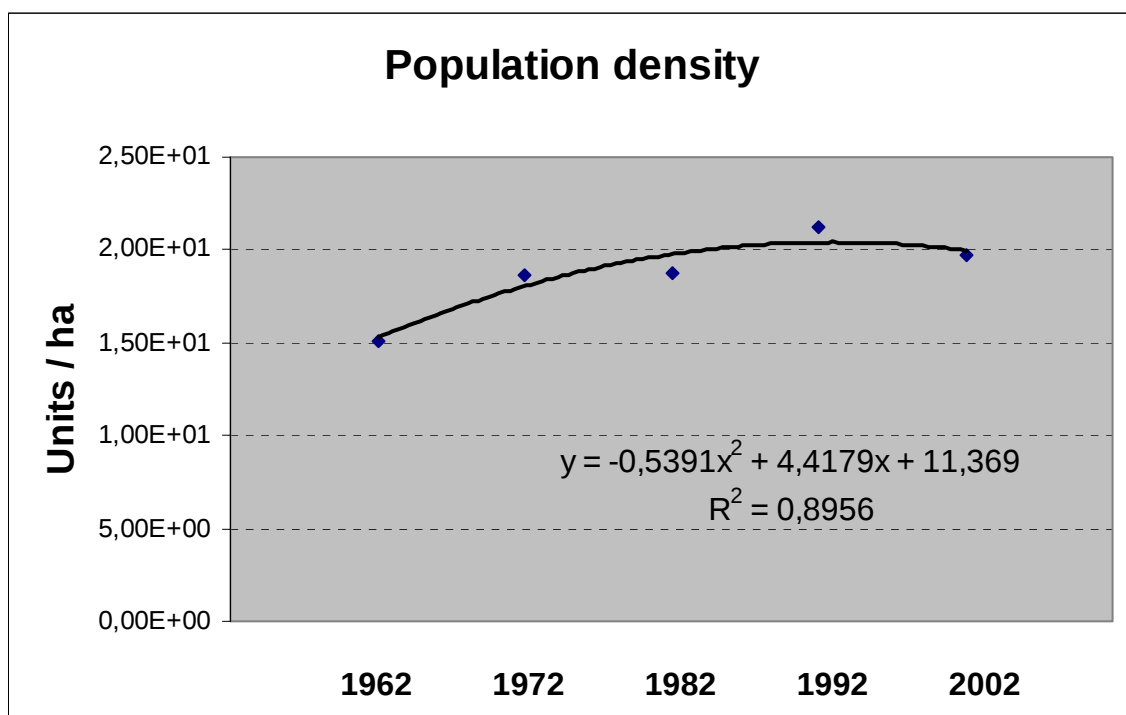


Figura 7.1

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo della densità di popolazione di Roma.

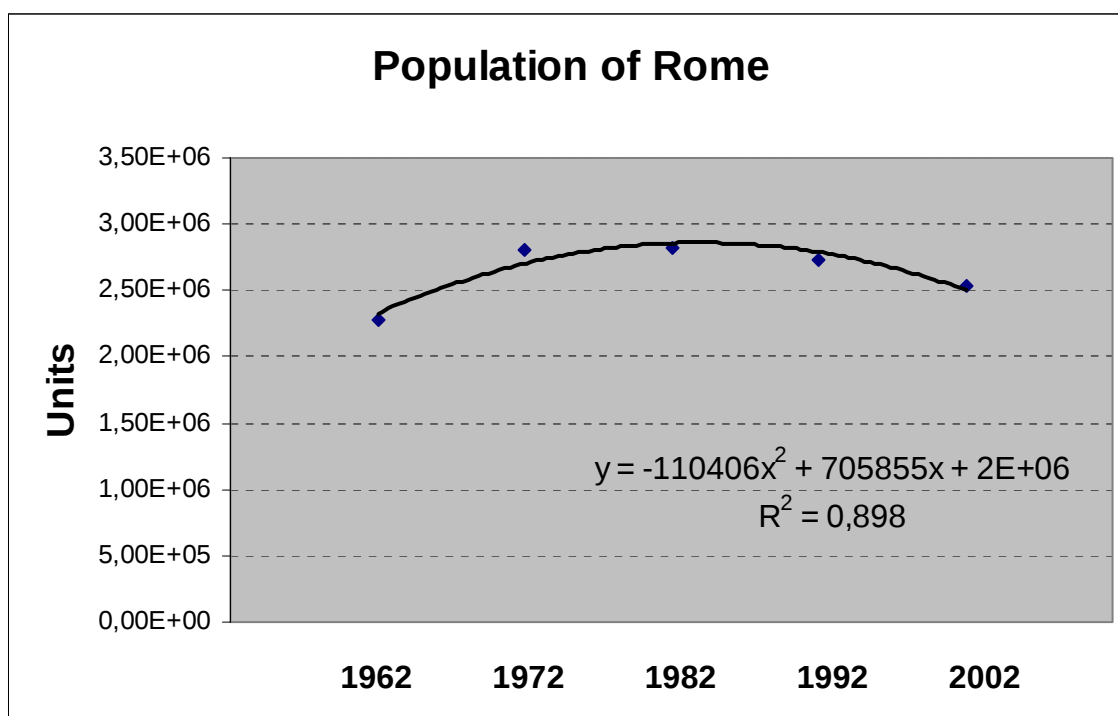


Figura 7.2

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo della popolazione di Roma.

7.2 Flussi di risorse in input

7.2.1 Andamento dei materiali, dei combustibili, dell'energia elettrica e dell'acqua

Le curve risultanti dall'interpolazione dei punti sperimentali relativi ai valori del consumo negli anni dei diversi materiali considerati nelle Figure 7.3 e 7.4, presentano, un andamento crescente di tipo parabolico. Infatti le funzioni mostrate all'interno di ciascun grafico, indicano l'equazione di tali curve ed esprimono il reperimento nel tempo, realizzato dal sistema, di ciascun materiale o categoria di materiali.

I prodotti di tipo tessile (Figura 7.5) mostrano addirittura una crescita di tipo esponenziale, mentre i prodotti in plastica risultano crescere in maniera pressoché quadratica (la derivata prima della funzione è comunque crescente; vedi Figura 7.5). La funzione che descrive il consumo di prodotti cartacei sebbene non sia di tipo quadratico è caratterizzata dal fatto che la sua derivata prima, sebbene debolmente, è anch'essa una funzione crescente (Figura 7.5), confermando così la prima ipotesi.

Nella Figura 7.6 è rappresentato l'andamento di benzina, diesel e gas naturale. Il diesel ed il gas naturale con i loro andamenti confermano la prima ipotesi. La benzina mostra un andamento simile a quello riscontrato per i prodotti cartacei, caratterizzata quindi da una funzione di consumo la cui derivata prima è debolmente crescente.

L'alluminio, l'energia elettrica e l'acqua non confermano invece la nostra prima ipotesi (Figura 7.7). Il Gpl rientra parzialmente nella prima ipotesi (la pendenza della curva inizialmente diminuisce per poi aumentare a partire dall'inizio degli anni '80; vedi Figura 7.8), mentre un inversione di tendenza caratterizza il consumo di petrolio da riscaldamento (Figura 7.8). Va tuttavia evidenziato che tale risorsa, molto utilizzata fino a prima degli anni '70, è stata progressivamente rimpiazzata dal gas naturale, il cui uso è divenuto sempre più preponderante.

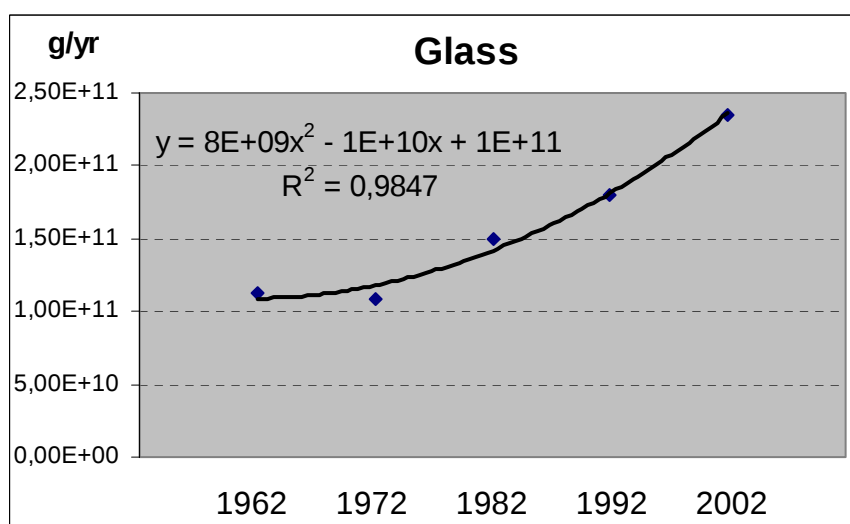
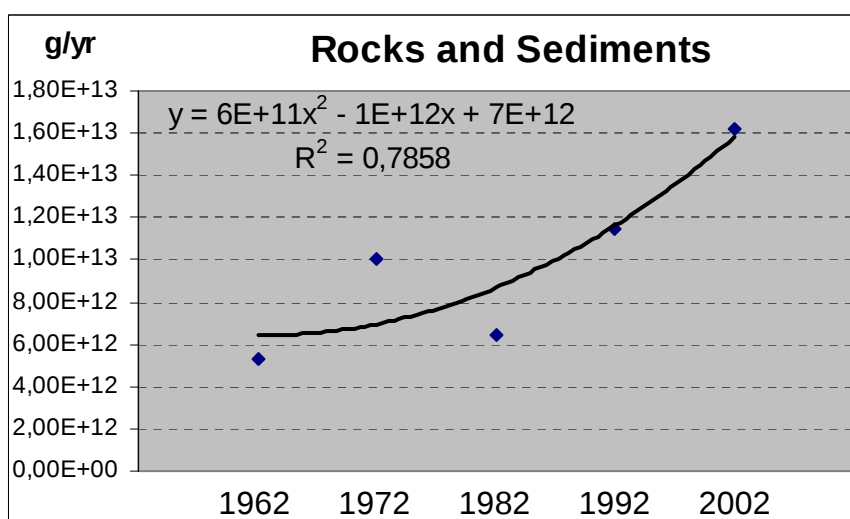
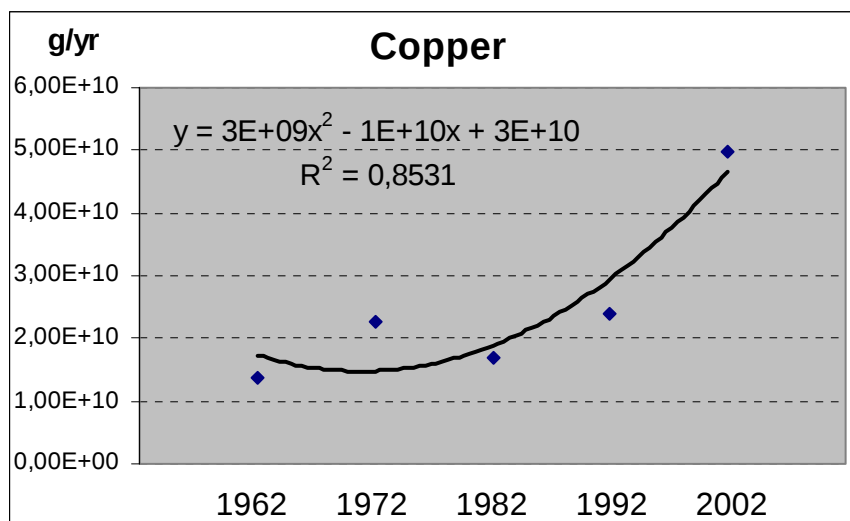


Figura 7.3

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: rame, rocce e sedimenti e vetro.

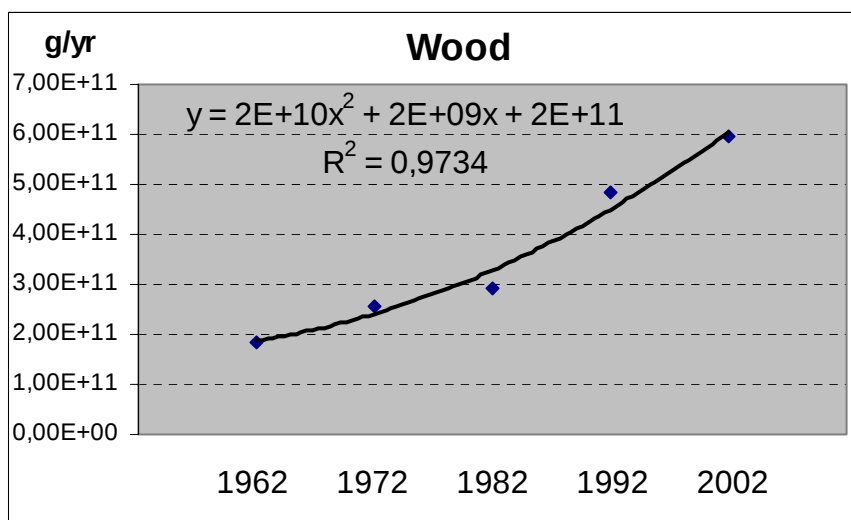
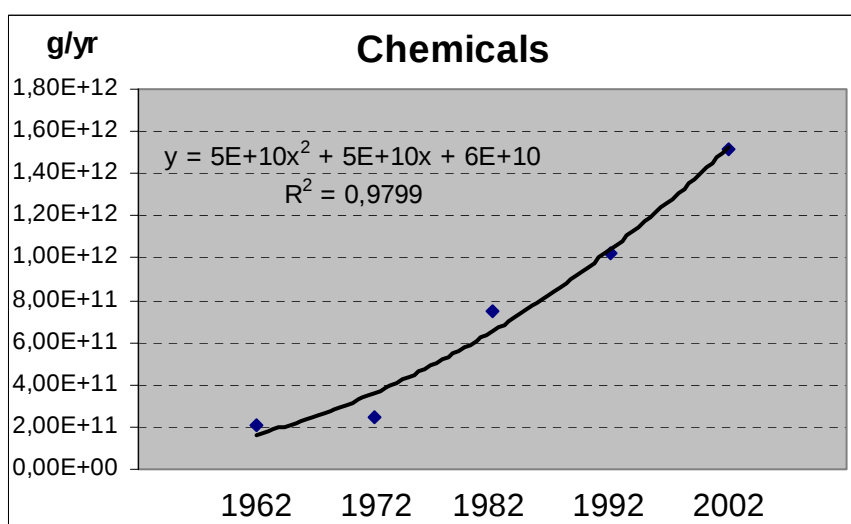
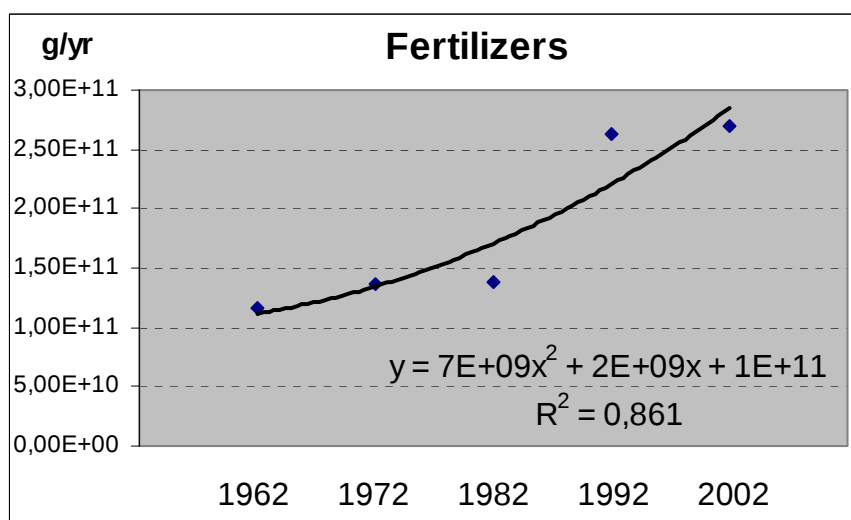


Figura 7.4

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: fertilizzanti, prodotti chimici e legno.

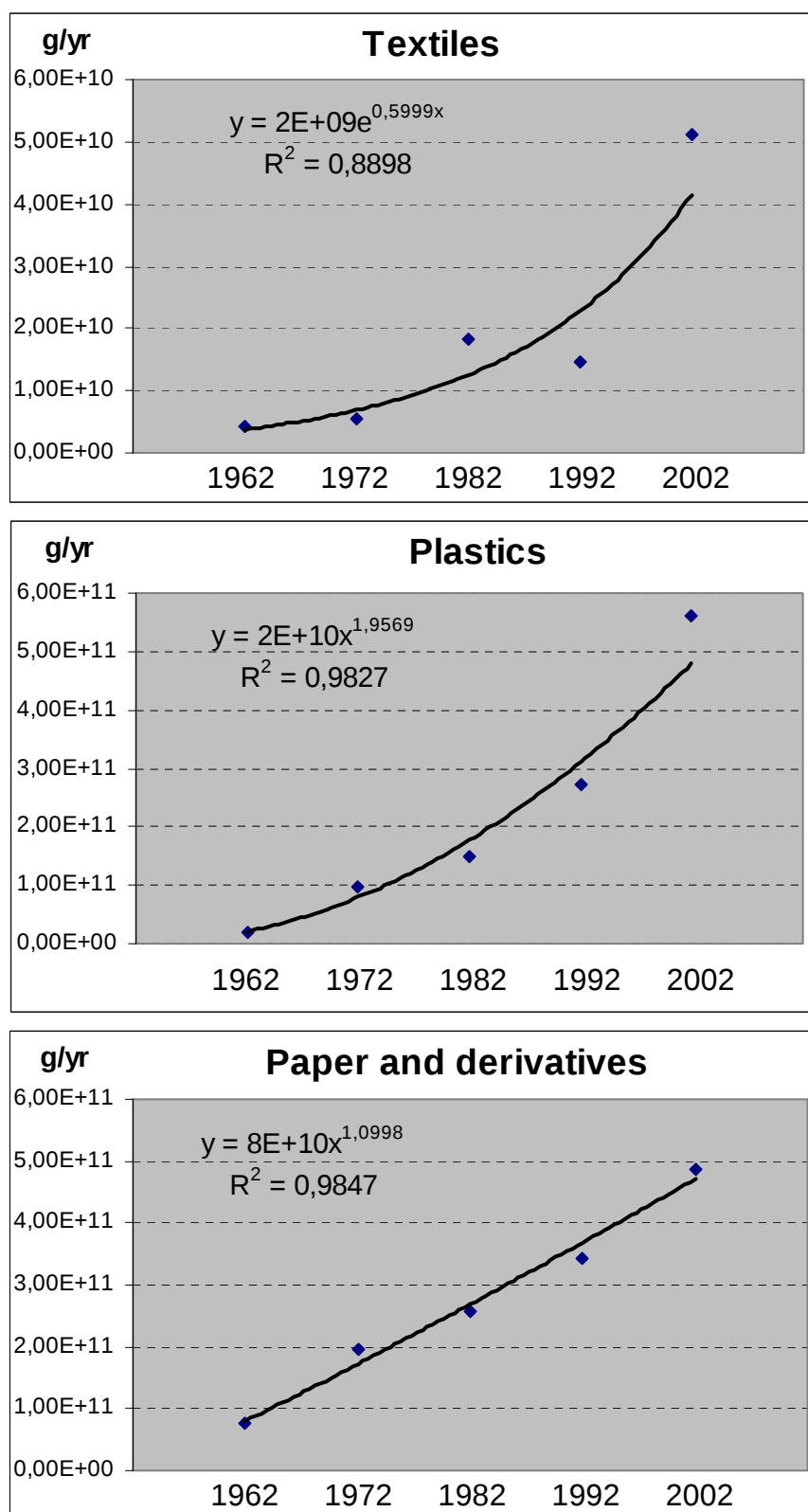


Figura 7.5

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: tessuti, plastica e prodotti cartacei.

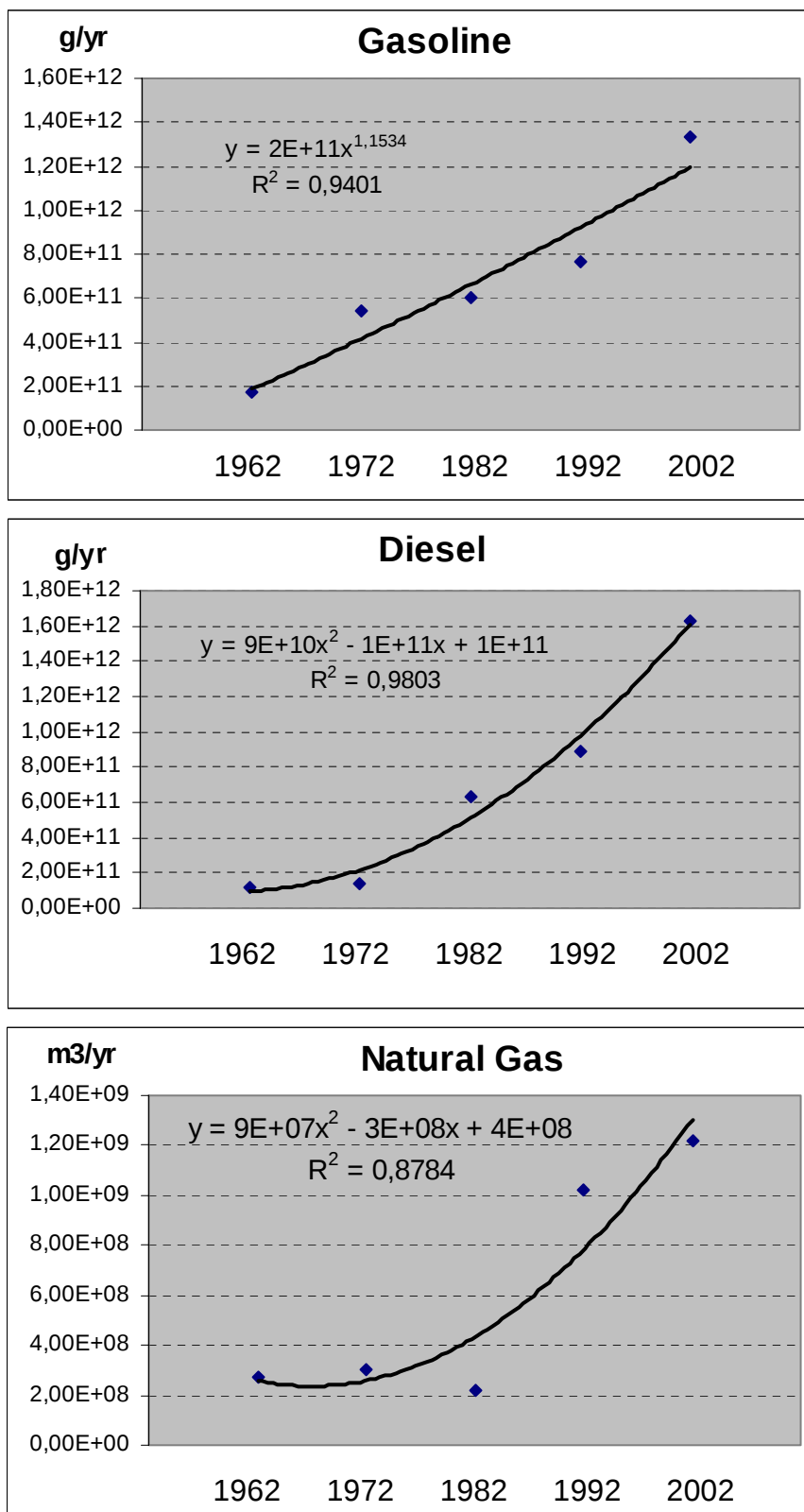


Figura 7.6

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: benzina, diesel e gas naturale.

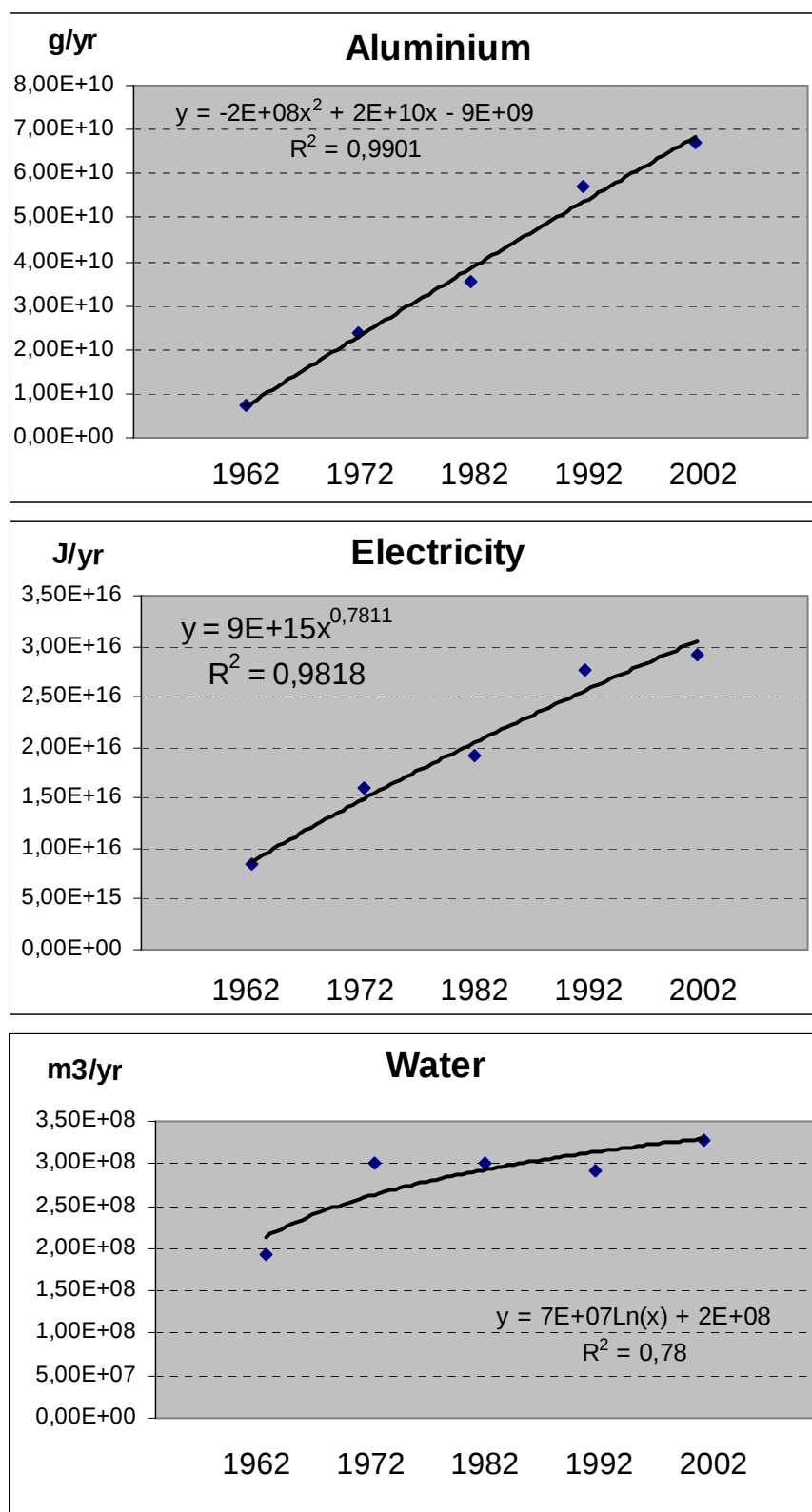


Figura 7.7

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: alluminio, energia elettrica e acqua.

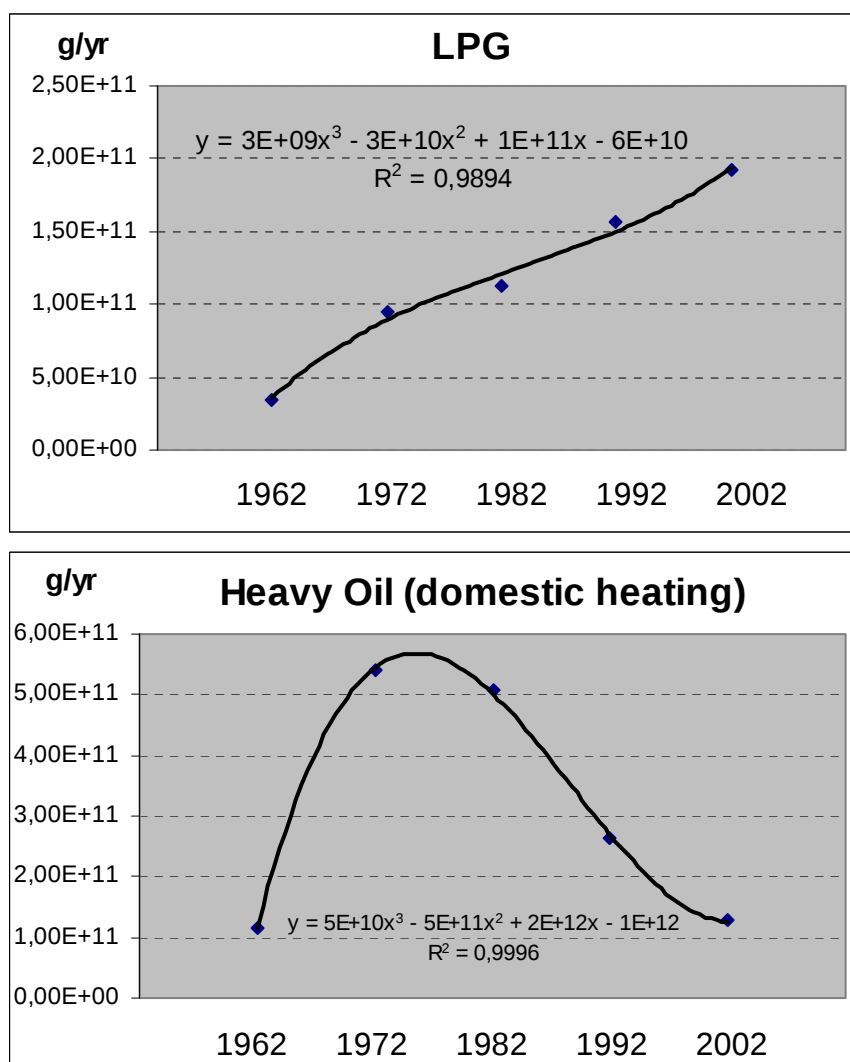


Figura 7.8

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: gpl e petrolio da riscaldamento.

7.2.2 Andamento del cemento, dell'acciaio e dell'asfalto

Il consumo di cemento, acciaio e asfalto nel corso degli anni considerati nel nostro studio è in controtendenza con tutte le categorie considerate fino ad ora (Figura 7.9). Infatti a parte il petrolio da riscaldamento, anche l'alluminio, l'energia elettrica e l'acqua pur non confermando la prima ipotesi, mostrano comunque un andamento crescente nel tempo. Sebbene le dimensioni demografiche della città si stabilizzino l'approvvigionamento delle risorse (quelle finora considerate) continua ad aumentare, confermando per la maggior parte di esse l'ipotesi numero 1. Invece, cemento, acciaio e asfalto, anziché aumentare diminuiscono. Va tuttavia considerato che tali materiali sono utilizzati soprattutto per la realizzazione di strutture ed infrastrutture (case, palazzi, edifici, ponti, autostrade, ferrovie, ecc). Durante la fase di maggiore espansione economica (come quella che ha caratterizzato l'Italia dalla fine della seconda guerra mondiale fino agli anni '70) molte società accrescono enormemente le proprie strutture, necessarie allo svolgimento delle varie attività che si moltiplicano in numero e in intensità. Il grosso delle opere edificate viene realizzato nella fase

iniziale del fenomeno espansivo, proprio a causa della necessità di supportare il più rapidamente possibile un sistema in nuovo fermento.

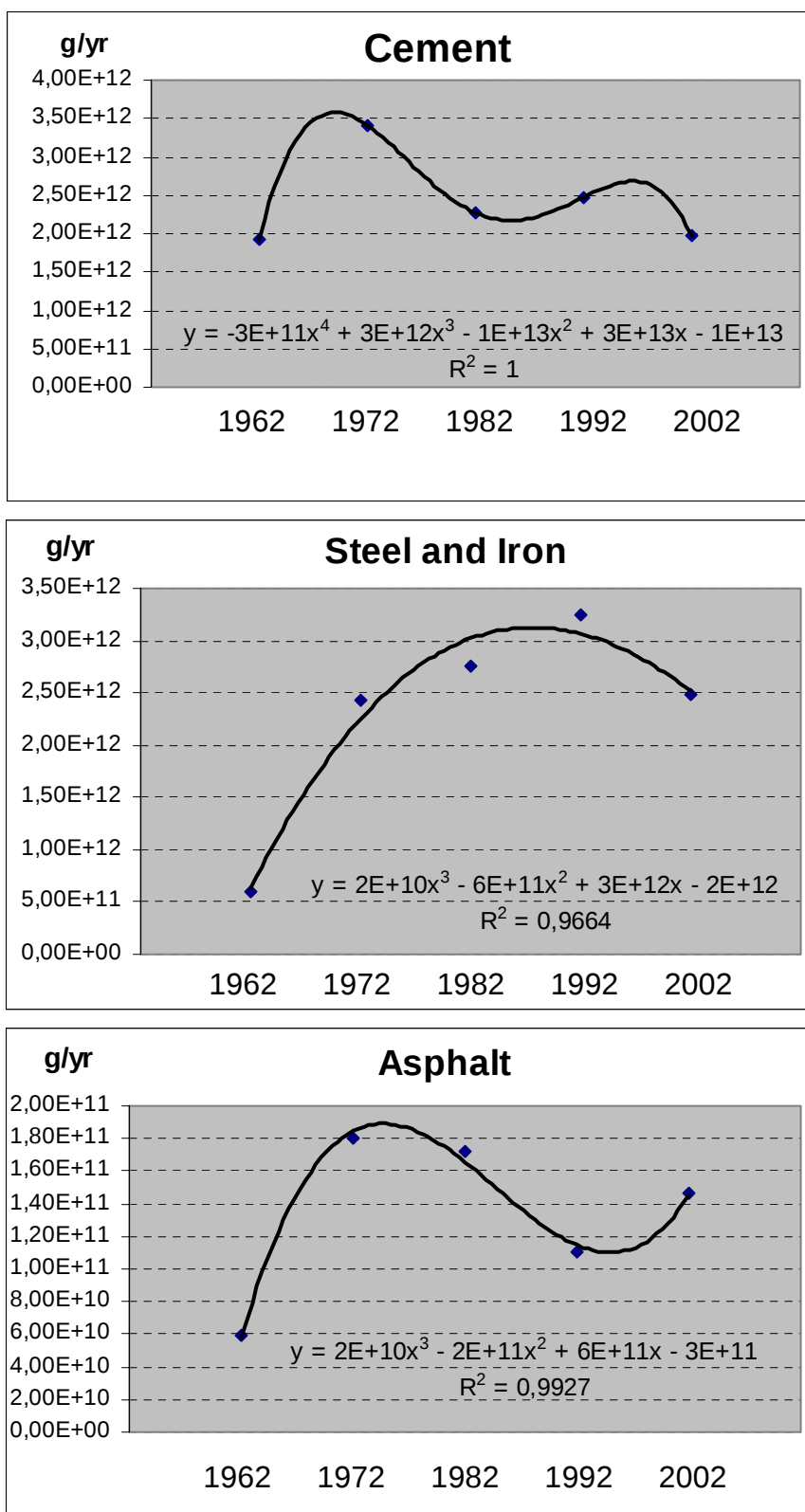


Figura 7.9

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: cemento, acciaio e asfalto.

Le strutture rimangono sostanzialmente le stesse per lungo tempo continuando ad essere utilizzate, necessitando poi, per lo più, “solo” di manutenzione. La peculiarità dunque di queste tre categorie è che la loro crescita si compie in maniera estremamente rapida nella fase iniziale. Gli andamenti iniziali delle tre curve di Figura 7.9 sono infatti molto ripidi, successivamente in maniera diversa ciascuna di esse comincia a rallentare la crescita per poi diminuire. La risalita delle curve potrebbe corrispondere a tendenze di ristrutturazione che sopraggiungono dopo lungo tempo ma che tuttavia non assumono più l’enfasi della prima ora. Queste strutture sono però proprio quelle che consentono al sistema di essere “dissipativo”. Ossia, la crescita della struttura favorisce la successiva acquisizione delle risorse e ne precede l’accreciuta dissipazione.

7.2.3 Andamento degli input di tipo alimentare

Rappresentativi di un particolare tipo di tendenza propria delle società via via più opulente, sono i trend dei generi alimentari (Figure 7.10, 7.11 e 7.12). Vari studi condotti sulle tendenze ai consumi di tipo alimentare (Montini, 1997) dimostrano che più le società divengono economicamente avanzate più i consumi alimentari diminuiscono. Ciò è riscontrabile anche confrontando i consumi degli italiani relativamente alla loro condizione lavorativa e professionale (ISTAT, 2003). In media gli individui che occupano posizioni lavorative più alte e meglio retribuite mostrano un minor consumo di tipo alimentare ed un maggior consumo in altri settori come quello ricreativo e culturale. Tale tendenza si riscontra anche comparando i dati tra Nord e Sud d’Italia, economicamente meno sviluppato (ISTAT, 2003). Al Sud si rileva un maggior consumo di tipo alimentare rispetto al Nord ed un minor consumo relativamente ad attività di tipo sportivo, estetico, ricreativo e culturale¹⁴.

Il presente studio indirettamente conferma questo tipo di tendenza, evidente in maniera chiara osservando tutti i grafici delle Figure 7.10, 7.11 e 7.12, fatta eccezione per quello riguardante i consumi del pesce. Il consumo di quest’ultimo, dalla curva d’interpolazione sembrerebbe prima diminuire e poi aumentare a partire dall’inizio degli anni ’80 (Figura 7.12). Ciò probabilmente trova spiegazione nel fatto che essendo il pesce un genere alimentare mediamente più pregiato, il suo consumo tenda ad aumentare solo in seguito al raggiungimento di un certo livello economico più elevato. Va comunque tenuto conto che i dati relativi ai generi alimentari risultano molto più fluttuanti rispetto a tutte le altre categorie analizzate in questo studio. Le curve di interpolazione che ne risultano sono quindi meno bene adattate ai punti, e ciò è chiaramente rilevabile dai valori che assumono i coefficienti di correlazione al quadrato, più bassi rispetto a quelli relativi a tutte le altre categorie (Figure 7.10, 7.11 e 7.12). Il pesce in particolare assume un coefficiente di correlazione molto basso, inferiore a 0,5 (Figura 7.12). Per i generi alimentari dunque le curve di interpolazione riprodotte vanno considerate con la consapevolezza di un loro andamento più incerto e incostante. Ad ogni modo per i generi alimentari (carne e frutta esclusi) il picco e quindi l’inversione di tendenza nel consumo sembra collocarsi nello stesso periodo: nel decennio

¹⁴ Una volta appagati i *bisogni di mancanza* più basilari (Maslow, 1962), gli individui tendono a soddisfare via via sempre di più i bisogni situati più in alto della *piramide di Maslow* (es: *bisogno di autorealizzazione*, *bisogno di conoscere e capire*, *bisogni estetici*). Sembrerebbe tuttavia che man mano che gli individui sono messi in condizioni di soddisfare i bisogni posizionati più in alto nella *piramide*, l’intensità con cui vengono soddisfatti i bisogni più basilari della *piramide* si riduca a vantaggio dei bisogni collocati in alto.

compreso tra l'inizio degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 (Figure 7.10 e 7.11). Tale periodo è lo stesso che vede invertirsi la tendenza precedentemente osservata per il consumo del pesce (Figura 7.12). Ciò ci indurrebbe a pensare che questo periodo rappresenti in un certo senso il “crinale” nel passaggio ad uno sviluppo economico tale da indurre un accesso diffuso ai “piani alti” della *piramide dei bisogni di Maslow*. La popolazione mediamente inizia a conquistare la parte alta della *piramide*, passando quindi da un prevalente soddisfacimento dei *bisogni di mancanza*, ad un più omogeneo appagamento anche dei *bisogni di crescita*.

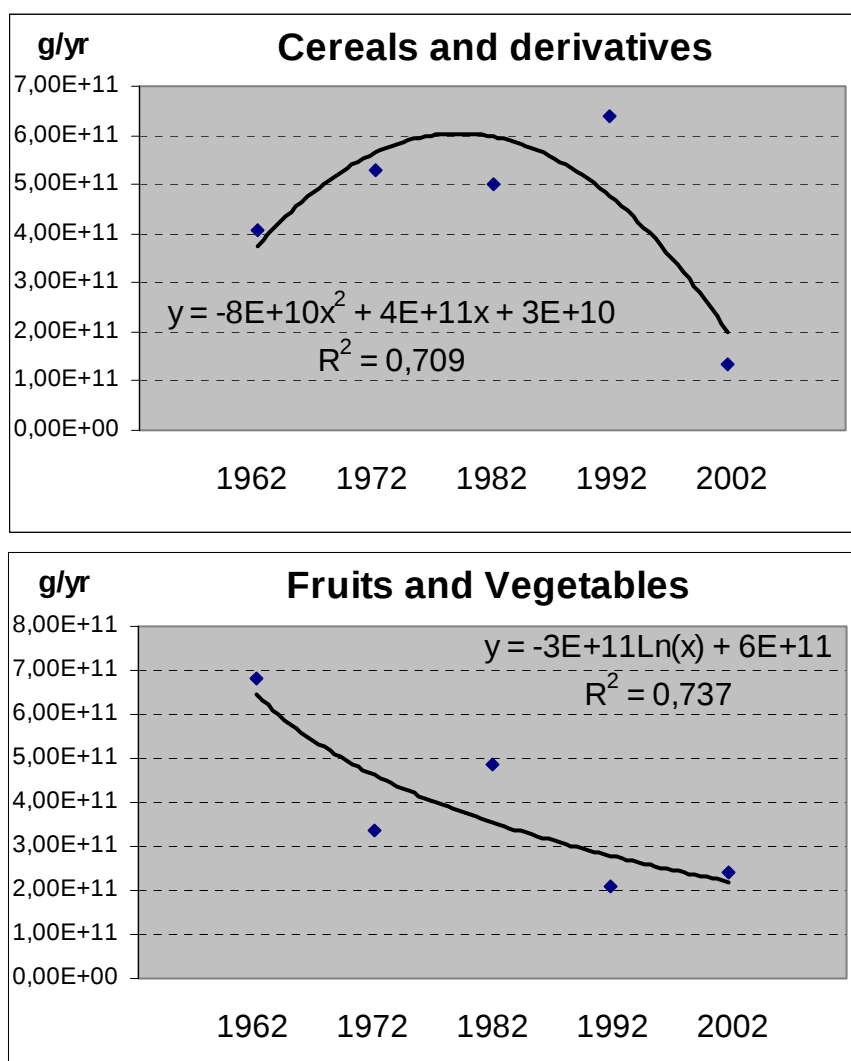


Figura 7.10

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: cereali e derivati e frutta e ortaggi.

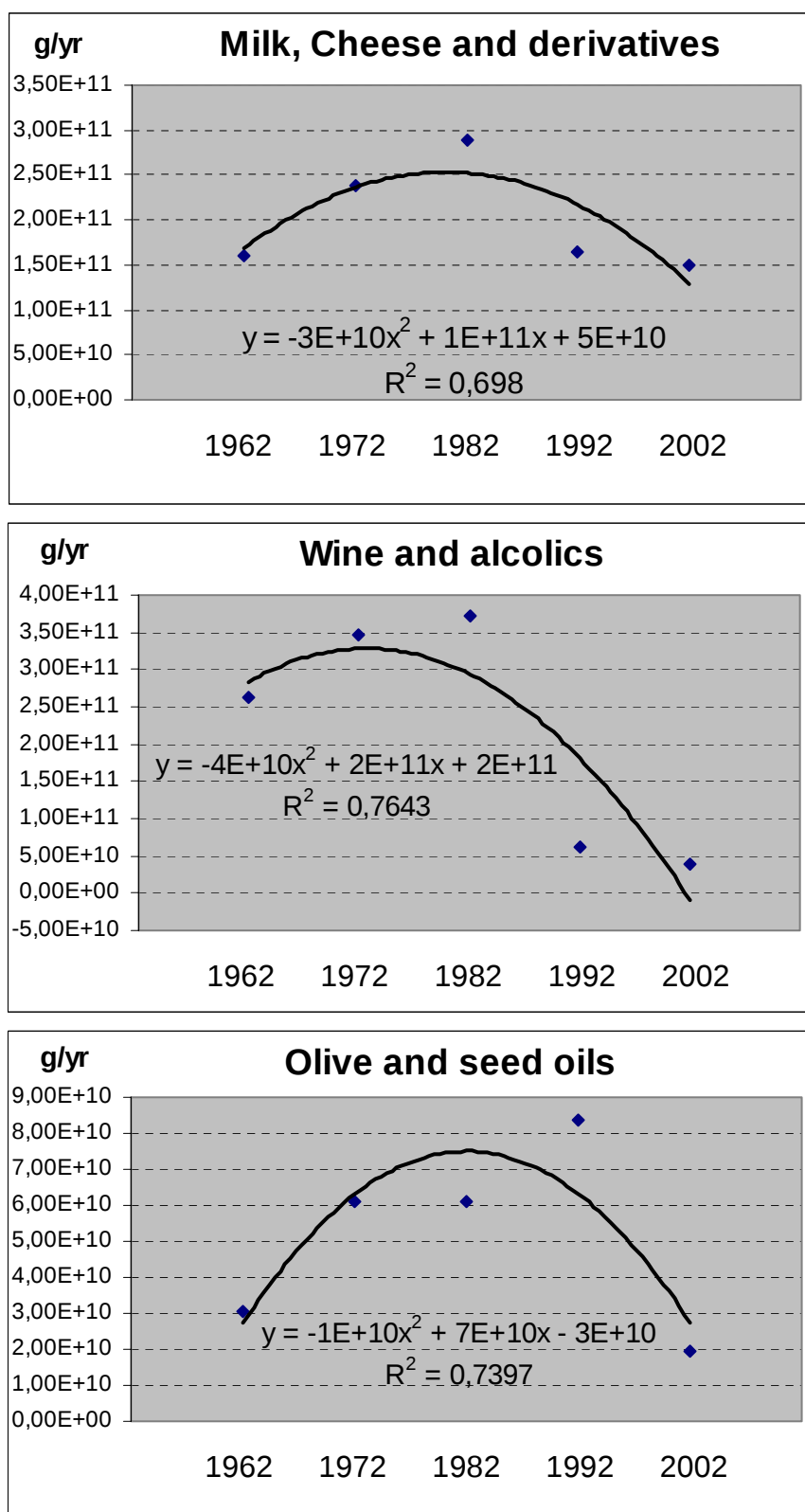


Figura 7.11

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: latte e derivati, vino e bevande alcoliche e olio di oliva e di semi.

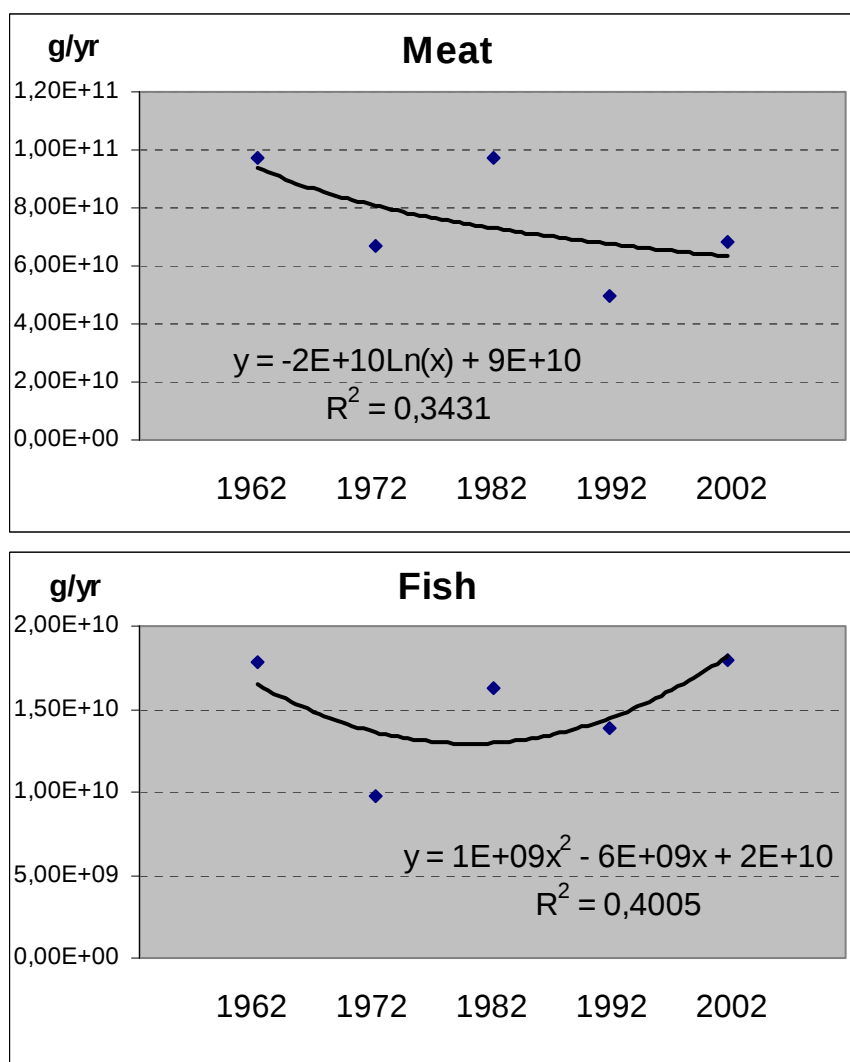


Figura 7.12

Curve d'interpolazione mostranti l'andamento nel tempo, rispettivamente dall'alto verso il basso di: carne e pesce.

7.3 Discussione e verifica della prima ipotesi

7.3.1 Verifica dell'ipotesi escludendo alcune categorie

Se non si considerano gli input di tipo alimentare (Figure 7.10, 7.11 e 7.12) e gli input impiegati nella realizzazione di strutture e infrastrutture (Figura 7.9), la prima ipotesi potrebbe ritenersi sostanzialmente confermata. Delle categorie di risorse considerate nel sottoparagrafo 7.2.1, dodici su diciassette confermano l'ipotesi numero 1 (Figure da 7.3 a 7.6). Quattro categorie non confermano tale ipotesi (alluminio, energia elettrica, acqua e petrolio da riscaldamento; vedi Figure 7.7 e 7.8). Una sola, l'LPG conferma l'ipotesi in modo parziale (Figura 7.8). Tuttavia come precedentemente osservato nel sottoparagrafo 7.2.1, la diminuzione di petrolio da riscaldamento è sostanzialmente dovuta alla sua progressiva sostituzione con il Gas Naturale, dalla crescita particolarmente ripida (Figura 7.2). Inoltre non va dimenticato che l'uso della risorsa acqua in questo caso si riferisce esclusivamente ai consumi locali. Esso, cioè, è privo dei contributi dovuti al suo uso industriale per la

realizzazione di quei beni prodotti al di fuori del sistema urbano, ma consumati al suo interno (esso cioè non è la Total Material Requirement dell'acqua vista nel capitolo 5). Il suo consumo dunque riguarda per lo più usi di tipo civile ed alimentare. Tale risorsa pertanto potrebbe essere considerata a metà strada tra le categorie di materiali e quelle di tipo alimentare. Alla luce di tale considerazione la crescita lenta del suo consumo (che non conferma la prima ipotesi) risulta maggiormente comprensibile.

7.3.2 Verifica dell'ipotesi considerando tutte le categorie

Se valutiamo singolarmente tutte quante le categorie da noi considerate, la prima ipotesi si verifica pienamente per 12 categorie su 25 (escludendo l'LPG ed il pesce nei cui casi l'ipotesi si verifica parzialmente). Tuttavia se consideriamo i vari generi alimentari come una unica categoria, assunzione più che ragionevole, allora l'ipotesi si verifica in 12 casi su 20. Se poi consideriamo anche le 3 categorie, relative agli input impiegati nella realizzazione di strutture ed infrastrutture (Figura 7.9), come unica categoria, l'ipotesi si verifica in 12 casi su 18.

I consumi dei generi di tipo alimentare pur non confermando la prima ipotesi, alla luce di quanto considerato nel sottoparagrafo 7.2.3, sono espressione comunque di un tipo di tendenza tipica delle società che divengono economicamente sempre più sviluppate, i cui individui pospongono sempre di più il consumo di risorse semplici al godimento di beni e servizi, per la cui realizzazione aumentano sempre di più il numero di passaggi e/o trasformazioni attraverso le componenti di un sistema via via più complesso.

Anche l'andamento del consumo dei materiali considerati nel sottoparagrafo 7.2.2 sebbene non confermi la prima ipotesi, è indicativo di società che economicamente diventano sempre più progredite.

7.3.3 Conclusioni

In conclusione, possiamo affermare che la prima ipotesi da noi formulata risulta essere parzialmente verificata. Nonostante dunque la popolazione di Roma non cresca più, la città si appropria della maggior parte dei materiali di cui ha bisogno ad una velocità che aumenta progressivamente nel tempo. Ovvero le funzioni che descrivono il reperimento di tali risorse sono caratterizzate dal fatto che la propria funzione derivata prima è crescente. Molte di queste risorse presentano una funzione del consumo di tipo parabolico o dall'andamento vicino a quello quadratico. Dunque a conferma della teoria della complessità il nostro sistema antropico sebbene stabilizzato, continua ad importare risorse ad un ritmo sempre più crescente. Tali risorse vengono quindi incanalate per alimentare un'attività in sempre maggior fibrillazione e un metabolismo sempre più dinamico¹⁵: le risorse finiscono per aumentare dunque in maniera crescente la complessità del sistema. La verifica della seconda ipotesi ha lo scopo di descrivere le modalità con cui si sviluppa la crescita di complessità, verificando se essa aumenta più velocemente o in maniera paragonabile a come aumenta la crescita nell'approvvigionamento delle risorse.

¹⁵ Se il sistema è divenuto stazionario, la materia all'interno della città non si accumula: il sistema metabolizza quanto acquisisce. I materiali che entrano nel sistema, dopo aver subito un gran numero di trasformazioni e di passaggi divengono i prodotti di scarto del metabolismo della città. La crescente produzione di rifiuti delle nostre città ne è la conferma. Molti sistemi urbani tuttavia accumulano i loro rifiuti all'interno di discariche entro gli stessi territori comunali. Anche il Comune di Roma presenta una tale situazione (es: discarica di Malagrotta). In questo senso la città continua ad accumulare la materia che acquisisce, però solo all'interno delle discariche.

7.4 Verifica della seconda ipotesi

La relazione (13) ricavata nel precedente capitolo, rappresenta un indice di complessità applicabile ai sistemi antropici. Essa come osservato è una relazione che fornisce congiuntamente informazioni sulla complessità del sistema sia da un punto di vista strutturale che funzionale.

$$\sigma = - \sum_{i=1}^s (n_i/N \log n_i/N) \times \frac{1}{1+t} (\rho C) \quad (13)$$

La Figura 7.13 mostra l'andamento del consumo effettuato a Roma nel periodo che va dal 1962 al 2002, espresso in unità monetarie. L'equazione mostrata in Figura 7.13 indica che la curva di interpolazione è una cubica e dal coefficiente di correlazione al quadrato si evince che essa è anche molto ben adattata ai punti sperimentali. Il consumo C è parte integrante della relazione (13). Anche se H' rimanesse costante nel tempo, la nostra seconda ipotesi sarebbe verificata, poiché l'indice σ che esprime il valore della complessità, varierebbe nel tempo con lo stesso andamento della C . La complessità del sistema urbano crescerebbe ad una velocità che aumenta progressivamente nel tempo. Tale crescita essendo descritta da una funzione cubica, confermerebbe la nostra seconda ipotesi, poiché tutte le funzioni crescenti descritte nel paragrafo 7.5, sono di grado inferiore a quest'ultima (fatta eccezione per l'LPG, per quella dei tessili che non ha grado poiché è di tipo esponenziale e per l'acqua che è di tipo logaritmico).

Calcolando H' secondo quanto considerato nel paragrafo 6.7, la situazione è quella delineata nella Tabella 7.1. La Tabella mostra per ciascun anno di riferimento i valori dei diversi flussi energetici e il valore dell'emergia totale. Questi valori vengono utilizzati per calcolare i fattori (n_i/N) , $\ln(n_i/N)$, e infine il prodotto $(n_i/N)\ln(n_i/N)$ per ciascun flusso i -esimo di emergia. Infine, viene calcolato, per ciascun anno il valore di H' , diagrammato in Figura 7.14. La seconda ipotesi risulta confermata dalla curva d'interpolazione mostrata in Figura 7.15. Da essa si evince che il valore dell'indice σ (Tabella 7.2) cresce nel tempo secondo una funzione cubica, tra l'altro particolarmente ben adattata ai dati sperimentali (Figura 7.15).

Lo stesso indice H' sembra crescere cubicamente, tuttavia il valore del coefficiente di correlazione al quadrato (Figura 7.14), mostra un molto meno soddisfacente adattamento della funzione ai dati sperimentali. Probabilmente una migliore determinazione di tale curva richiederebbe un'ulteriore indagine nei periodi passati, intermedi e una futura verifica negli anni successivi.

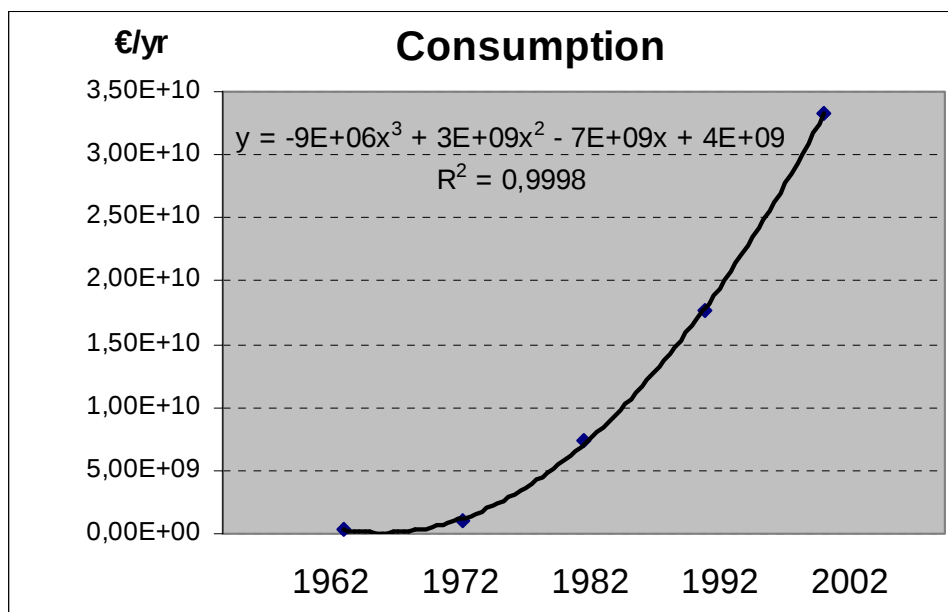


Figura 7.13

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo del consumo a Roma.

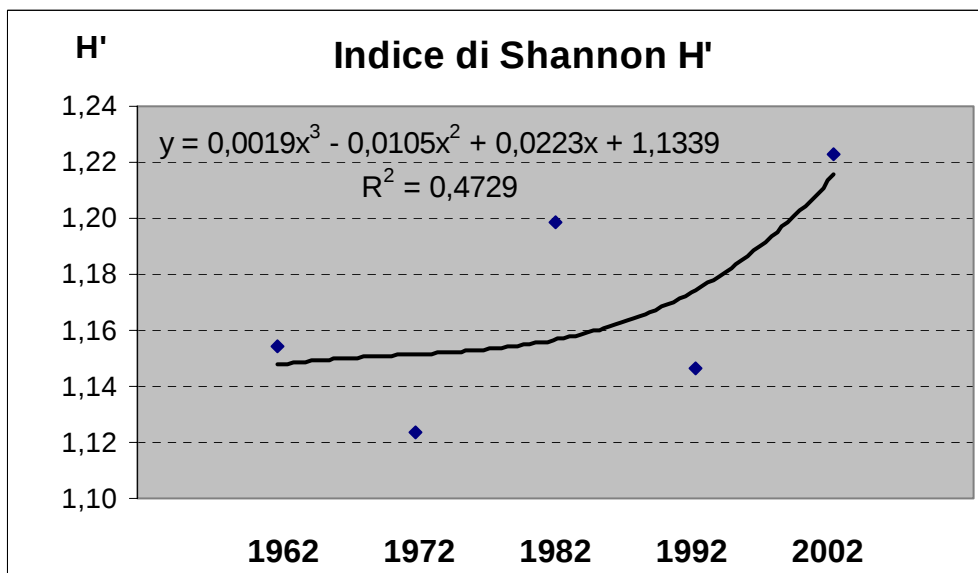


Figura 7.14

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo dell'indice H'

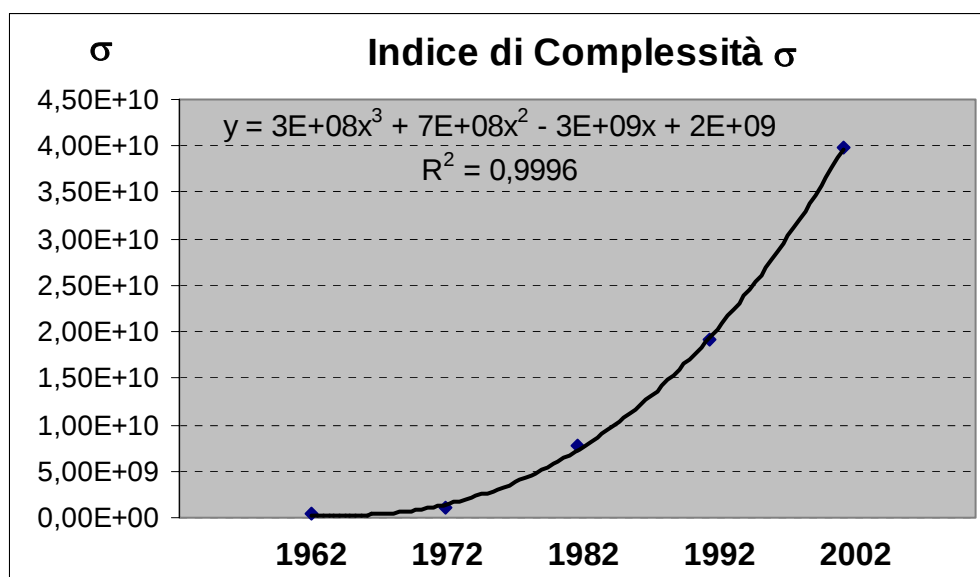


Figura 7.15

Curva d'interpolazione mostrante l'andamento nel tempo dell'indice σ

Tabella 7.1 . Distribuzione delle probabilità energetiche di Shannon per il calcolo di H'

	1962				1972				1982				1992				2002			
	Energy	n/N	log (n/N)	Shannon index	Energy	n/N	log (n/N)	Shannon index	Energy	n/N	log (n/N)	Shannon index	Energy	n/N	log (n/N)	Shannon index	Energy	n/N	log (n/N)	Shannon index
1 Sun	7.54E+18				7.54E+18				7.54E+18				6.43E+18				6.43E+18			
2 Wind	6.54E+19				6.54E+19				6.54E+19				5.58E+19				5.58E+19			
3 Evapotranspired Rain	3.97E+19				3.97E+19				3.97E+19				3.97E+19				3.97E+19			
4 Run-in (river geopotential)	6.49E+19				6.49E+19				6.49E+19				6.49E+19				6.49E+19			
5 Waves	9.03E+20				9.03E+20				9.03E+20				3.91E+20				3.91E+20			
6 Tides	2.12E+19				2.12E+19				2.12E+19				9.20E+18				9.20E+18			
Total renewables (max among items 1-6)	9.03E+20	0.02	-1.82	0.03	9.03E+20	0.01	-2.04	0.02	9.03E+20	0.01	-2.09	0.02	3.91E+20	0.00	-2.55	0.01	3.91E+20	0.00	-2.55	0.01
Nonrenewable Input (locally available)																				
7 Top soil (erosion, wheathering)	1.76E+21	0.03	-1.53	0.05	1.76E+21	0.02	-1.75	0.03	1.76E+21	0.02	-1.80	0.03	1.76E+21	0.01	-1.89	0.02	1.76E+21	0.01	-1.90	0.02
Imported Input																				
8 Gasoline	8.27E+20	0.01	-1.86	0.03	2.64E+21	0.03	-1.58	0.04	2.96E+21	0.03	-1.57	0.04	3.72E+21	0.03	-1.57	0.04	6.52E+21	0.05	-1.33	0.05
9 Diesel fuel	5.40E+20	0.01	-2.04	0.02	6.78E+20	0.01	-2.17	0.01	3.04E+21	0.03	-1.56	0.04	4.22E+21	0.03	-1.51	0.05	7.80E+21	0.06	-1.25	0.07
10 LPG (Liquid Petroleum Gas)	1.90E+20	0.00	-2.50	0.01	5.21E+20	0.01	-2.28	0.01	6.15E+20	0.01	-2.26	0.01	8.54E+20	0.01	-2.21	0.01	1.05E+21	0.01	-2.12	0.02
11 Heavy oil for domestic heating	5.47E+20	0.01	-2.04	0.02	2.56E+21	0.03	-1.59	0.04	2.40E+21	0.02	-1.66	0.04	1.25E+21	0.01	-2.04	0.02	6.02E+20	0.00	-2.36	0.01
12 Natural gas																				
12a Domestic use for cooking	2.73E+20	0.00	-2.34	0.01	3.06E+20	0.00	-2.51	0.01	2.24E+20	0.00	-2.69	0.01	3.17E+20	0.00	-2.64	0.01	3.49E+20	0.00	-2.60	0.01
12b Domestic use for heating	4.30E+20	0.01	-2.14	0.02	4.83E+20	0.00	-2.31	0.01	3.53E+20	0.00	-2.50	0.01	1.66E+21	0.01	-1.92	0.02	1.42E+21	0.01	-1.99	0.02
12c Other uses	1.54E+20	0.00	-2.59	0.01	1.72E+20	0.00	-2.76	0.00	1.26E+20	0.00	-2.94	0.00	1.25E+21	0.01	-2.04	0.02	2.11E+21	0.02	-1.82	0.03
13 Electricity	2.63E+21	0.04	-1.36	0.06	4.97E+21	0.05	-1.30	0.07	5.94E+21	0.05	-1.27	0.07	8.60E+21	0.06	-1.21	0.08	9.05E+21	0.07	-1.18	0.08
14 Water (from aqueduct)	7.25E+20	0.01	-1.91	0.02	1.13E+21	0.01	-1.94	0.02	1.13E+21	0.01	-1.99	0.02	1.09E+21	0.01	-2.10	0.02	1.23E+21	0.01	-2.05	0.02
15 Main Food items																				
15a Fish	4.97E+21	0.08	-1.08	0.09	2.73E+21	0.03	-1.56	0.04	4.53E+21	0.04	-1.39	0.06	3.86E+21	0.03	-1.55	0.04	4.99E+21	0.04	-1.44	0.05
15b Meat	2.91E+21	0.05	-1.31	0.06	2.00E+21	0.02	-1.70	0.03	2.92E+21	0.03	-1.58	0.04	1.50E+21	0.01	-1.96	0.02	2.05E+21	0.01	-1.83	0.03
15c Fruits and Vegetables	6.89E+20	0.01	-1.94	0.02	3.39E+20	0.00	-2.47	0.01	4.92E+20	0.00	-2.35	0.01	2.12E+20	0.00	-2.81	0.00	2.45E+20	0.00	-2.75	0.00
15d Milk, cheese and other derivatives	2.30E+21	0.04	-1.41	0.05	3.45E+21	0.03	-1.46	0.05	4.16E+21	0.04	-1.43	0.05	2.38E+21	0.02	-1.76	0.03	2.15E+21	0.02	-1.81	0.03
15e Cereals and derivatives	2.47E+20	0.00	-2.38	0.01	3.19E+20	0.00	-2.49	0.01	3.03E+20	0.00	-2.56	0.01	3.86E+20	0.00	-2.55	0.01	8.03E+19	0.00	-3.24	0.00
15f Wine and alcohols	3.69E+20	0.01	-2.21	0.01	4.87E+20	0.00	-2.31	0.01	5.22E+20	0.00	-2.33	0.01	8.76E+19	0.00	-3.20	0.00	5.38E+19	0.00	-3.41	0.00
15g Olive and seed oils	1.30E+22	0.22	-0.66	0.14	2.58E+22	0.26	-0.59	0.15	2.60E+22	0.23	-0.63	0.15	3.56E+22	0.26	-0.59	0.15	8.26E+21	0.06	-1.22	0.07
16 Steel and iron	1.87E+21	0.03	-1.50	0.05	7.69E+21	0.08	-1.11	0.09	8.71E+21	0.08	-1.10	0.09	1.02E+22	0.07	-1.13	0.08	7.82E+21	0.06	-1.25	0.07
17 Copper	4.61E+19	0.00	-3.11	0.00	7.65E+19	0.00	-3.11	0.00	5.72E+19	0.00	-3.29	0.00	8.07E+19	0.00	-3.23	0.00	1.67E+20	0.00	-2.92	0.00
18 Aluminium	5.77E+18	0.00	-4.01	0.00	1.83E+19	0.00	-3.74	0.00	2.75E+19	0.00	-3.61	0.00	4.43E+19	0.00	-3.49	0.00	5.21E+19	0.00	-3.42	0.00
19 Cement (Portland)	3.35E+21	0.06	-1.25	0.07	5.90E+21	0.06	-1.23	0.07	3.93E+21	0.04	-1.45	0.05	4.28E+21	0.03	-1.51	0.05	3.41E+21	0.02	-1.61	0.04
Rocks and Sediments for building																				
20 sector	8.71E+21	0.15	-0.83	0.12	1.66E+22	0.17	-0.78	0.13	1.07E+22	0.10	-1.02	0.10	1.90E+22	0.14	-0.86	0.12	2.68E+22	0.19	-0.71	0.14
21 Glass	3.94E+20	0.01	-2.18	0.01	3.79E+20	0.00	-2.42	0.01	5.24E+20	0.00	-2.32	0.01	6.32E+20	0.00	-2.34	0.01	8.23E+20	0.01	-2.23	0.01
22 Plastics	1.93E+20	0.00	-2.49	0.01	9.35E+20	0.01	-2.03	0.02	1.44E+21	0.01	-1.89	0.02	2.62E+21	0.02	-1.72	0.03	5.42E+21	0.04	-1.41	0.06
23 Asphalt	5.64E+20	0.01	-2.02	0.02	1.73E+21	0.02	-1.76	0.03	1.64E+21	0.01	-1.83	0.03	1.06E+21	0.01	-2.12	0.02	1.40E+21	0.01	-2.00	0.02
24 Chemicals	1.31E+20	0.00	-2.66	0.01	1.58E+20	0.00	-2.80	0.00	4.79E+20	0.00	-2.36	0.01	6.55E+20	0.00	-2.32	0.01	9.68E+20	0.01	-2.16	0.02
25 Wood	1.26E+20	0.00	-2.67	0.01	1.74E+20	0.00	-2.76	0.00	1.97E+20	0.00	-2.75	0.00	3.30E+20	0.00	-2.62	0.01	4.04E+20	0.00	-2.54	0.01
26 Textiles	5.54E+20	0.01	-2.03	0.02	7.39E+20	0.01	-2.13	0.02	2.43E+21	0.02	-1.66	0.04	1.94E+21	0.01	-1.85	0.03	6.87E+21	0.05	-1.30	0.06
27 Paper and derivatives	4.98E+20	0.01	-2.08	0.02	1.29E+21	0.01	-1.89	0.02	1.68E+21	0.02	-1.82	0.03	2.25E+21	0.02	-1.79	0.03	3.20E+21	0.02	-1.64	0.04
28 Fertilizers	9.62E+20	0.02	-1.79	0.03	1.13E+21	0.01	-1.94	0.02	1.14E+21	0.01	-1.99	0.02	2.17E+21	0.02	-1.80	0.03	2.23E+21	0.02	-1.79	0.03
29 Services for imports	4.52E+20	0.01	-2.12	0.02	1.16E+21	0.01	-1.93	0.02	9.39E+21	0.08	-1.07	0.09	1.38E+22	0.10	-1.00	0.10	1.96E+22	0.14	-0.86	0.12
30 Imported Labor (Commuters)	8.20E+21	0.14	-0.86	0.12	1.01E+22	0.10	-0.99	0.10	1.02E+22	0.09	-1.04	0.10	9.80E+21	0.07	-1.15	0.08	9.15E+21	0.07	-1.18	0.08
Total energy used annually	5.95E+22				9.94E+22				1.11E+23				1.38E+23				1.38E+23			
Shannon H'				1.15				1.12				1.20				1.15				1.22

Tabella 7.2 – Calcolo dell'indice σ

Years	H'	R=pC (*)	1/1+t (**)	σ
1962	1,15	3,61E+08	0,96	3,98E+08
1972	1,12	1,05E+09	0,95	1,11E+09
1982	1,20	7,36E+09	0,87	7,70E+09
1992	1,15	1,76E+10	0,95	1,91E+10
2002	1,22	3,33E+10	0,98	3,98E+10

(*) ISTAT, 1964, 1974b, 1984, 1994, 2003.

(**) http://www.rivaluta.it/serie-inflazione-media.htm?dati=t_nic.

CONCLUSIONI

Il presente studio ha messo in luce il peso che ha sull'ambiente in senso lato il mantenimento del sistema urbano di Roma. L'approvvigionamento delle risorse necessarie a supportare il metabolismo della città, comporta notevoli costi per l'ambiente inteso come sorgente delle risorse e destinazione finale delle emissioni. L'uso combinato di quattro differenti strumenti di analisi tra di essi complementari, ha messo in evidenza da diversi punti di vista l'impatto che una metropoli come Roma genera sulla scala locale e sulla scala globale. Tuttavia l'utilizzo congiunto di tali strumenti è risultato essere particolarmente descrittivo nella sua attuazione su un arco di tempo di più decenni. Il fatto che una città produca alterazioni ed impatti di vario genere nell'ambiente esterno per il solo fatto di esistere è cosa abbastanza risaputa: non esiste sistema complesso che per rimanere in vita non generi al suo esterno un aumento dell'entropia. Capire il livello di degrado che una città causa nell'ambiente esterno per sopravvivere è cosa interessante, ma lo è molto di più comprendere il ritmo con cui essa è in grado di aumentare tali alterazioni nel tempo. La metodica di MFA, che permette di valutare la quantità di materia degradata a monte per il consumo di risorse che viene effettuato localmente, ha messo in evidenza che alla quantità di materia consumata dalla città per gli usi più svariati, crescente nel tempo in maniera quadratica, corrisponde un aumento di degrado di materiale abiotico nel tempo meno che lineare. Una situazione diversa caratterizza invece il consumo di acqua. L'uso di acqua effettuato a Roma risulta crescere più lentamente della domanda indiretta d'acqua della città. Ma cosa ancor più interessante è che nonostante il consumo di acqua a Roma sia crescente, esso risulta essere sempre più irrilevante rispetto alla quantità d'acqua di cui la città ha bisogno indirettamente per i processi di produzione dei beni e dei servizi di cui essa usufruisce. L'Embodied Energy Analysis ha messo in evidenza che i flussi di energia locali e globali che alimentano la città crescono allo stesso modo nel tempo, ma la sproporzione tra l'energia utilizzata localmente e quella richiesta indirettamente per supportare la città è notevole. Paradossalmente sono proprio i derivati del petrolio a richiedere la più elevata domanda indiretta di energia. Da un'altro punto di vista l'Impronta Ecologica conferma il fortissimo peso che i derivati del petrolio hanno sull'ambiente inteso come superficie produttiva e come superficie di assorbimento. La valutazione nel tempo dell'Impronta Ecologica di Roma ha mostrato la sempre minor rilevanza che i beni di tipo alimentare hanno rispetto al ruolo sempre più imponente dei derivati del petrolio nel richiedere terra per l'assorbimento della CO₂. L'Impronta Ecologica studiata nel tempo ha messo in evidenza inoltre la fondamentale importanza di considerare anche il contributo dovuto ai processi di produzione di materiali che non riguardano le categorie energetiche. Infatti un enorme apporto dato all'Impronta Ecologica è costituito dai prodotti chimici e plastici. In particolare essi mostrano avere uno dei pesi maggiori nella formazione dell'Impronta Ecologica il cui contributo alla crescita nel tempo risulta aumentare in maniera molto rapida. Lo strumento emergetico mette infine innanzitutto in evidenza il peso praticamente irrilevante delle risorse localmente disponibili rispetto a quelle importate nel supportare la città. Il calcolo della variazione dell'indice di sostenibilità basato sull'emergia, ESI, nel tempo conferma una vertiginosa crescita dell'insostenibilità soprattutto nella fase più rapida di espansione della città (negli anni '60 e '70). L'emergia ha anche il pregio di valutare la perdita di sostenibilità nella sua accezione sociale. L'Emergia per unità di GDP mette infatti in evidenza che un reperimento delle risorse nel tempo a costo sempre più basso, come

nel caso di Roma, implica il depauperamento di altri sistemi, magari lontani, ed una svendita delle loro risorse. Tuttavia c'è da dire che più recentemente Roma ha recuperato parzialmente una propria dimensione naturale, come emerge dall'andamento nel tempo dell'ELR, confermata tra l'altro anche da recenti politiche di riconversione delle aree urbane in aree naturali protette; fenomeno quest'ultimo fisiologico delle società che hanno raggiunto un certo livello di sviluppo economico. Analogamente, è possibile fare osservazioni quantitative sulle emissioni climalteranti sulla scala locale e globale e valutare quanto un comportamento virtuoso (e in quali settori e come) potrebbe influire sulla dinamica ambientale globale.

In sintesi, considerando i flussi di risorse in ingresso e le emissioni in uscita come vere e proprie interazioni tra il sistema indagato e l'ambiente esterno, abbiamo quantificato l'entità e l'andamento temporale di tali interazioni servendoci dell'uso complementare e integrato di diverse metodiche, così da non rischiare di fornire un punto di vista incompleto.

Per fare ciò sono stati applicati al sistema territoriale e sociale della città un quadro di riferimento e una procedura di calcolo introdotta in precedenza per sistemi e processi produttivi settoriali (SUMMA). Ciò ha richiesto alcune modifiche alla procedura e un diverso criterio per la valutazione dei prodotti. Nel caso dell'ambiente urbano i prodotti non sono così facilmente individuabili e sono di fatto rappresentati dal numero di persone che nella città vivono e svolgono la propria attività (anni di vita), dal prodotto economico lordo generato e infine dal grado di informazione culturale, sociale, artistica, organizzativa, etc, generate, tutte cose la cui misura è estremamente più complessa che non il singolo prodotto di un singolo processo. Pertanto, l'upgrade della procedura SUMMA ha rappresentato un secondo valore aggiunto di questo lavoro di tesi. Le procedure di calcolo effettuate non sono riportate integralmente nell'appendice, per ovvie ragioni di spazio, ma sono disponibili su richiesta per chiunque sia interessato.

Partendo dalla constatazione della raggiunta stabilizzazione del sistema in termini dimensionali, abbiamo, inoltre, scelto di indagare più a fondo l'andamento nel tempo dell'approvvigionamento di risorse attuato dal sistema. La determinazione delle funzioni descriventi il reperimento delle varie risorse nel tempo ci ha permesso in primo luogo di constatare, in accordo con la teoria della complessità (Odum, E., 1983), che il sistema urbano di Roma aumenta in maniera crescente la sua complessità. Infatti nonostante il sistema non sia caratterizzato da una crescita demografica, le funzioni rappresentative del reperimento delle risorse nel tempo sono comunque crescenti. Ciò indica che tali risorse sono veicolate verso un crescente aumento della complessità del sistema.

Delle due ipotesi da noi formulate siamo riusciti a verificare che la prima, è sostanzialmente vera parzialmente, ossia l'appropriazione di risorse nel tempo operata dal sistema avviene ad una velocità crescente: in molti casi le funzioni rappresentative del reperimento delle risorse seguono un andamento di tipo parabolico.

Anche la seconda ipotesi da noi formulata, relativa ad una crescita della complessità con una funzione crescente di grado superiore a quella dei consumi sembra verificata. Tale ipotesi si prefiggeva in primo luogo, come obiettivo intrinseco, di determinare - mediante l'uso dell'indice di complessità da noi costruito nel capitolo 6 - la funzione rappresentativa della variazione di complessità del sistema nel tempo, ed in secondo luogo la verifica della possibilità che tale funzione potesse essere di grado superiore a quelle descriventi il reperimento delle risorse nel tempo.

I sistemi sociali ed economici territoriali rappresentano sempre più un affascinante ambito di ricerca e certamente ancora necessitano di ulteriori indagini sul maggior numero possibile di casi studio in funzione della scala spaziale e temporale. Il presente lavoro di tesi aspira a fornire un utile contributo a questo tipo di indagini multimetodo e multiscale, nella speranza che il moltiplicarsi di analisi analoghe su altri sistemi possa consentire il confronto dei

risultati, la crescita della comprensione teorica dei meccanismi dinamici e la scelta di strategie opportune di intervento per una armonica interazione tra sistemi e ambiente circostante.

BIBLIOGRAFIA

Alberti M., Waddel P., Marzluff J., and Handcock M., 2005. Biocomplexity I: Modeling Interactions Among Urban Development, Land-Cover Change, and Bird Diversity. Report to National Science Foundation, September 2001-February 2005, <http://www.nsf.gov/awardsearch/showAward.do?AwardNumber=0120024>.

Alberti M., Handcock M., Marzluff J., Redman C., and Janguo Wu, 2006. Biocomplexity II: Urban Landscape Patterns: Complex Dynamics and Emergent Properties. Report to National Science Foundation, July 1, 2005 – June 30, 2008, in progress (<http://faculty.washington.edu/malberti/>).

Ammi, 1962. Metalli non Ferrosi e Ferroleghe – Statistiche.

Ammi, 1972. Metalli non Ferrosi e Ferroleghe – Statistiche.

Ascione, M., Cherubini, F., Campanella, L., and Ulgiati, S., 2007. Environment and Complexity of the Urban Ecosystem of Rome. An Emergy Synthesis. In: Brown, M.T., Campbell, D., Comar, V., Huang, S.L., Rydberg, T., Tilley, D.R., and Ulgiati, S., (Editors). *Emergy Synthesis. Theory and Applications of the Emergy Methodology* – 4. The Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL. In press.

ASSOMET, 2002. Non Ferrous Metal Industries National Association/ Associazione Nazionale Industrie Metalli non Ferrosi. Estimated from: <http://www.assomet.it/index.php?Mod=2&Doc=245&Lev=3>. (in Italian).

Assovetro, 2003. National Association of Manufacturers of Glass/ Associazione Nazionale degli Industriali del Vetro. Estimated from: http://www.assovetro.it/3_1_2_import.htm (in Italian).

Ayres R.U. and Masini A., (1998). Waste Exergy as a Measure of Potential Harm. In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Ulgiati S., Brown M.T., Giampietro M., Herendeen R.A., and Mayumi K. (Eds). Masis Publisher, Roma, Italy; pp.113-128.

B.C.C., 2003. Bristol's City Council. Bristol's ecological footprint. In: *Quality of Life Report*, 2003. <http://www.steppingforward.org.uk/ef/swfootprints.htm>. Last contact, 28 May 2007.

Bargigli, S., Raugei, M., and Ulgiati, S., 2004. Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes. *Energy - The International Journal*, 29(12-15): 2145–2159.

Bargigli, S., Raugei, M., and Ulgiati, S., 2005. Mass flow analysis and mass-based indicators. In: *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. Sven E. Jorgensen, Robert Costanza, and Fu-Liu Xu Editors. Pp. 353-378. CRC Press, 2005.

Bargigli, S., 2004. Enhancing MFA And LCA Techniques by Means of Integrated Upstream and Downstream Flow Evaluation. The Case of Aluminum Production. In: *Book of Proceedings of the International Conference "Integrative Approaches towards Sustainability in the Baltic Sea Region - Environmental Education, Communication and Sustainability*. vol. 15, pp. 491-499. Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften – Frankfurt am Main. Walter Leal Filho/Arnold Ubelis (eds.).

Bargigli S., Raugei M., and Ulgiati S., (2005). Mass flow analysis and mass-based indicators. In: *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. Sven E. Jorgensen, Robert Costanza, and Fu-Liu Xu Editors. Pp. 353-378. CRC Press,

Bargigli S., Raugei M. and Ulgiati S., 2004. Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes. *Energy - The International Journal*, 29(12-15): 2145–2159.

Bargigli S. and Ulgiati S., 2003c. Emergy and Life-Cycle Assessment of Steel Production in Europe. In: *Emergy Synthesis. Theory and Applications of Emergy Methodology – 2*. M.T. Brown, H.T. Odum, D. Tilley, and S. Ulgiati (Editors), published by the Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, 2003, ISBN 0-9707325-1-1, pp. 141-155

Bargigli S., 2003d. Enhancing MFA And LCA Techniques by Means of Integrated Upstream and Downstream Flow Evaluation. The Case of Aluminum Production. In: *Book of Proceedings of the International Conference "integrative Approaches towards Sustainability in the Baltic Sea Region*, Walter Leal Filho/Arnold Ubelis (eds.), 2004, pp. 491-499.

Barrett, J., Vallack, H., Jones, A., and Haq, G., 2002. A Material Flow Analysis and Ecological Footprint of York. Stockholm Environment Institute – York. Biology Department, University of York, York. Pp. 132.

Bettini, V., 1996. *Elementi di Ecologia Urbana*. Einaudi, Torino, Italy. Pp. 259 (in Italian)

Biondi, P., Panaro, V., and Pellizzi, G., 1989. Le richieste di energia del sistema agricolo italiano. Report LB-20, Sottoprogetto Biomasse ed Agricoltura. Progetto Finalizzato Energetica. Pp.18-24.

Bongardt, B., 2003. Material Flow Accounting for London in 2000. International Workshop: Quo vadis MFA? Vienna, 9th October 2003.

Boustead I. and Hancock G.F., 1979. Handbook of Industrial Energy Analysis. John Wiley & Sons Publisher, New York, 443 pp.

Brown M.T. and Herendeen R., 1996. Embodied energy analysis and emergy analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, 19: 219-235.

Brown M.T. and Ulgiati S., 1999. Emergy Evaluation of the Biosphere and Natural Capital. *Ambio*, 28(6), Sept. 1999, 486-493.

Brown, M.T., and Ulgiati, S., 2002. Emergy Evaluation and Environmental Loading of Electricity Production Systems. *The Journal of Cleaner Production*, 10: 321-334, 2002.

Brown, M.T., and Ulgiati, S., 2004. Emergy Analysis and Environmental Accounting. In: *Encyclopedia of Energy*, C. Cleveland Editor, Academic Press, Elsevier, Oxford, UK, pp. 329-354.

Brown, M.T., and Vivas, M.B., 2005. Landscape Development Intensity Index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 101: 289-309

Buwal. Ökoinventare für Verpackungen. Schriftenreihe Umwelt 250, Bern, 1996.

CCIAA Roma, 1972. Agricolture Handicraft Industry Chamber of Commerce/ Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura. Rome and Province through the Statistic/ Roma e Provincia attraverso la Statistica (in Italian).

CCIAA Roma, 1984. Agricolture Handicraft Industry Chamber of Commerce/ Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura. Rome and Province through the Statistic/ Roma e Provincia attraverso la Statistica (in Italian).

CCIAA Roma, 1994. Agriculture Handicraft Industry Chamber of Commerce/ Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura. Rome and Province through the Statistic/ Roma e Provincia attraverso la Statistica (in Italian).

CCIAA Roma, 2003. Agriculture Handicraft Industry Chamber of Commerce/ Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura. Rome and Province through the Statistic/ Roma e Provincia attraverso la Statistica. Page 390 (in Italian).

CCIAA Roma, 2004. Agriculture Handicraft Industry Chamber of Commerce/ Camera di Commercio Industria Artigianato Agricoltura. Provincial Economic Scenario/ Lo scenario economico provinciale. Page 12. <http://www.rm.camcom.it/Home.shtm> (in Italian).

CECA, 1963. Comunità Europea del Carbone e dell'Acciaio. Relazione Generale sulla attività della Comunità.

Cherubini, F., Bargigli, S., and Ulgiati, S., 2007. Waste management: from landfill to energy and material recovery. A multi-method LCA approach. In: A. Mirandola, Ö. Arnas, A. Lazzaretto (Eds), Book of Proceedings of the 20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2007, Padova, Italy, 25-28 June 2007, SGE Editoriali. Pp. 231-240.

Comune Roma, 1964. Annuario Statistico della Città di Roma.

Comune Roma, 1973. Notiziario Statistico Mensile del Comune di Roma.

Comune Roma, 1983. Notiziario Statistico Mensile del Comune di Roma.

Comune Roma, 1993. Notiziario Statistico Mensile del Comune di Roma.

Comune Roma, 2003a. Rome Statistical Yearbook/ Annuario Statistico del Comune di Roma. www.comune.roma.it/uffstat/ (in Italian).

Comune Roma, 2003b. General Accounting/ Ragioneria Generale. Statement Report/ Relazione al Rendiconto. Synthesis Report/ Rapporto di Sintesi, 2003. Page 32. www.comune.roma.it/

Comune Roma, 2004a. The Cities inside the City/ Le Città nella Città. Page 8. www.comune.roma.it/uffstat/ (in Italian).

Comune Roma, 2004b. Estimated from: Rome Statistical Yearbook/ Annuario Statistico del Comune di Roma, pp. 164-177. www.comune.roma.it/uffstat/ (in Italian).

Comune Roma, 2005. Provincial Statistic Mosaic/ Mosaico Statistico Provinciale, page 45, www.comune.roma.it/ (in Italian).

Corinair (1993). Working Group on Emission Factors for Calculating 1990 Emissions from Road Traffic. Methodology and Emission Factors. Volume 1. Commission of the European Communities, Luxembourg. ISBN 92-826-5772-X, pp.120.

Doughty, M., and Hammond, G., 2004. A footprint analysis of the city of Bath. In: Sustainability and the Built Environment at and Beyond the City Scale. <http://www.stepsforward.org.uk/ef/swfootprints.htm>. Last contact, 28 May 2007.

DOXA, 2003. Statistic Researches and Public Opinion Analysis Institute/ Istituto per le Ricerche Statistiche e l'Analisi dell'Opinione Pubblica. Italy and International Tourism in the 2002/L'Italia e il Turismo Internazionale nel 2002. Page 2. <http://www.doxa.it/italiano/nuoveindagini/turismointernaz.pdf> (in Italian).

Dyke, C. (1988). Cities as Dissipative Structures. In: Entropy, Information and Evolution: New perspectives on Physical and Biological Evolution", Edited by Weber B.H., Depew D.J., and Smith J.D., The MIT Press, Cambridge, Massachussets.

ENEA, 2002. Environment Energy New Technologies Agency/ Ente per le Nuove Tecnologie l'Energia e l'Ambiente. Monitoring and Evaluation of Transport and Energy Oriented Radical Strategies for Clean Urban Transport. <http://www.enea.it/> (in Italian).

ENI, 1962. Relazioni e Bilanci delle Principali Società del Gruppo.

Enirisorse, 1992. Metalli non Ferrosi – Statistiche.

EPA Toxic Release Inventory for the Iron and Steel Industry, 1995 in: Hettige, M., Martin, P., Singh, M, and D. Wheeler (1995), The Industrial Pollution Projection System, Policy Research Department, Policy Research Working Paper 1431, The World Bank.

Federici, M., Ulgiati, S., Verdesca, D., and Basosi, R., 2003. Efficiency and Sustainability Indicators for Passenger and Commodities Transportation Systems. The Case of Siena, Italy. *Ecological Indicators*, 3: 155-169.

Federici, M., Ruzzenenti, F., Ulgiati, S., and Basosi, R., 2004. Emergy Analysis of Selected Local and National Transport Systems in Italy. In: Brown, M.T., Campbell, D., Comar, V., Huang, S.L., Rydberg, T., Tilley, D.R., and Ulgiati, S., (Editors). *Emergy Synthesis. Theory and Applications of the Emergy Methodology – 3*. The Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL, 2004. Pp. 449-464.

Foran B. and Crane D., 1998. The OzECCO Embodied Energy Model of Australia's Physical Economy. In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Ulgiati S., Brown M.T., Giampietro M., Herendeen R.A., and Mayumi K. (Eds). Musis Publisher, Roma, Italy; pp.579-596.

Geddes, P., 1915. *City in Evolution*. Williams and Norgate Ltd., London.

Giampietro M., Mayumi K., and Pastore G., 1998. A Dynamic Model of Socio-economic Systems described as Adaptive Dissipative Holarchies. In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Ulgiati S., Brown M.T., Giampietro M., Herendeen R.A., and Mayumi K. (Eds). Musis Publisher, Roma, Italy; pp. 167-190.

Giannantoni C., Lazzaretto A., Macor A., Mirandola A., Stoppato A., Tonon S., and Ulgiati S., 2002. Integrated Multicriteria Approach to the Improvement of Energy Systems design. *Energy-The International Journal*, 2002.

G.L.A., 2002. Greater London Authority. *City Limits Report: A Resource Flow and Ecological Footprint Analysis of Greater London*. Best Foot Forward, Oxford. <http://www.citylimitslondon.com/>, last contact, 28 May 2007.

Haines, V., 1986. Energy and urban form: a human ecological critique. *Urban Affairs Quarterly* 21, 337-353.

Herendeen R.A., (1998). Embodied Energy, embodied everything...now what? In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Ulgiati S., Brown M.T., Giampietro M., Herendeen R.A., and Mayumi K. (Eds). Musis Publisher, Roma, Italy; pp. 13-48.

Hinterberger F. and Stiller H., 1998. Energy and Material Flows. In: *Advances in Energy Studies. Energy Flows in Ecology and Economy*. Ulgiati S., Brown M.T., Giampietro M., Herendeen R.A., and Mayumi K. (Eds). Musis Publisher, Roma, Italy; pp.275-286.

Huang, S. L., 1998a. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management* 52, 39-51.

Huang, S. L., 1998b. Ecological energetics, hierarchy, and urban form: a system modelling approach to the evolution of the urban zonation. *Environment and Planning B: Planning and Design* 25, 391-410.

Huang, S. -L., Lai, H. -Y., Lee, C. -L., 2001. Energy hierarchy and urban landscape system. *Landscape and Urban Planning* 53, 145-161.

Inceneritorizero, 2002. <http://www.inceneritorizeroumbria.it/default.asp>

ISMEA, 2005. Services Institute for Alimentary Agricultural Market/ Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare. Estimated from: Report on nutrition consumptions in Italy/ Rapporto sui consumi alimentari in Italia. Pages 6, 9, 11, 12, 14, 16, 18, 21. <http://www.ismea.it/> (in Italian).

ISO, 1997. Environmental management e Life cycle assessment e Principles and framework (ISO 14040:1997). Brussels: International Standard Organization; June 1997.

ISO, 1998. Environmental management e Life cycle assessment e Goal and scope definition and inventory analysis (ISO 14041:1998). Brussels: International Standard Organization; October 1998.

ISTAT, 1962. *Annuario Statistico del Commercio Interno* - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1963. (a) *Annuario di Statistiche Industriali*; (b) *Annuario di Statistiche Provinciali*, Roma - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1964. *Annuario Statistico Italiano* - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1973. *Annuario Statistico del Commercio Interno* - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1974. (a) *Annuario di Statistiche Industriali*; (b) *Annuario Statistico Italiano* - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1983. Annuario Statistico del Commercio Interno e del Turismo - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1984. Annuario Statistico Italiano - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1986. Annuario di Statistiche Industriali - Istituto Centrale di Statistica.

ISTAT, 1992. (a) Coeweb, Statistiche del Commercio Estero; (b) Statistica Annuale della Produzione Industriale; (c) Statistiche del Turismo - Istituto Nazionale di Statistica.

ISTAT, 1994. Annuario Statistico Italiano - Istituto Nazionale di Statistica.

ISTAT, 2002. (a) Statistical National Institute/Istituto Nazionale di Statistica. Estimated from: Annual Statistic of Industrial Production/ Statistica Annuale della Produzione Industriale, http://www.istat.it/dati/catalogo/20050215_02/ ; (b) Coeweb, Foreign Trade Statistics/ Coeweb, Statistiche del Commercio Estero, <http://www.coeweb.istat.it/> (in Italian).

ISTAT, 2003. Statistical National Institute/Istituto Nazionale di Statistica. Italian Statistical Yearbook/ Annuario Statistico Italiano. www.istat.it (in Italian).

ISTAT, 2006. Statistical National Institute/Istituto Nazionale di Statistica. Estimated from: Accounts and Economic Aggregates of the Public Administrations/ Conti ed Aggregati Economici delle Amministrazioni Pubbliche. Statistics in Short/ Statistiche in Breve, 1980-2005. http://www.istat.it/salastampa/comunicati/non_calendario/20060630_00/ (in Italian).

Jaakson, R., 1977. Urbanization and natural environments: A position paper. *Urban Ecology* 2, 245-257.

Jarach M. (1985). Sui Valori di Equivalenza per l'Analisi e il Bilancio Energetico in Agricoltura. *Riv. di Ing. Agr.*, 2, 102-114.

Jean Ziegler, 2007. *The right to food*. Interim report of the Special Rapporteur on the right to food, Jean Ziegler, submitted to the United Nations General Assembly 62, in accordance with General Assembly resolution 61/163. Pp. 23.

Jensen et al., 1997. *Life Cycle Assessment (LCA). A guide to approaches, experiences and information sources*. European Environmental Agency, Environmental Issues Series, No. 6. Pp.116

Kenworthy, J.R. and Laube, F., 2001. The Millennium Cities Database for Sustainable Transport. Brussels: International Union of Public Transport (UITP) and Institute for Sustainability and Technology Policy (ISTP), Brussels.

Kenworthy, J.R., 2003. Energy Use in Urban Transport Systems: A Global Review. In: *Advances in Energy Studies. Reconsidering the Importance of Energy*. Edited by S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, K. Mayumi. Published by SGE – Padova (Italy). ISBN 88-86281-81-1. Pp. 459-580.

Kuznet, S., 1995. Economic growth and income inequality. *American Economic Review* 49 (1): 22-24, March.

Lei, K-P and Wang, Z-S, 2006. A Modified Emergy Synthesis and Analysis of Macao. Submitted to *Ecological Engineering*.

Lorentz, H.A., Weyl, H., Minkowski, H., 1952. The Principle of Relativity. Albert Einstein. A Collection of Original Papers on the Special and General Theory of Relativity. Dover Publications, Inc.

Lotka A.J., 1922a. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.*, 8: 147-150.

Lotka A.J., 1922b. Natural selection as a Physical Principle. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 8: 151-155.

Marshall McLuhan, 1989 [*The Global Village: Transformations in World Life and Media in the 21st Century*](#) with [Bruce R. Powers](#); Oxford University Press ISBN 0-19-505444-X.

Martinez Alier, J., 2003. Urban Unsustainability and Environmental Conflicts. In: *Advances in Energy Studies. Reconsidering the Importance of Energy*. Edited by S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, K. Mayumi. Published by SGE – Padova (Italy). ISBN 88-86281-81-1. Pp. 491-505.

Maslow A. H., 1962, *Toward a psychology of being*. Van Nostrand Reinhold, New York

McPherson, E.G., Nowak, D.J., and Rowntree, R.A., 1994. Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. USDA-United States Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station, Radnor, Pennsylvania, USA. General technical Report NE-186. 201 pp.

Montini, A., 1997. I consumi alimentari delle famiglie italiane: un modello per le decisioni di consumo extradomestico utilizzando i microdati di spesa familiare. Dipartimento di Scienze Economiche. Università di Bologna. 40 pp.

Munda, G., 2003. Urban Sustainability as a Multidimensional Concept. In: *Advances in Energy Studies. Reconsidering the Importance of Energy*. Edited by S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, K. Mayumi. Published by SGE – Padova (Italy). ISBN 88-86281-81-1. Pp. 507-517.

Nieminem, E., Linke, M., Tobler, M., and Beke, B.V., 2007. EU COST Action 628: Life Cycle Assessment (LCA) of textile products, eco-efficiency and definition of best available technology (BAT) of textile processing. *Journal of Cleaner Production*, 15:1259-1270.

Noorman, K.J., Benders, R.M.J., Falkena, H.J., Kok, R., and Moll, H.C., 2003. Household Energy Budget in 4 European Cities. In: *Advances in Energy Studies. Reconsidering the Importance of Energy*. Edited by S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, K. Mayumi. Published by SGE – Padova (Italy). ISBN 88-86281-81-1. Pp. 519-533.

Obernosterer, R., Brunner, P., Daxbeck, H., Gagan, T., Glenck, E., Hendriks, C., Morf, L., Paumann, R., Reiner, I., 1998a. *Urban Metabolism. The City of Vienna*. Vienna University of Technology. Institute for Water Quality and Waste Management. Department of Waste Management.

Obernosterer, R., Brunner, P.H., Daxbeck, H., Gagan, T., Glenck, E., Hendriks, C., Morf, L., Paumann, R., and Reiner, I., 1998b. *Material Accounting as a Tool for Decision Making in Environmental Policy - Case Study Report – 1. Urban Metabolism. The City of Vienna*. Report to EC Environmental Research Programme. Research Area III – Economic and Social Aspects of the Environment, submitted by Institute for Water Quality and Waste Management, Technical University of Vienna.

Odum E.P., 1983; *Basic Ecology*, CBS College Publishing.

Odum, H. T., 1971. *Environment, Power, and Society*. Wiley, New York.

Odum H. T. and Peterson, L. L., 1972. Relationship of energy and complexity in planning. *Architectural Design* 43, 624-629.

Odum H. T., Odum E. C. 1981. *Energy Basis for Man and Nature*, 2^o edn. Mc Graw-Hill, New York.

Odum H.T., 1983. Maximum power and efficiency: a rebuttal. *Ecological Modelling*, 20: 71-82.

Odum H. T., 1983. *Systems Ecology*. Wiley, New York.

Odum H. T., 1988. Self-organization, transformity, and information, *Science* 242, 1132-1139.

Odum H.T., Odum E.C. and Brown M.T. (1993); *Environment and Society in Florida*. Center for Environmental Policy, Env. Eng. Sci., Univ. Florida.

Odum, H.T., Brown, M.T., Whitefield, L.S., Woithe, R., Doherty, S., 1995. Zonal organization of cities and environment: a study of energy system basis for urban society A Report to the Chiang Ching-Kuo Foundation for International Scholarly Exchange, Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL.

Odum H. T., 1996. *Environmental Accounting. Emergy and Environmental Decision Making*. John Wiley.

Odum, H.T., 2000. *Handbook of Emergy Evaluation: A Compendium of Data for Emergy Computation Issued in a Series of Folios. Folio No.2 – Emergy of Global Processes*. Center for Environmental Policy, Environmental Engineering Sciences, Univ. of Florida, Gainesville, 16 pp. (<http://www.emergysystems.org/>)

Odum H. T., Odum E. C. 2001. *A Prosperous Way Down*. University Press of Colorado, Boulder, Colorado.

O'Neill R.V., DeAngelis D.L., Waide J.B., and Allen T.F.H., 1986. *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, 1986.

Prigogine, I., 1967. Structure, Dissipation and Life. Theoretical Physics and Biology, Versailles, 1967. North-Holland Publ. Company, Amsterdam, 1969. (E' in questa comunicazione che il termine "strutture dissipative" viene usato per la prima volta.

Ritthof M., Rohn H., and Liedtke C., (2002). MIPS Berechnungen – Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen Wuppertal Spezial 27. Wuppertal Institute publications.

Russo, G.F., Ascione, M., and Franzese, P.P., 2004. Analisi Energetica della Riserva Marina di Punta Campanella. *Biologi Italiani*, 11; 63-70.

Samim, 1982. Metalli non Ferrosi – Statistiche.

Schmidt-Bleek, F., 1993. MIPS re-visited. *Fresenius Environ. Bull.* 2, 407–412.

Schmidt-Bleek F., 1993. "Wieviel Umwelt braucht der Mensch - MIPS, das Mass für Ökologisches Wirtschaften", Birkhaeuser, Basel, Boston, Berlin.

Schmidt-Bleek F., 1998. "MAIA, Einführung in die Material-Intensitäts-Analyse nach dem MIPS-Konzept", Birkhaeuser, Basel, Boston, Berlin.

Slesser, M. (Ed.), 1974. Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions. IFIAS, Stockholm, Sweden, 89 pp.

Smil V., 1991. General Energetics. Energy in the Biosphere and Civilization. Wiley, New York, 367 pp.

Stiller H. Material Intensity of Advanced Composite Materials. Wuppertal Papers Nr. 90. Feb.1999.

Szargut J., Morris D.R., and Steward F.R., (1988). Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes, Hemisphere Publishing Corporation, London.

Tabacco A.M., 2003. Tesi di Dottorato. Analisi del ciclo di vita della produzione e del funzionamento delle celle a combustibile a ossidi solidi (SOFC) e a carbonati fusi (MCFC). Confronto tra vari sistemi di produzione di energia elettrica. (In italian).

Tainter, J. A., 1990, The Collapse of Complex Societies. Cambridge: Cambridge University Press.

Ulgiati S., Brown M.T., Bastianoni S., and Marchettini N., (1995). Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. *Ecological Engineering*, 5: 519-531.

Ulgiati S. and Brown M.T., (1998). Monitoring patterns of sustainability in natural and man-made ecosystems. *Ecological Modelling*, 108: 23-36.

Ulgiati S., Bargigli S., Raugei M. and Tabacco A.M. (2000) Life-Cycle and Environmental Impact Assessment of Hydrogen and Fuel Cells. In: *Advances in Energy Studies. Exploring Supplies, Constraints, and Strategies*. S. Ulgiati, M.T. Brown, M. Giampietro, R.A. Herendeen, and K. Mayumi, Editors. SGE Publisher Padova, Italy,. Pp. 29-42.

Ulgiati S., 2001. Energy Flows in Ecology and Economy. In: *The Encyclopedia of Physical Science and Technology - Power Systems*. R.A. Meyers, Editor-in-Chief. Academic Press, Inc., Vol. 5, pp.441-460.

Ulgiati S., Bargigli S., Raugei M., Tabacco A.M. Efficiency and sustainability assessment of SOFCs and MCFCs, report to ENEA. Italy, 2002.

Ulgiati S., Bargigli S. and Raugei M., 2003. Can a Process Sustainability be Assessed by means of Thermodynamic and Ecological Impact categories? *Ecological Questions*, 3:153-168, (2003).

Ulgiati S., Bargigli S., and Raugei M., 2004. Integrated Indicators to Assess Design, Performance and Environmental Sustainability of Energy Conversion Processes. In: *Integrative Approaches towards Sustainability in the Baltic Sea Region. Series on Environmental Education, Communication and Sustainability*, N. 15. Walter Leal Filho/Arnold Ubelis (eds.). Peter Lang Publisher, Frankfurt am Main, Germany, 2004, pp. 211-232

Ulgiati S., Raugei M., and Bargigli S., 2006. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. *Ecological Modelling*, 190 (2006) 432–442

Ulgiati S., and Brown M., 2007. Emergy and Ecosystems Complexity. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, available on line from 12 July 2007, www.sciencedirect.com.

Unione Petrolifera, 2003. Estimated from: Annual Report/ Relazione Annuale, 2003. Page 96. <http://www.unione petrolifera.it/Stampa/Pubblicazioni> (in Italian).

Unione Petrolifera, 2004. Statistiche Economiche Energetiche e Petrolifere.

Valero A. et al., (2002). An Exergetic Assessment of Natural Mineral Capital (1): Reference Environment, a Thermodynamic Model for a Degraded Earth. Proc. ECOS'02, 2112, Berlin, Germany (G. Tsatsaronis et al. Eds), Vol. I, pp. 66-72.

Wackernagel, M. and Rees, W., 1996. Our Ecological Footprint. Reducing Human Impact on the Earth. New Society Publisher, Gabriola Island, British Columbia (Canada).

Wackernagel M. et al., 1997, Ecological Footprint of Nations. How much do they use? How much do they have?, The Earth Council.

Wernick, I., Herman, R., Govind, S., Ausubel, J.H., 1996. Materialization and Dematerialization: Measures and Trends. *Daedalus* 125(3):171-198. Journal of the American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, MA.

APPENDICE A

Footnotes of Tables of APPENDIX 5

Year: 1962

Area of Rome: 150760.54 ha = $1.51\text{E}+09 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 1964].

1 Solar radiation: Solar energy received = (avg. insolation)(1-albedo)(area)(365 day/yr)(4186 J/kcal). Insolation (average) = 1737.4 kWh/m²/yr [ISTAT, 2002] = $6.25\text{E}+09 \text{ J/m}^2/\text{yr}$. Albedo = 0.2. Urban area = $1.29\text{E}+09 \text{ m}^2$. Total solar energy received = $6.43\text{E}+18 \text{ J/yr}$.

2 Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface): Wind energy = (density)(drag coeff.)(geostrophic wind velocity)³(area)(sec/year). Air density = 1.3 kg/m³. Wind speed = 2.175 m/s [Comune Roma, 2004a]. Geostrophic wind = 5.2 m/s. Drag coefficient = $3.00\text{E}-03$. Area = $29\text{E}+09 \text{ m}^2$; sec/year = $3.15\text{E}+07$ s/yr. Total wind energy = $2.22\text{E}+16 \text{ J/yr}$.

3 Evapotranspiration (Chemical Potential Energy): Evapotranspiration energy: (land used)(Evapotranspiration rate)(density)(Gibbs Free Energy per gram).

A) Land covered by forest = 9726 ha; land used for wood farm = 112.8 ha; Land used for fruit production = 1798.1 ha. Total area covered by trees = 11636.9 ha = $1.16\text{E}+08 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.559 m/yr [calculated after Ulgiati et al., 1994]. Density water = $1.00\text{E}+06 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $3.08\text{E}+14 \text{ J/yr}$.

B) Land covered by pasture = 5227.9 ha = $5.23\text{E}+07 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.728 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00\text{E}+06 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $1.81\text{E}+14 \text{ J/yr}$.

C) Land covered by crops = 30016.2 ha = $3.00\text{E}+08 \text{ m}^2$ [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.694 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00\text{E}+06 \text{ g/m}^3$. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = $1.48\text{E}+15 \text{ J/yr}$.

4 River geopotential energy: Geopotential energy received (relative to sea level) = (flow vol.)(density)(height at entry) (gravity). Volume flow = 150 m³/s [<http://it.wikipedia.org/wiki/Tevere>] = $4.73\text{E}+09 \text{ m}^3/\text{yr}$. Density water = $1.00\text{E}+03 \text{ kg/m}^3$. Height at entry = 30 m (Our estimate). Gravity = 9.81 m/s^2 . Total geopotential energy received (relative to sea level) = $1.39\text{E}+15 \text{ J/yr}$.

5 Wave Energy delivered on shore: Wave energy = (Parallel component of shore length)(Front Wave Energy)(time in s/yr). Coast Length = $4.46\text{E}+04 \text{ m}$ [<http://www.osservatoriomare.lazio.it/>]. Component of length parallel to front wave = 25394 m (Our estimate). Front wave energy = $2.20\text{E}+04 \text{ w/m}$ [Couper, 1990]. Time = $3.15\text{E}+07 \text{ s/yr}$. Total wave energy delivered = $1.76\text{E}+16 \text{ J/yr}$.

6 Tidal Energy (half of tidal energy is supposed to be absorbed at the shelf): Tidal Energy = (shelf)(0.5)(tides/yr)(mean tidal range)²(density of seawater)(gravity). Coast Length of Italy (Including Islands) = $7.38\text{E}+06 \text{ m}$ [ISTAT, 2003]. Continental Shelf Area of Italy = $1.44\text{E}+11 \text{ m}^2$ [WRI, 1990]. Continental Shelf Area of Rome = $8.70\text{E}+08 \text{ m}^2$ (Proportional calculation on Italy data base). Avg. Tide Range = 0.30 m [IIM, 1992]. Density = $1.03\text{E}+03 \text{ kg/m}^3$ [Couper, 1990]. Tides/year = $7.30\text{E}+02$ (2 tides/day in 365 days). Total tidal energy = $2.87\text{E}+14 \text{ J/yr}$.

7 Loss of Topsoil (areas with mature untouched vegetation are assumed to have little net gain or loss of topsoil): Energy of net loss = (net loss)(% org.in soil)(5.0 Kcal/g)(4186 J/kcal). Farmed area subject to erosion = $4.10\text{E}+08 \text{ m}^2$ [<http://www.urbanistica.comune.roma.it/attachment/516171D1.pdf>]. Erosion rate of

- farmed area= $1.50\text{E}+03$ g/m²/yr. Fraction of organic matter in soil= 3.00% [Odum, 1996]. Energy cont. per g organic= 5.00 kcal/g [Odum, 1996]. Net loss= (farmed area)(erosion rate)= $6.15\text{E}+11$ g/yr. Total energy of net loss= $3.86\text{E}+14$ J/yr (energy content of degraded organic matter in soil).
- 8 Gasoline (unleaded):** Gasoline used= $1.69\text{E}-01$ Mton/yr= $1.69\text{E}+05$ ton/yr= $1.69\text{E}+11$ g/yr [ENI, 1962]. HHV= 44 MJ/kg= 44000 J/g. Total gasoline energy= $7.45\text{E}+15$ J/yr. Gasoline unit price= 0.05 €/L [ENI, 1962]. Gasoline density= 750 kg/m^3 = 750 g/L. Total gasoline cost= $1.18\text{E}+07$ €/yr.
- 9 Diesel:** Total diesel used= $1.13\text{E}-01$ Mton/yr= $1.13\text{E}+05$ ton/yr= $1.13\text{E}+11$ g/yr. HHV= 43 MJ/kg= $4.30\text{E}+04$ J/g. Total diesel energy= $4.86\text{E}+15$ J/yr [Unione Petrolifera, 2004]. Diesel unit price= 0.04 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. Diesel density= 832.5 kg/m^3 = 832.5 g/L. Total diesel cost= $5.57\text{E}+06$ €/yr.
- 10 LPG:** total LPG used= $3.47\text{E}-02$ Mton/yr= $3.47\text{E}+04$ ton/yr= $3.47\text{E}+10$ g/yr. HHV= 19800 Btu/lb= 46376 J/g [ENI, 1962]. Total LPG energy= $1.61\text{E}+15$ J/yr. LPG unit price= 0.03 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. LPG density= 505 kg/m^3 = 505 g/L. Total LPG cost= $1.72\text{E}+06$ €/yr.
- 11 Heavy Oil for domestic heating:** Total used= $1.16\text{E}+11$ g/yr [Unione Petrolifera, 2004]. HHV of Heavy Oil= $4.26\text{E}+04$ J/g. Total Energy = $4.93\text{E}+15$ J/yr. Unit price= $7.00\text{E}-03$ €/kg [Unione Petrolifera, 2004]. Total cost for heavy oil= $8.10\text{E}+05$ €/yr.
- 12 Natural gas:** [Comune Roma, 1964a]. Volumes used: Total nat. gas used= $2.70\text{E}+08$ m³/yr (of which, for domestic use= $8.60\text{E}+07$ m³/yr; used for building heating= $1.36\text{E}+08$ m³/yr; for other uses= $4.85\text{E}+07$ m³/yr). Density of nat. gas= $7.89\text{E}+02$ g/m³ Total mass of nat. gas used= $2.13\text{E}+11$ g/yr (of which, for domestic use= $6.79\text{E}+10$ g/yr; for building heating= $1.07\text{E}+11$ g/yr; for other uses= $3.82\text{E}+10$ g/yr). Conversion to energy units: HHV= $2.13\text{E}+04$ Btu/lb= $4.99\text{E}+04$ J/g. Total energy in nat. gas= $1.06\text{E}+16$ J/yr (of which, for domestic use= $3.39\text{E}+15$ J/yr; for building heating= $5.34\text{E}+15$ J/yr; for other uses= $1.91\text{E}+15$ J/yr). Unit price of natural gas= $1.49\text{E}-02$ €/m³. Total cost of natural gas= $4.03\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1964] (of which, for domestic use= $1.28\text{E}+06$ €/yr; for building heating= $2.02\text{E}+06$ €/yr; for other costs= $7.22\text{E}+05$ €/yr).
- 13 Electricity.** Total used= $2.35\text{E}+03$ GWh/yr = $2.35\text{E}+06$ MWh/yr= $2.35\text{E}+09$ kWh/yr= $8.45\text{E}+15$ J/yr [Comune Roma, 1964a]. Unit price= $2.64\text{E}-03$ €/kWh. Total electricity cost= $6.19\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 14 Water.** Total water used= $1.93\text{E}+08$ m³ [Comune Roma, 1964a]. Water density= $1.00\text{E}+00$ kg/L= $1.00\text{E}+03$ kg/m³= $1.00\text{E}+06$ g/m³. Mass of water used= $1.93\text{E}+14$ g/yr. Unit price= $1.95\text{E}-02$ €/m³. Total water cost= $3.75\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15 Main Food Items.**
- 15a Fish. Total fish used= $1.79\text{E}+10$ g/yr [Comune Roma, 1964]. Total cost= $5.82\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15b Meat. Total meat used= $9.69\text{E}+10$ g/yr [Comune Roma, 1964]. Total cost= $3.49\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15c Fruits and Vegetables. Total fruits and vegetables used= $6.83\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1964]. Total cost= $3.69\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15d Milk, cheese and other dairy products. Total milk, cheese and other dairy products used= $1.60\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1964]. Total cost= $2.04\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15e Cereals and derivatives. Total cereals and derivatives used= $4.08\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1964]. Total cost= $2.68\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 15f Wine and alcoholics. Total wine and alcoholics used= $2.62\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1964]. Total cost= $2.11\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1963a].
- 15g Olive and seed oils. Total oils and seed oils used= $3.06\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1964]. Total cost= $8.16\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1964].
- 16 Steel and Iron.** Total used= $5.92\text{E}+11$ g/yr [CECA, 1963]. Total cost= $3.09\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1963b]
- 17 Copper.** Total used= $1.37\text{E}+10$ g/yr [Amami, 1962]. Total cost= $3.51\text{E}+06$ €/yr [Amami, 1962]
- 18 Aluminium.** Total used= $7.43\text{E}+09$ g/yr [Amami, 1962]. Total cost= $1.38\text{E}+06$ €/yr [Amami, 1962]
- 19 Cement (Portland).** Total used= $1.93\text{E}+12$ g/yr. [ISTAT, 1963a]. Total cost= $9.48\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 20 Rocks and Sediments for Building Sector.** Total used= $5.27\text{E}+12$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $2.81\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 21 Glass.** Total used= $1.12\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $3.31\text{E}+05$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 22 Plastics.** Total used= $1.99\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $3.19\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 23 Asphalt.** Total used= $5.90\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $4.40\text{E}+05$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 24 Chemicals.** Total used= $2.05\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $1.93\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 25 Wood.** Total used= $1.86\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $3.38\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a]
- 26 Textiles.** Total used= $4.14\text{E}+09$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $4.68\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a]

- 27 Paper and Derivatives.** Total used= $7.61\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $6.71\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a].
- 28 Fertilizers.** Total used= $1.16\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1963a]. Total cost= $1.38\text{E}+06$ €/yr [ISTAT, 1963a].
- 29 Imported Labor (Commuters).** Daily commuters from nearby villages and countryside deliver work in support to city dynamics and economy. This work is at least partially supported by additional energy flows outside the city. Number of workers= $2.28\text{E}+05$ people/yr (our estimate based on the conservative assumption that daily commuters are about 10% of total Rome's population)
- 30 Services.** Services is a measure of indirect labor performed outside of the system in order to make and deliver imported goods and commodities. Services are expressed in money terms (€, \$...) and calculated as the total cost of imports. Services are converted into energy (seJ) by multiplying by the energy to money ratio (seJ/€) of the country in the year under investigation. Total value of services= $2.76\text{E}+08$ €/yr [Sum of costs of Items from 8 to 28]
- 31 Financing.** Governmental money for salaries= $4.37\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 2006]. Governmental funding for public services= $1.05\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 2006]. Total money from Government= $5.42\text{E}+07$ €/yr.
- 32 Tourism.** Number of tourists= $4.42\text{E}+06$ units/yr [ISTAT, 1962]. Permanence days (average) per person= 2.69 days [Comune Roma, 2004b]. Daily expenses per person (average)= 3.40 \$/day [ISTAT, 1962]. Total money from tourists= $4.05\text{E}+07$ \$/yr.

Output: Population supported for one year (people* yr⁻¹) and yearly GDP assumed as products of city dynamics in the investigated year 1962.

Population of Rome= 2278882 Units/yr [Comune Roma, 1964].

GDP of Rome= $4.73\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1964].

Year: 1972

Area of Rome: 150760.54 ha = $1.51\text{E}+09$ m² [Comune Roma, 1973].

- 1 Solar radiation:** Solar energy received = (avg. insolation)(1-albedo)(area)(365 day/yr)(4186 J/kcal). Insolation (average)= 1737.4 kWh/m²/yr [ISTAT, 2002]= $6.25\text{E}+09$ J/m²/yr. Albedo = 0.2. Urban area = $1.29\text{E}+09$ m². Total solar energy received= $6.43\text{E}+18$ J/yr.
- 2 Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface):** Wind energy = (density)(drag coeff.)(geostrophic wind velocity)³(area)(sec/year). Air density = 1.3 kg/m³. Wind speed = 2.175 m/s [Comune Roma, 2004a]. Geostrophic wind = 5.2 m/s. Drag coefficient= $3.00\text{E}-03$. Area = $29\text{E}+09$ m²; sec/year = $3.15\text{E}+07$ s/yr. Total wind energy = $2.22\text{E}+16$ J/yr.
- 3 Evapotranspiration (Chemical Potential Energy):** Evapotranspiration energy: (land used)(Evapotranspiration rate)(density)(Gibbs Free Energy per gram).
 - A) Land covered by forest = 9726 ha; land used for wood farm = 112.8 ha; Land used for fruit production = 1798.1 ha. Total area covered by trees = 11636.9 ha = $1.16\text{E}+08$ m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.559 m/yr [calculated after Ulgiati et al., 1994]. Density water= $1.00\text{E}+06$ g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water= 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.)= $3.08\text{E}+14$ J/yr.
 - B) Land covered by pasture = 5227.9 ha = $5.23\text{E}+07$ m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.728 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00\text{E}+06$ g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water= 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.)= $1.81\text{E}+14$ J/yr.
 - C) Land covered by crops = 30016.2 ha= $3.00\text{E}+08$ m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.694 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = $1.00\text{E}+06$ g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water= 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.)= $1.48\text{E}+15$ J/yr.
- 4 River geopotential energy:** Geopotential energy received (relative to sea level) = (flow vol.)(density)(height at entry) (gravity). Volume flow= 150 m³/s [<http://it.wikipedia.org/wiki/Tevere>]= $4.73\text{E}+09$ m³/yr. Density water= $1.00\text{E}+03$ kg/m³. Height at entry= 30 m (Our estimate). Gravity= 9.81 m/s². Total geopotential energy received (relative to sea level)= $1.39\text{E}+15$ J/yr.
- 5 Wave Energy delivered on shore:** Wave energy = (Parallel component of shore length)(Front Wave Energy)(time in s/yr). Coast Length= $4.46\text{E}+04$ m [<http://www.osservatoriomare.lazio.it/>]. Component of

- length parallel to front wave= 25394 m (Our estimate). Front wave energy= 2.20×10^4 w/m [Couper, 1990]. Time = 3.15×10^7 s/yr. Total wave energy delivered= 1.76×10^{16} J/yr.
- 6 Tidal Energy (half of tidal energy is supposed to be absorbed at the shelf):** Tidal Energy = (shelf)(0.5)(tides/yr)(mean tidal range)²(density of seawater)(gravity). Coast Length of Italy (Including Islands)= 7.38×10^6 m [ISTAT, 2003]. Continental Shelf Area of Italy= 1.44×10^{11} m² [WRI, 1990]. Continental Shelf Area of Rome= 8.70×10^8 m² (Proportional calculation on Italy data base). Avg. Tide Range= 0.30 m [IIM, 1992]. Density= 1.03×10^3 kg/m³ [Couper, 1990]. Tides/year= 7.30×10^2 (2 tides/day in 365 days). Total tidal energy= 2.87×10^{14} J/yr.
- 7 Loss of Topsoil** (areas with mature untouched vegetation are assumed to have little net gain or loss of topsoil): Energy of net loss= (net loss)(% org.in soil)(5.0 Kcal/g)(4186 J/kcal). Farmed area subject to erosion= 4.10×10^8 m² [<http://www.urbanistica.comune.roma.it/attachment/516171D1.pdf>]. Erosion rate of farmed area= 1.50×10^3 g/m²/yr. Fraction of organic matter in soil= 3.00% [Odum, 1996]. Energy cont. per g organic= 5.00 kcal/g [Odum, 1996]. Net loss= (farmed area)(erosion rate)= 6.15×10^{11} g/yr. Total energy of net loss= 3.86×10^{14} J/yr (energy content of degraded organic matter in soil).
- 8 Gasoline (unleaded):** Gasoline used= 5.41×10^{-1} Mton/yr= 5.41×10^5 ton/yr= 5.41×10^{11} g/yr [Unione Petrolifera, 2004]. HHV= 44 MJ/kg= 44000 J/g. Total gasoline energy= 2.38×10^{16} J/yr. Gasoline unit price= 0.08 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. Gasoline density= 750 kg/m³= 750 g/L. Total gasoline cost= 6.06×10^7 €/yr.
- 9 Diesel:** Total diesel used= 1.42×10^{-1} Mton/yr= 1.42×10^5 ton/yr= 1.42×10^{11} g/yr. HHV= 43 MJ/kg= 4.30×10^4 J/g. Total diesel energy= 6.11×10^{15} J/yr [Unione Petrolifera, 2004]. Diesel unit price= 0.04 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. Diesel density= 832.5 kg/m³= 832.5 g/L. Total diesel cost= 6.66×10^6 €/yr.
- 10 LPG:** total LPG used= 9.52×10^{-2} Mton/yr= 9.52×10^4 ton/yr= 9.52×10^{10} g/yr. HHV= 19800 Btu/lb= 46376 J/g [Unione Petrolifera, 2004]. Total LPG energy= 4.42×10^{15} J/yr. LPG unit price= 0.10 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. LPG density= 505 kg/m³= 505 g/L. Total LPG cost= 1.92×10^7 €/yr.
- 11 Heavy Oil for domestic heating:** Total used= 5.41×10^{11} g/yr [Unione Petrolifera, 2004]. HHV of Heavy Oil= 4.26×10^4 J/g. Total Energy = 2.30×10^{16} J/yr. Unit price= 0.01 €/L [Unione Petrolifera, 2004]. Total cost for heavy oil= 9.12×10^6 €/yr.
- 12 Natural gas:** [Comune Roma, 1973]. Volumes used: Total nat. gas used= 3.03×10^8 m³/yr (of which, for domestic use= 9.66×10^7 m³/yr; used for building heating= 1.52×10^8 m³/yr; for other uses= 5.44×10^7 m³/yr). Density of nat. gas= 7.89×10^2 g/m³ Total mass of nat. gas used= 2.39×10^{11} g/yr (of which, for domestic use= 7.62×10^{10} g/yr; for building heating= 1.20×10^{11} g/yr; for other uses= 4.29×10^{10} g/yr). Conversion to energy units: HHV= 2.13×10^4 Btu/lb= 4.99×10^4 J/g. Total energy in nat. gas= 1.19×10^{16} J/yr (of which, for domestic use= 3.80×10^{15} J/yr; for building heating= 6.00×10^{15} J/yr; for other uses= 2.14×10^{15} J/yr). Unit price of natural gas= 5.68×10^{-2} €/m³. Total cost of natural gas= 1.72×10^7 €/yr [CCIAA Roma, 1972] (of which, for domestic use= 5.49×10^6 €/yr; for building heating= 8.65×10^6 €/yr; for other costs= 3.09×10^6 €/yr).
- 13 Electricity.** Total used= 4.44×10^3 GWh/yr = 4.44×10^6 MWh/yr= 4.44×10^9 kWh/yr= 1.60×10^{16} J/yr [ISTAT, 1974a]. Unit price= 5.98×10^{-3} €/kWh. Total electricity cost= 2.65×10^7 €/yr [CCIAA Roma, 1972].
- 14 Water.** Total water used= 3.00×10^8 m³ [Comune Roma, 2004b]. Water density= 1.00×10^3 kg/L= 1.00×10^3 kg/m³= 1.00×10^6 g/m³. Mass of water used= 3.00×10^{14} g/yr. Unit price= 5.35×10^{-2} €/m³. Total water cost= 1.61×10^7 €/yr [CCIAA Roma, 1972].
- 15 Main Food Items.**
- 15a Fish. Total fish used= 9.81×10^9 g/yr [Comune Roma, 1973]. Total cost= 8.76×10^6 €/yr [CCIAA Roma, 1972].
- 15b Meat. Total meat used= 6.66×10^{10} g/yr [Comune Roma, 1973]. Total cost= 8.45×10^7 €/yr [CCIAA Roma, 1972].
- 15c Fruits and Vegetables. Total fruits and vegetables used= 3.36×10^{11} g/yr [Comune Roma, 1973]. Total cost= 5.20×10^7 €/yr [CCIAA Roma, 1972].
- 15d Milk, cheese and other dairy products. Total milk, cheese and other dairy products used= 2.39×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974b]. Total cost= 4.94×10^7 €/yr [ISTAT, 1974b].
- 15e Cereals and derivatives. Total cereals and derivatives used= 5.28×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974b]. Total cost= 5.25×10^7 €/yr [ISTAT, 1974b].
- 15f Wine and alcoholics. Total wine and alcoholics used= 3.46×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974b]. Total cost= 5.16×10^7 €/yr [ISTAT, 1974a].
- 15g Olive and seed oils. Total oils and seed oils used= 6.09×10^{10} g/yr [ISTAT, 1974b]. Total cost= 3.27×10^7 €/yr [ISTAT, 1974b].
- 16 Steel and Iron.** Total used= 2.43×10^{12} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 1.18×10^8 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 17 Copper.** Total used= 2.28×10^{10} g/yr [Ammi, 1972]. Total cost= 8.55×10^6 €/yr [Ammi, 1972]

- 18 Aluminium.** Total used= 2.36×10^{10} g/yr [Ammi, 1972]. Total cost= 4.71×10^6 €/yr [Ammi, 1972]
- 19 Cement (Portland).** Total used= 3.41×10^{12} g/yr. [ISTAT, 1974a]. Total cost= 7.54×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 20 Rocks and Sediments for Building Sector.** Total used= 1.01×10^{13} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 7.43×10^5 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 21 Glass.** Total used= 1.08×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 5.16×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 22 Plastics.** Total used= 9.66×10^{10} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 1.35×10^7 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 23 Asphalt.** Total used= 1.80×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 1.72×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 24 Chemicals.** Total used= 2.47×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 3.03×10^7 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 25 Wood.** Total used= 2.56×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 7.54×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 26 Textiles.** Total used= 5.52×10^9 g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 6.47×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 27 Paper and Derivatives.** Total used= 1.97×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 1.42×10^7 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 28 Fertilizers.** Total used= 1.37×10^{11} g/yr [ISTAT, 1974a]. Total cost= 2.04×10^6 €/yr [ISTAT, 1974a]
- 29 Imported Labor (Commuters).** Daily commuters from nearby villages and countryside deliver work in support to city dynamics and economy. This work is at least partially supported by additional energy flows outside the city. Number of workers= 2.81×10^5 people/yr (our estimate based on the conservative assumption that daily commuters are about 10% of total Rome's population)
- 30 Services.** Services is a measure of indirect labor performed outside of the system in order to make and deliver imported goods and commodities. Services are expressed in money terms (€, \$...) and calculated as the total cost of imports. Services are converted into energy (seJ) by multiplying by the energy to money ratio (seJ/€) of the country in the year under investigation. Total value of services= 7.08×10^8 €/yr [Sum of costs of Items from 8 to 28]
- 31 Financing.** Governmental money for salaries= 1.87×10^8 €/yr [ISTAT, 2006]. Governmental funding for public services= 4.50×10^7 €/yr [ISTAT, 2006]. Total money from Government= 2.32×10^8 €/yr.
- 32 Tourism.** Number of tourists= 7.77×10^6 units/yr [ISTAT, 1973]. Permanence days (average) per person= 2.69 days [Comune Roma, 2004b]. Daily expenses per person (average)= 8.28 \$/day [ISTAT, 1973]. Total money from tourists= 1.73×10^8 \$/yr.

Output: Population supported for one year (people* yr⁻¹) and yearly GDP assumed as products of city dynamics in the investigated year 1972.

Population of Rome= 2813011 Units/yr [Comune Roma, 1973].

GDP of Rome= 2.03×10^9 €/yr [CCIAA Roma, 1972].

Year: 1982

Area of Rome: 150760.54 ha = 1.51×10^9 m² [Comune Roma, 1983].

- 1 Solar radiation:** Solar energy received = (avg. insolation)(1-albedo)(area)(365 day/yr)(4186 J/kcal). Insolation (average)= 1737.4 kWh/m²/yr [ISTAT, 2002]= 6.25×10^9 J/m²/yr. Albedo = 0.2. Urban area = 1.29×10^9 m². Total solar energy received= 6.43×10^{18} J/yr.
- 2 Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface):** Wind energy = (density)(drag coeff.)(geostrophic wind velocity)³(area)(sec/year). Air density = 1.3 kg/m³. Wind speed = 2.175 m/s [Comune Roma, 2004a]. Geostrophic wind = 5.2 m/s. Drag coefficient= 3.00×10^{-3} . Area = 29×10^9 m²; sec/year = 3.15×10^7 s/yr. Total wind energy = 2.22×10^{16} J/yr.
- 3 Evapotranspiration (Chemical Potential Energy):** Evapotranspiration energy: (land used)(Evapotranspiration rate)(density)(Gibbs Free Energy per gram).
A) Land covered by forest = 9726 ha; land used for wood farm = 112.8 ha; Land used for fruit production = 1798.1 ha. Total area covered by trees = 11636.9 ha = 1.16×10^8 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.559 m/yr [calculated after Ulgiati et al., 1994]. Density water= 1.00×10^6 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water= 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.)= 3.08×10^{14} J/yr.

- B) Land covered by pasture = 5227.9 ha = 5.23E+07 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.728 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = 1.00E+06 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = 1.81E+14 J/yr.
- C) Land covered by crops = 30016.2 ha = 3.00E+08 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.694 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = 1.00E+06 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = 1.48E+15 J/yr.
- 4 River geopotential energy:** Geopotential energy received (relative to sea level) = (flow vol.)(density)(height at entry) (gravity). Volume flow = 150 m³/s [<http://it.wikipedia.org/wiki/Tevere>] = 4.73E+09 m³/yr. Density water = 1.00E+03 kg/m³. Height at entry = 30 m (Our estimate). Gravity = 9.81 m/s². Total geopotential energy received (relative to sea level) = 1.39E+15 J/yr.
- 5 Wave Energy delivered on shore:** Wave energy = (Parallel component of shore length)(Front Wave Energy)(time in s/yr). Coast Length = 4.46E+04 m [<http://www.osservatoriomare.lazio.it/>]. Component of length parallel to front wave = 25394 m (Our estimate). Front wave energy = 2.20E+04 w/m [Couper, 1990]. Time = 3.15E+07 s/yr. Total wave energy delivered = 1.76E+16 J/yr.
- 6 Tidal Energy (half of tidal energy is supposed to be absorbed at the shelf):** Tidal Energy = (shelf)(0.5)(tides/yr)(mean tidal range)²(density of seawater)(gravity). Coast Length of Italy (Including Islands) = 7.38E+06 m [ISTAT, 2003]. Continental Shelf Area of Italy = 1.44E+11 m² [WRI, 1990]. Continental Shelf Area of Rome = 8.70E+08 m² (Proportional calculation on Italy data base). Avg. Tide Range = 0.30 m [IIM, 1992]. Density = 1.03E+03 kg/m³ [Couper, 1990]. Tides/year = 7.30E+02 (2 tides/day in 365 days). Total tidal energy = 2.87E+14 J/yr.
- 7 Loss of Topsoil** (areas with mature untouched vegetation are assumed to have little net gain or loss of topsoil): Energy of net loss = (net loss)(% org.in soil)(5.0 Kcal/g)(4186 J/kcal). Farmed area subject to erosion = 4.10E+08 m² [<http://www.urbanistica.comune.roma.it/attachment/516171D1.pdf>]. Erosion rate of farmed area = 1.50E+03 g/m²/yr. Fraction of organic matter in soil = 3.00% [Odum, 1996]. Energy cont. per g organic = 5.00 kcal/g [Odum, 1996]. Net loss = (farmed area)(erosion rate) = 6.15E+11 g/yr. Total energy of net loss = 3.86E+14 J/yr (energy content of degraded organic matter in soil).
- 8 Gasoline (unleaded):** Gasoline used = 6.04E-01 Mton/yr = 6.04E+05 ton/yr = 6.04E+11 g/yr [Unione Petroliera, 2004]. HHV = 44 MJ/kg = 44000 J/g. Total gasoline energy = 2.66E+16 J/yr. Gasoline unit price = 0.54 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Gasoline density = 750 kg/m³ = 750 g/L. Total gasoline cost = 4.36E+08 €/yr.
- 9 Diesel:** Total diesel used = 6.37E-01 Mton/yr = 6.37E+05 ton/yr = 6.37E+11 g/yr. HHV = 43 MJ/kg = 4.30E+04 J/g. Total diesel energy = 2.74E+16 J/yr [Unione Petroliera, 2004]. Diesel unit price = 0.26 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Diesel density = 832.5 kg/m³ = 832.5 g/L. Total diesel cost = 1.99E+08 €/yr.
- 10 LPG:** total LPG used = 1.12E-01 Mton/yr = 1.12E+04 ton/yr = 1.12E+10 g/yr. HHV = 19800 Btu/lb = 46376 J/g [Unione Petroliera, 2004]. Total LPG energy = 5.21E+15 J/yr. LPG unit price = 0.41 €/L [Unione Petroliera, 2004]. LPG density = 505 kg/m³ = 505 g/L. Total LPG cost = 9.01E+07 €/yr.
- 11 Heavy Oil for domestic heating:** Total used = 5.07E+11 g/yr [Unione Petroliera, 2004]. HHV of Heavy Oil = 4.26E+04 J/g. Total Energy = 2.16E+16 J/yr. Unit price = 0.25 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Total cost for heavy oil = 1.54E+08 €/yr.
- 12 Natural gas:** [Comune Roma, 1983]. Volumes used: Total nat. gas used = 2.22E+08 m³/yr (of which, for domestic use = 7.06E+07 m³/yr; used for building heating = 1.11E+08 m³/yr; for other uses = 3.98E+07 m³/yr). Density of nat. gas = 7.89E+02 g/m³. Total mass of nat. gas used = 1.75E+11 g/yr (of which, for domestic use = 5.57E+10 g/yr; for building heating = 8.78E+10 g/yr; for other uses = 3.14E+10 g/yr). Conversion to energy units: HHV = 2.13E+04 Btu/lb = 4.99E+04 J/g. Total energy in nat. gas = 8.73E+15 J/yr (of which, for domestic use = 2.78E+15 J/yr; for building heating = 4.38E+15 J/yr; for other uses = 1.57E+15 J/yr). Unit price of natural gas = 5.10E-01 €/m³. Total cost of natural gas = 1.13E+08 €/yr [CCIAA Roma, 1984] (of which, for domestic use = 3.60E+07 €/yr; for building heating = 5.68E+07 €/yr; for other costs = 2.03E+07 €/yr).
- 13 Electricity.** Total used = 5.31E+03 GWh/yr = 5.31E+06 MWh/yr = 5.31E+09 kWh/yr = 1.91E+16 J/yr [Comune Roma, 1983]. Unit price = 3.28E-02 €/kWh. Total electricity cost = 1.74E+08 €/yr [CCIAA Roma, 1984].
- 14 Water.** Total water used = 3.02E+08 m³ [Comune Roma, 2004b]. Water density = 1.00E+00 kg/L = 1.00E+03 kg/m³ = 1.00E+06 g/m³. Mass of water used = 3.02E+14 g/yr. Unit price = 3.50E-01 €/m³. Total water cost = 1.05E+08 €/yr [CCIAA Roma, 1984].
- 15 Main Food Items.**
- 15a Fish. Total fish used = 1.63E+10 g/yr [Comune Roma, 1983]. Total cost = 8.72E+07 €/yr [ISTAT, 1984].
- 15b Meat. Total meat used = 9.71E+10 g/yr [Comune Roma, 1983]. Total cost = 7.50E+08 €/yr [ISTAT, 1984].

- 15c Fruits and Vegetables. Total fruits and vegetables used= $4.88\text{E}+11$ g/yr [Comune Roma, 1983]. Total cost= $3.20\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1984].
- 15d Milk, cheese and other dairy products. Total milk, cheese and other dairy products used= $2.89\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1984]. Total cost= $3.16\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1984].
- 15e Cereals and derivatives. Total cereals and derivatives used= $5.02\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1984]. Total cost= $2.83\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1984].
- 15f Wine and alcoholics. Total wine and alcoholics used= $3.71\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1984]. Total cost= $3.38\text{E}+08$ €/yr [Comune Roma, 1983].
- 15g Olive and seed oils. Total oils and seed oils used= $6.11\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1984]. Total cost= $1.58\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1984].
- 16 Steel and Iron.** Total used= $2.76\text{E}+12$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $8.38\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 17 Copper.** Total used= $1.70\text{E}+10$ g/yr [Samim, 1982]. Total cost= $2.05\text{E}+07$ €/yr [Samim, 1982]
- 18 Aluminium.** Total used= $3.54\text{E}+10$ g/yr [Samim, 1982]. Total cost= $3.29\text{E}+07$ €/yr [Samim, 1982]
- 19 Cement (Portland).** Total used= $2.27\text{E}+12$ g/yr. [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.14\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 20 Rocks and Sediments for Building Sector.** Total used= $6.45\text{E}+12$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $2.25\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 21 Glass.** Total used= $1.50\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.02\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 22 Plastics.** Total used= $1.49\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.18\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 23 Asphalt.** Total used= $1.72\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $3.09\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 24 Chemicals.** Total used= $7.51\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $6.51\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 25 Wood.** Total used= $2.90\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.44\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 26 Textiles.** Total used= $1.82\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.08\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986]
- 27 Paper and Derivatives.** Total used= $2.56\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.12\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1986].
- 28 Fertilizers.** Total used= $1.38\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1986]. Total cost= $1.43\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1986].
- 29 Imported Labor (Commuters).** Daily commuters from nearby villages and countryside deliver work in support to city dynamics and economy. This work is at least partially supported by additional energy flows outside the city. Number of workers= $2.82\text{E}+05$ people/yr (our estimate based on the conservative assumption that daily commuters are about 10% of total Rome's population)
- 30 Services.** Services is a measure of indirect labor performed outside of the system in order to make and deliver imported goods and commodities. Services are expressed in money terms (€, \$...) and calculated as the total cost of imports. Services are converted into energy (seJ) by multiplying by the energy to money ratio (seJ/€) of the country in the year under investigation. Total value of services= $5.72\text{E}+09$ €/yr [Sum of costs of Items from 8 to 28]
- 31 Financing.** Governmental money for salaries= $1.36\text{E}+09$ €/yr [ISTAT, 2006]. Governmental funding for public services= $3.77\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 2006]. Total money from Government= $1.74\text{E}+09$ €/yr.
- 32 Tourism.** Number of tourists= $1.06\text{E}+07$ units/yr [ISTAT, 1983]. Permanence days (average) per person= 2.69 days [Comune Roma, 2004b]. Daily expenses per person (average)= 39.96 \$/day [ISTAT, 1983]. Total money from tourists= $1.14\text{E}+09$ \$/yr.

Output: Population supported for one year (people* yr⁻¹) and yearly GDP assumed as products of city dynamics in the investigated year 1982.

Population of Rome= 2824382 Units/yr [Comune Roma, 1983].

GDP of Rome= $1.33\text{E}+10$ €/yr [CCIAA Roma, 1984].

Year: 1992

Area of Rome: 128530.6 ha = $1.29\text{E}+09$ m² [Comune Roma, 1993].

- 1 Solar radiation:** Solar energy received = (avg. insolation)(1-albedo)(area)(365 day/yr)(4186 J/kcal). Insolation (average)= 1737.4 kWh/m²/yr [ISTAT, 2002]= $6.25\text{E}+09$ J/m²/yr. Albedo = 0.2. Urban area = $1.29\text{E}+09$ m². Total solar energy received= $6.43\text{E}+18$ J/yr.

- 2 Wind (Kinetic Energy of Wind Used at the Surface):** Wind energy = (density)(drag coeff.)(geostrophic wind velocity)³(area)(sec/year). Air density = 1.3 kg/m³. Wind speed = 2.175 m/s [Comune Roma, 2004a]. Geostrophic wind = 5.2 m/s. Drag coefficient = 3.00E-03. Area = 29E+09 m²; sec/year = 3.15E+07 s/yr. Total wind energy = 2.22E+16 J/yr.
- 3 Evapotranspiration (Chemical Potential Energy):** Evapotranspiration energy: (land used)(Evapotranspiration rate)(density)(Gibbs Free Energy per gram).
- A) Land covered by forest = 9726 ha; land used for wood farm = 112.8 ha; Land used for fruit production = 1798.1 ha. Total area covered by trees = 11636.9 ha = 1.16E+08 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.559 m/yr [calculated after Ulgiati et al., 1994]. Density water = 1.00E+06 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = 3.08E+14 J/yr.
- B) Land covered by pasture = 5227.9 ha = 5.23E+07 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.728 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = 1.00E+06 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = 1.81E+14 J/yr.
- C) Land covered by crops = 30016.2 ha = 3.00E+08 m² [Comune Roma, 2003a]. Transpired water = 0.694 m/yr [calculated after Odum et al., 1998]. Density water = 1.00E+06 g/m³. Gibbs Energy of rain water relative to sea water = 4.74 J/g. Total evapotranspiration energy (Chem. Pot. En.) = 1.48E+15 J/yr.
- 4 River geopotential energy:** Geopotential energy received (relative to sea level) = (flow vol.)(density)(height at entry) (gravity). Volume flow = 150 m³/s [<http://it.wikipedia.org/wiki/Tevere>] = 4.73E+09 m³/yr. Density water = 1.00E+03 kg/m³. Height at entry = 30 m (Our estimate). Gravity = 9.81 m/s². Total geopotential energy received (relative to sea level) = 1.39E+15 J/yr.
- 5 Wave Energy delivered on shore:** Wave energy = (Parallel component of shore length)(Front Wave Energy)(time in s/yr). Coast Length = 4.46E+04 m [<http://www.osservatoriomare.lazio.it/>]. Component of length parallel to front wave = 25394 m (Our estimate). Front wave energy = 2.20E+04 w/m [Couper, 1990]. Time = 3.15E+07 s/yr. Total wave energy delivered = 1.76E+16 J/yr.
- 6 Tidal Energy (half of tidal energy is supposed to be absorbed at the shelf):** Tidal Energy = (shelf)(0.5)(tides/yr)(mean tidal range)²(density of seawater)(gravity). Coast Length of Italy (Including Islands) = 7.38E+06 m [ISTAT, 2003]. Continental Shelf Area of Italy = 1.44E+11 m² [WRI, 1990]. Continental Shelf Area of Rome = 8.70E+08 m² (Proportional calculation on Italy data base). Avg. Tide Range = 0.30 m [IIM, 1992]. Density = 1.03E+03 kg/m³ [Couper, 1990]. Tides/year = 7.30E+02 (2 tides/day in 365 days). Total tidal energy = 2.87E+14 J/yr.
- 7 Loss of Topsoil** (areas with mature untouched vegetation are assumed to have little net gain or loss of topsoil): Energy of net loss = (net loss)(% org.in soil)(5.0 Kcal/g)(4186 J/kcal). Farmed area subject to erosion = 4.10E+08 m² [<http://www.urbanistica.comune.roma.it/attachment/516171D1.pdf>]. Erosion rate of farmed area = 1.50E+03 g/m²/yr. Fraction of organic matter in soil = 3.00% [Odum, 1996]. Energy cont. per g organic = 5.00 kcal/g [Odum, 1996]. Net loss = (farmed area)(erosion rate) = 6.15E+11 g/yr. Total energy of net loss = 3.86E+14 J/yr (energy content of degraded organic matter in soil).
- 8 Gasoline (unleaded):** Gasoline used = 7.63E-01 Mton/yr = 7.63E+05 ton/yr = 7.63E+11 g/yr [Unione Petroliera, 2004]. HHV = 44 MJ/kg = 44000 J/g. Total gasoline energy = 3.36E+16 J/yr. Gasoline unit price = 0,78 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Gasoline density = 750 kg/m³ = 750 g/L. Total gasoline cost = 7.96E+08 €/yr.
- 9 Diesel:** Total diesel used = 8.84E-01 Mton/yr = 8.84E+05 ton/yr = 8.84E+11 g/yr. HHV = 43 MJ/kg = 4.30E+04 J/g. Total diesel energy = 3.80E+16 J/yr [Unione Petroliera, 2004]. Diesel unit price = 0.58 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Diesel density = 832.5 kg/m³ = 832.5 g/L. Total diesel cost = 6.16E+08 €/yr.
- 10 LPG:** total LPG used = 1.56E-01 Mton/yr = 1.56E+04 ton/yr = 1.56E+10 g/yr. HHV = 19800 Btu/lb = 46376 J/g [Unione Petroliera, 2004]. Total LPG energy = 7.24E+15 J/yr. LPG unit price = 0.39 €/L [Unione Petroliera, 2004]. LPG density = 505 kg/m³ = 505 g/L. Total LPG cost = 1.20E+08 €/yr.
- 11 Heavy Oil for domestic heating:** Total used = 2,65E+11 g/yr [Unione Petroliera, 2004]. HHV of Heavy Oil = 4.26E+04 J/g. Total Energy = 1.13E+16 J/yr. Unit price = 0.59 €/L [Unione Petroliera, 2004]. Total cost for heavy oil = 1.87E+08 €/yr.
- 12 Natural gas:** [Comune Roma, 1993]. Volumes used: Total nat. gas used = 1.02E+09 m³/yr (of which, for domestic use = 9.99E+07 m³/yr; used for building heating = 5.23E+08 m³/yr; for other uses = 3.95E+08 m³/yr). Density of nat. gas = 7.89E+02 g/m³. Total mass of nat. gas used = 8.03E+11 g/yr (of which, for domestic use = 7.88E+10 g/yr; for building heating = 4.13E+11 g/yr; for other uses = 3.12E+11 g/yr). Conversion to energy units: HHV = 2.13E+04 Btu/lb = 4.99E+04 J/g. Total energy in nat. gas = 4.01E+16 J/yr (of which, for domestic use = 3.93E+15 J/yr; for building heating = 2.06E+16 J/yr; for other uses = 1.55E+16 J/yr). Unit price of natural gas = 3.83E-01 €/m³. Total cost of natural gas = 3.90E+08 €/yr [CCIAA Roma, 1994] (of which, for domestic use = 3.83E+07 €/yr; for building heating = 2.01E+08 €/yr; for other costs = 1.51E+08 €/yr).

- 13 Electricity.** Total used= $7.68\text{E}+03$ GWh/yr = $7.68\text{E}+06$ MWh/yr= $7.68\text{E}+09$ kWh/yr= $2.77\text{E}+16$ J/yr [Comune Roma, 1993]. Unit price= $7.81\text{E}-02$ €/kWh. Total electricity cost= $6.00\text{E}+08$ €/yr [CCIAA Roma, 1994].
- 14 Water.** Total water used= $2.91\text{E}+08$ m³ [Comune Roma, 2004b]. Water density= $1.00\text{E}+00$ kg/L= $1.00\text{E}+03$ kg/m³= $1.00\text{E}+06$ g/m³. Mass of water used= $2.91\text{E}+14$ g/yr. Unit price= 1.25 €/m³. Total water cost= $3.64\text{E}+08$ €/yr [CCIAA Roma, 1994].
- 15 Main Food Items.**
- 15a Fish. Total fish used= $1.39\text{E}+10$ g/yr [Comune Roma, 1993]. Total cost= $3.13\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1992a].
- 15b Meat. Total meat used= $4.99\text{E}+10$ g/yr [Comune Roma, 1993]. Total cost= $9.89\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1992a].
- 15c Fruits and Vegetables. Total fruits and vegetables used= $2.10\text{E}+11$ g/yr [Comune Roma, 1993]. Total cost= $1.07\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a].
- 15d Milk, cheese and other dairy products. Total milk, cheese and other dairy products used= $1.65\text{E}+11$ g/yr [Comune Roma, 1993]. Total cost= $3.02\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a].
- 15e Cereals and derivatives. Total cereals and derivatives used= $6.40\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.53\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b].
- 15f Wine and alcoholics. Total wine and alcoholics used= $6.23\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $5.14\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1992a,b].
- 15g Olive and seed oils. Total oils and seed oils used= $8.39\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $7.38\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1992a,b].
- 16 Steel and Iron.** Total used= $3.24\text{E}+12$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $8.98\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 17 Copper.** Total used= $2.40\text{E}+10$ g/yr [Enirisorse, 1992]. Total cost= $4.12\text{E}+07$ €/yr [Enirisorse, 1992]
- 18 Aluminium.** Total used= $5.70\text{E}+10$ g/yr [Enirisorse, 1992]. Total cost= $5.66\text{E}+07$ €/yr [Enirisorse, 1992]
- 19 Cement (Portland).** Total used= $2.48\text{E}+12$ g/yr. [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.28\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 20 Rocks and Sediments for Building Sector.** Total used= $1.15\text{E}+13$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.13\text{E}+09$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 21 Glass.** Total used= $1.81\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.53\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 22 Plastics.** Total used= $2.71\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $2.14\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 23 Asphalt.** Total used= $1.11\text{E}+11$ g/yr [Unione Petrolifera, 2004]. Total cost= $3.11\text{E}+07$ €/yr [Unione Petrolifera, 2004]
- 24 Chemicals.** Total used= $1.03\text{E}+12$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.09\text{E}+09$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 25 Wood.** Total used= $4.85\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $3.44\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 26 Textiles.** Total used= $1.45\text{E}+10$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.40\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b]
- 27 Paper and Derivatives.** Total used= $3.43\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $2.32\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 1992a,b].
- 28 Fertilizers.** Total used= $2.63\text{E}+11$ g/yr [ISTAT, 1992a,b]. Total cost= $1.93\text{E}+07$ €/yr [ISTAT, 1992a,b].
- 29 Imported Labor (Commuters).** Daily commuters from nearby villages and countryside deliver work in support to city dynamics and economy. This work is at least partially supported by additional emergy flows outside the city. Number of workers= $2.72\text{E}+05$ people/yr (our estimate based on the conservative assumption that daily commuters are about 10% of total Rome's population)
- 30 Services.** Services is a misure of indirect labor performed outside of the sistem in order to make and deliver imported goods and commodities. Services are expressed in money terms (€, \$...) and calculated as the total cost of imports. Services are converted into emergy (seJ) by multiplying by the emergy to money ratio (seJ/€) of the country in the year under investigation. Total value of services= $8.37\text{E}+09$ €/yr [Sum of costs of Items from 8 to 28]
- 31 Financing.** Governmental money for salaries= $3.98\text{E}+09$ €/yr [ISTAT, 2006]. Governmental funding for public services= $8.43\text{E}+08$ €/yr [ISTAT, 2006]. Total money from Government= $4.83\text{E}+09$ €/yr.
- 32 Tourism.** Number of tourists= $1.14\text{E}+07$ units/yr [ISTAT, 1992c]. Permanence days (average) per person= 2.69 days [Comune Roma, 2004b]. Daily expenses per person (average)= 128.16 \$/day [ISTAT, 1992c]. Total money from tourists= $3.92\text{E}+09$ \$/yr.

Output: Population supported for one year (people* yr⁻¹) and yearly GDP assumed as products of city dynamics in the investigated year 1992.

Population of Rome= 2723327 Units/yr [Comune Roma, 1993].

GDP of Rome= $4.59\text{E}+10$ €/yr [CCIAA Roma, 1994].