



IT0200058

ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

ISSN / 1124 / 7932

Serie Energia

**SCENARI GLOBALI DI EMISSIONE
A LUNGO TERMINE DELLA CO₂
PER UNA SIMULAZIONE PIÙ COMPLETA
DELL'EFFETTO SERRA**

Raffronto con le simulazioni
del "Third Assessment Report - IPCC"

MAURIZIO MICHELINI

ENEA - Divisione Sistemi Energetici per la Mobilità e l'Habitat
Centro Ricerche Casaccia, Roma

33/03

RT/ERG/2001/3



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

Serie Energia

**SCENARI GLOBALI DI EMISSIONE
A LUNGO TERMINE DELLA CO₂
PER UNA SIMULAZIONE PIÙ COMPLETA
DELL'EFFETTO SERRA**

**Raffronto con le simulazioni
del "Third Assessment Report - IPCC"**

MAURIZIO MICHELINI

ENEA - Divisione Sistemi Energetici per la Mobilità e l'Habitat
Centro Ricerche Casaccia, Roma

RT/ERG/2001/3

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Ente.

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily those of ENEA.

SCENARI GLOBALI DI EMISSIONE A LUNGO TERMINE DI CO2 PER UNA SIMULAZIONE PIU' COMPLETA DELL'EFFETTO SERRA

Riassunto

Nell'ambito della elaborazione di un modello puntuale per la simulazione del riscaldamento globale conseguente all'effetto serra, (rapporto tecnico RT/ERG/2000/1), viene ripresa la problematica degli scenari di emissione di CO2 per alcuni secoli al fine di poter studiare l'intera evoluzione del fenomeno. Per superare le difficoltà insite nelle previsioni riferite a un futuro tanto lontano, vengono indicate alcune metodologie.

Dal lato domanda i principali fattori di crescita dei consumi (cioè popolazione e sviluppo economico) vengono posti a confronto (*lato offerta*) con le modalità di diffusione delle singole fonti desunte dai dati storici e con le valutazioni tecnico-economico-ambientali relative alla diffusione delle nuove tecnologie e fonti energetiche. Le previsioni sulla consistenza della popolazione mondiale sono assunte dalle pubblicazioni UNFPA. Il grado di sviluppo economico mondiale nel lontano futuro è ottenuto attraverso la simulazione dell'evoluzione economica della popolazione mondiale suddivisa in quattro grandi aree geoeconomiche con differente consumo procapite.

Adottando questi criteri sono stati realizzati due differenti scenari, che vengono messi a confronto con gli scenari SRES descritti nel *Third Assessment Report-WG1* dell'IPCC, discutendo anche i motivi e le conseguenze del taglio di questi ultimi al 2100.

Alcune simulazioni del riscaldamento globale nel lungo periodo sono state eseguite nel succitato RT in relazione ai due scenari. I risultati sono discussi e messi a confronto con i corrispondenti risultati delle simulazioni riportate nell'*Assessment* dell'IPCC.

CO2 EMISSION SCENARIOS FOR NEXT CENTURIES TO OBTAIN MORE COMPLETE SIMULATIONS OF THE GLOBAL WARMING

Abstract

In the framework of a punctual Modeling of the Greenhouse Effect (report RT/ERG/2000/1) it is necessary to set CO2 Emission Scenarios for the next Centuries in order to obtain the complete Evolution of the Global Warming.

Some methodologies are described to approach such long term previsions.

From the demand side, the Growth of the consumes (which are affected by population and development) is correlated (supply side) with the technical-economic-environmental Evaluation of the future Diffusion of classic Sources (experienced in the past centuries) and of new Technologies and renewable Sources.

The previsions of the world population Growth are derived from the UNFPA publications.

The degree of economic Development of the world Population in the very long term is obtained by simulating the Evolution of the Population across four main Areas characterized by different pro-capita consumes. Using these criteria two different Scenarios have been set-up and put into comparison with the SRES Scenarios published in the Third Assessment Report-WG1 of the IPCC.

The cut at the year 2100 of the SRES Scenarios is also discussed.

Simulations of the Global Warming in the long term have been performed with the two scenarios. These results are discussed together with the results of the Simulations reported by IPCC.

Keywords: energy source history, emission scenarios, global warming, sustainable development

**PLEASE BE AWARE THAT
ALL OF THE MISSING PAGES IN THIS DOCUMENT
WERE ORIGINALLY BLANK**

Sommario

Premessa	pag. 7
1 -- Alcuni concetti chiave sulla evoluzione dell'effetto serra.	“ 9
2 - Lineamenti di scenari a lungo termine	“ 12
3 – Ripartizione in Aree di consumo energetico	“ 19
3.1 - Caratteristiche generali delle singole Aree	
3.2 - Dati economici ed energetici dei principali paesi nel mondo	
4 – Calcolo delle emissioni attuali di CO2 per Aree	“ 27
4.1 - Influenza dei consumi di legna sulle emissioni globali	
5 – Lo Sviluppo economico a lungo termine	“ 29
5.1 – Lo scenario energetico sostenibile	
6 – Scenari di emissione a lungo termine: “Tempestivo” e “Pesante”	“ 34
6.1 – Il potenziale di alterazione climatica	
7 – Risultati delle simulazioni dell'effetto serra	“ 39
7.1 - Confronto con i risultati delle previsioni IPCC	
7.2 - Simulazione di alcuni interventi di contrasto	
Riferimenti	“ 46

Premessa

Lo studio dell'evoluzione degli effetti di alterazione climatica prodotti dall'accrescersi delle concentrazioni dei gas serra, richiede innanzitutto la elaborazione di scenari globali di emissione *a lungo termine* della CO₂ dovuta alla combustione delle fonti fossili, che oggi determina circa 54% del radiation forcing prodotto da tutti i gas serra (compreso ozono troposferico).

Cosa si intende con scenari *a lungo termine*? Il picco delle emissioni di CO₂ si avrà probabilmente nel periodo 2070-2085. Tuttavia la crescita della *concentrazione* in atmosfera (da cui dipendono direttamente il riscaldamento globale e i danni alla biosfera) *continuerà* per un periodo *assai più lungo*, quantificato in circa tre secoli dalle prime simulazioni di lungo periodo.

Da questa rapida introduzione si comprende come gli usuali scenari energetici a breve termine (20-30 anni) rappresentano solo *la fase iniziale* degli scenari necessari per simulazioni complete dell'effetto serra intese a valutare l'entità del *picco* di concentrazione della CO₂ e del *picco* di riscaldamento globale.

Secondo la pratica corrente, nel *Summary for Policymakers*¹ elaborato dall'IPCC-WG1 sono mostrati, in relazione a determinati scenari di emissione, i valori della concentrazione di CO₂ e dell'aumento medio di temperatura globale calcolati fino *all'anno 2100*.

Una chiara spiegazione di questa limitazione non emerge dal testo, anche se la causa è quasi certamente legata a problemi di affidabilità delle simulazioni. Poiché i valori al 2100 sono considerevolmente *minori* dei valori attesi di *picco* (tutte le simulazioni indicano che la temperatura crescerà dopo il 2100), sorge il *dubbio* se la presentazione dei risultati fatta nel *Summary* sia la più adatta a indurre nei policymakers la *corretta percezione* del rischio.

Certamente sarebbe più opportuno che fossero presentati ai decisori i risultati di simulazioni eseguite *fino alla fase del picco* mediante i modelli e gli scenari più seri e affidabili.

D'altra parte esistono, dal punto di vista puramente scientifico, fondati motivi (già accennati) che riducono l'affidabilità dei grafici dopo il 2100.

Il dilemma si risolve ricordando che dal punto di vista generale legato al negoziato globale per Kyoto vi sono validissimi motivi che richiedono un atteggiamento meno "timido" da parte dell'IPCC nella pubblicazione dei risultati.

Su questa base di fatti, riteniamo necessario un esame allargato dei problemi scientifici *ancora aperti* che rendono difficoltosa una più completa previsione del fenomeno.

Secondo molti studiosi occorre oggi un passo avanti che permetta di rispondere *tempestivamente* all'interrogativo: "*quando finalmente si arriverà alla definizione di una strategia globale, saremo ancora in tempo a mettere in atto i relativi interventi?*"

Una risposta esplorativa è data dalle simulazioni descritte nel § 7, che mostrano la *grande lentezza* degli effetti sul clima prodotti dai grandi interventi globali.

Bisogna dunque distinguere tra l'aspetto *scientifico* dei problemi (che richiede tempo e cautela) e l'aspetto *decisionale* legato al negoziato di Kyoto, il quale richiede *prioritariamente* (salvo subire, come abbiamo visto, pesanti battute d'arresto) di conoscere e valutare il *livello massimo* del rischio. Soltanto così si può correttamente formare la strategia di risposta.

Altri dubbi sul fallimento del negoziato della COP-6 tenutasi a novembre all'Aia possono venire dal fatto che negli ultimi tempi sia stata sostenuta una strategia di *adattamento* dell'umanità agli effetti *previsti* (al 2100) del cambiamento climatico, evidentemente percepiti come *accettabili*.

Tale strategia, nata con troppo anticipo, ha destato stupore in un momento in cui gran parte degli studiosi ritiene **prioritario** definire opportuni **interventi di contrasto**, i quali, dovendo essere mantenuti molto a lungo, debbono essere attivati (e dunque **studiati**) per tempo.

Forse la inopinata strategia di adattamento non sarebbe venuta alla luce se le fonti più qualificate, come lo IPCC, avessero pubblicato (pur chiarendo doverosamente il livello di affidabilità delle simulazioni) le previsioni sul **picco** di temperatura, le quali tolgono **ogni illusione** sulla possibilità di potersi **adattare** alla evoluzione del cambiamento climatico.

La proposta di una Autorità mondiale responsabile dell'Ambiente, ripresa da F. Biermann su *Environment*² (Nov. 2000), appare opportuna in quanto consentirebbe, dal nostro particolare punto di vista, di sollevare l'organo scientifico (IPCC) dagli elementi di "autocensura" che gli esperti finiscono per introdurre (spinti da un travalicante senso di responsabilità scientifica) nella elaborazione degli "Assessment Report".

In questi documenti scientifici dovrebbero essere pubblicati **tutti** i dati e calcoli **utili** a una corretta valutazione del rischio, con il **solo** vincolo della razionalità scientifica.

In conclusione, la necessità di ottenere previsioni affidabili **sull'intera** fase crescente del cambiamento climatico induce a mettere a fuoco una serie di problemi aperti, di seguito richiamati.

1) Le difficoltà di previsione insite negli scenari di emissioni **a lungo termine** richiedono la messa a punto di una metodologia specifica. Come accennato, gli scenari "a breve" vengono elaborati sulla base di ipotesi di crescita economica **compatibili** con la fornitura di **accresciute** produzioni di combustibili convenzionali. Fare previsioni di questo tipo a lunga scadenza non ha senso a causa dell'evoluzione **autonoma** degli scenari energetici. Man mano che si avanza nel futuro gli scenari diventano infatti sempre più dipendenti da fattori **esterni** al mercato, quali l'esaurimento dei combustibili convenzionali, l'introduzione di nuove fonti e tecnologie di produzione, di trasformazione e di consumo dell'energia. Inoltre è necessario fare una previsione della futura normativa sulle emissioni imposta dalla inquinazione ambientale e dall'effetto serra (protocollo di Kyoto).

2) Difficoltà oggettive nella messa a punto degli scenari di emissione a lungo termine degli altri gas serra (CH₄, N₂O, HCFC, HFC, Ozono troposferico, Perfluorocarboni, SF₆).

3) Inadeguatezze tuttora presenti nei modelli del **ciclo del carbonio** (assorbimenti di CO₂ negli oceani ed emissioni nette dal biota terrestre).

4) Inadeguatezze nei modelli di **scambio termico e radiativo** che forniscono la temperatura media della superficie del pianeta. Vista la grande differenza rilevata nel trend di crescita della temperatura delle terre emerse¹ rispetto alla temperatura degli oceani, appare opportuno differenziare la temperatura media del pianeta nelle due componenti appena dette.

1 - Alcuni concetti chiave sulla evoluzione dell'effetto serra.

Alcune simulazioni preliminari del ciclo completo dell'effetto serra⁹ mostrano che il picco della concentrazione di CO₂ in atmosfera, come pure il picco del riscaldamento globale, si avrà tra *almeno 3 secoli*. La cosa non contrasta affatto con i dati ufficiali pubblicati dall'IPCC i quali mostrano, pur nella limitazione dei grafici al 2100, un andamento *molto simile* della concentrazione di CO₂ e del riscaldamento medio globale calcolati per gli scenari di emissione più simili a quelli esaminati nel Rif. 9.

La forte *dilazione* nel raggiungimento del picco di concentrazione di CO₂ (rispetto al picco di emissione) emersa dalle simulazioni preliminari (§ 7) potrebbe ingenerare malintesi, lasciando credere di avere più tempo a disposizione per gli interventi di contrasto.

In realtà la dilazione comporta un *aumento* del rischio, poiché quanto più *il picco si allontana*, tanto più *risulta elevato!* Questa caratteristica fisica del ciclo del carbonio si può spiegare ricordando che durante la fase di crescita della concentrazione in atmosfera si producono fenomeni di saturazione nei processi biologici e fisici che determinano l'assorbimento negli oceani.

Di conseguenza, come mostrano le simulazioni preliminari descritte in § 7, tanto più *elevate e prolungate* sono le emissioni, tanto più il *picco* della concentrazione risulta *elevato e ritardato*.

Quando vengono confrontati con i dati *sperimentali* della crescita della CO₂ in atmosfera, questi concetti generali consentono una comprensione quantitativa *semplice ed efficace* dei rischi del fenomeno.

Nel 1996 la concentrazione di CO₂ era pari a 362,5 ppm, corrispondente a 2820 Gt disperse in atmosfera. Gli studiosi ritengono che la massima concentrazione *accettabile* (da perseguire quindi mettendo in atto opportuni interventi di contrasto) sia dell'ordine di *550-560 ppm*, il doppio del valore preindustriale (Rif.11). La nuova condizione di vita non sarà tuttavia indolore poiché gli sconvolgimenti atmosferici, la desertificazione e le malattie tropicali dovremo tenerceli!

Un recente rapporto dell'UNEP (Nairobi, 5 febbraio 2001) afferma che l'aumento dei disastri atmosferici causati all'orizzonte 2050 dall'effetto serra potrebbe costare annualmente oltre 300 miliardi \$, mentre il costo annuale delle misure sanitarie aumenterà di 30 miliardi \$ negli USA e di 21.9 miliardi \$ nella UE. Ciò a fronte di un aumento della temperatura media pari solo a 1,0-1,5°C. Nel 1990 il costo assicurativo degli disastri atmosferici è stato pari a circa 40 miliardi \$.

Poiché al disopra della soglia indicata cominciano i danni *irreversibili* alla biosfera, l'umanità non può fare altro che predisporre i suoi programmi di sviluppo in modo che la quantità di CO₂ in atmosfera *non superi* questo livello, pari a circa **4300 Gt**.

La concentrazione di CO₂ è stata monitorata a partire dal 1958 da C.D.Keeling nella stazione di Mauna Loa (Hawai). Partendo da un valore di 315 ppm la concentrazione media annuale è cresciuta con l'andamento descritto in Fig.1, il quale, proiettato nel futuro mediante simulazioni, consente di prevedere il *superamento in corsa* dei 550 ppm tra *50-60* anni.

Se le emissioni continueranno con il trend odierno, la concentrazione continuerà infatti a salire *oltre 1000 ppm* prima di arrestarsi. *Da questi dati di fatto non si esce.*

L'uomo può e deve intervenire. Ma nessun grande intervento, anche se protratto per oltre 60 anni su scala globale potrà, se iniziato troppo tardi, limitare la concentrazione al livello desiderato. Avviciniamoci per gradi al problema di stabilire quanta CO₂ può ancora essere emessa *senza superare* la soglia dei 550 ppm.

Ipotizzando che non ci sia assorbimento da parte degli oceani, in atmosfera ci sarebbe ancora posto *soltanto* per $(4300-2820)=1480$ Gt di CO₂. In realtà dalle misure di Keeling si può inferire che l'assorbimento in oceano, pari al 48% circa delle emissioni nel decennio 1958-67, è cresciuto fino a raggiungere nel decennio 1987-96 il 52% circa delle emissioni. Sappiamo dunque che

l'assorbimento sta crescendo, ma non sappiamo con certezza che valore potrà avere tra un secolo, né se in seguito si manterrà pressoché costante oppure calerà.

Ecco perché sono molto importanti gli studi, non ancora giunti alla comprensione completa dei fenomeni, sulla modellistica relativa al ciclo del carbonio nella biosfera.

Pertanto alla domanda chiave “*quanta CO₂ si può ancora emettere facendo conto sull'assorbimento in oceano?*” si può rispondere soltanto con l'utilizzo di modelli.

Dall'esame delle simulazioni preliminari (Fig. 8 e 9) si può constatare che mediamente 63-67% della quantità di CO₂ che sarà emessa **da oggi al momento del picco**, verrà assorbita negli oceani e quindi solo circa 1/3 rimarrà in atmosfera andando ad aumentare la concentrazione.

Di conseguenza la massima quantità che ci è consentito di emettere senza danni *irreversibili* diventa pari a circa $1480 \times 3 = 4440$ Gt.

Questo ampliamento della capacità ricettiva della biosfera è importante, ma non decisivo.

La **emissione critica**, cioè la quantità di CO₂ emessa nel periodo che ci separa (circa tre secoli) dal picco della concentrazione, dipende ovviamente dal tipo di scenario.

Consideriamo inizialmente lo scenario con la curva di emissione **più bassa** tra i due qui esaminati (ved. § 6). Ebbene, anche in questo caso risulta una emissione **critica** di CO₂ pari a circa 9600 Gt! Per gli scenari attualmente **più accreditati** si arriva addirittura a emissioni critiche pari a 15-18 mila Gt di CO₂ (ved. § 6.1).

Dunque, anche assumendo che il mondo imboccherà uno scenario **a basse emissioni** (esempio: *scenario Tempestivo*, ved. § 6.1) per rientrare nel limite consentito bisogna prevedere di fare **interventi** in grado di ridurre la emissione **critica** almeno alla metà. Viceversa se sarà imboccato uno scenario oggi **accreditato** (esempio: *scenario UE* o scenari simili, ved. § 6.1) si dovrà ridurre la emissione critica di circa 4 volte!

Di certo, appare fin d'ora necessario preparare una **strategia di sequestro** della CO₂ per garantirsi la capacità di confinare in modo sicuro, al momento buono, una frazione **rilevante** della CO₂ globalmente prodotta. Per dare un'idea delle proporzioni e del costo di questa strategia mondiale basta ricordare che la quantità di CO₂ che sarà necessario confinare (in pozzi depleti di gas, acquiferi, ecc.) è pari a 500-600 volte la quantità oggi pompata negli USA in vecchi pozzi petroliferi per aumentare la frazione recuperabile di petrolio (programma *Enhanced Oil Recovery*, EOR). Oltre al problema delle grandi proporzioni, bisogna risolvere anche quello di far pagare equamente a tutti il **costo** dell'operazione di confinamento (che nel programma EOR avviene a costo zero grazie alla convenienza commerciale).

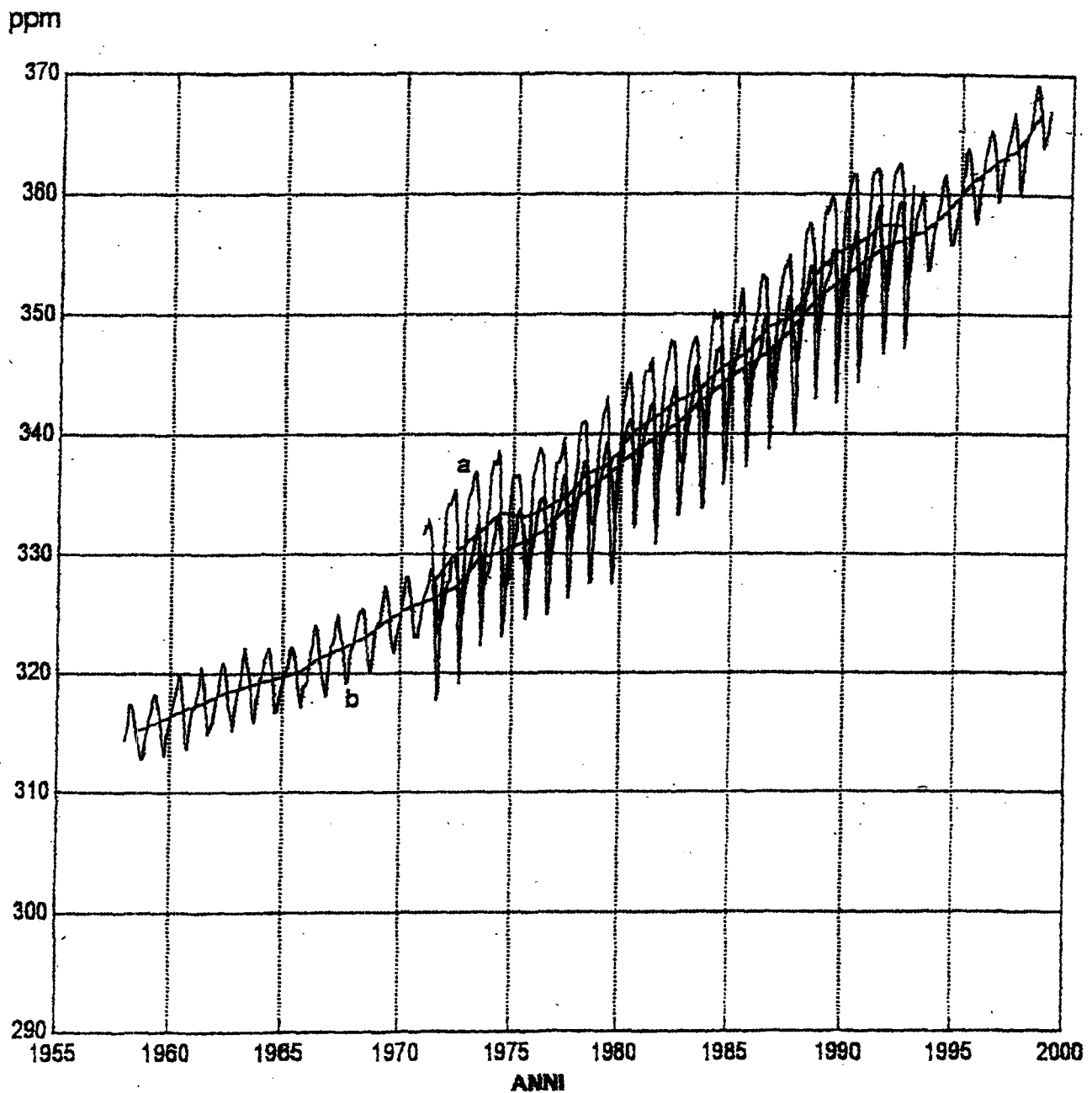


Fig. 1 – Misure delle concentrazione mensile di CO₂, con relativa media annuale, in diversi punti del globo.

- a) Rilevazioni eseguite dal 1972 al 1993 presso Barrow (Scozia).
- b) Rilevazioni eseguite dal 1958 al 1998 presso la stazione di Mauna Loa (Hawai) da C.D. Keeling.

2 - Lineamenti di scenari a lungo termine

Gli scenari energetici a lungo termine sono ottenuti (sul lato dell'*offerta*) rifacendosi all'esperienza storica accumulata in oltre due secoli di consumi energetici. Lo studio dei meccanismi che governano la continua sostituzione di una fonte all'altra fornisce gli elementi di base necessari alla previsione della futura diffusione delle *singole* fonti energetiche.

Quanto alla previsione dell'*ammontare* del consumo globale (lato della *domanda*), viene proposta nel § 6 una linea di studio basata sull'estrazione dall'esperienza accumulata di *serie storiche* di *consumi procapite* rappresentativi delle grandi Aree geoeconomiche mondiali.

Le *risorse convenzionali* di petrolio (composte dalle riserve *accertate*, più le quantità estraibili in futuro dai giacimenti noti con tecnologie più progredite, v. Tabella 4) basteranno, al ritmo *attuale* di estrazione, per 57 anni; quelle di gas naturale per 100 anni. Considerando che le quantità estratte aumenteranno notevolmente nei prossimi decenni, le risorse convenzionali risulteranno esaurite *ben prima* dei tempi suddetti.

In una strategia a lungo termine occorre dunque fare previsioni sull'utilizzo delle risorse *non-convenzionali* disponibili ovviamente a prezzi più elevati. Nel caso del petrolio, le riserve accertate (scisti, sabbie bituminose, greggi pesanti) sarebbero sufficienti, al ritmo attuale di estrazione, per 50 anni, mentre per il gas basterebbero 80 anni. Tuttavia, i negativi effetti ambientali gettano dubbi sulla effettiva importanza antropica delle risorse non-convenzionali di idrocarburi.

Scenari a lungo termine sull'utilizzo degli idrocarburi e del carbone sono elaborati solo a livello scientifico. La Shell si è spinta a fare previsioni³ fino al 2100, cosa non frequente per un'azienda che sta sul mercato.

Accanto a queste fonti classiche vi sono anche nuovi ritrovamenti come gli idrati di metano, una risorsa collocata in enormi quantità nei fondali oceanici, di cui finora non risulta alcuna previsione di utilizzo scevra da pericoli per il clima globale⁸, essendo il metano un potente gas-serra.

Per l'unica fonte classica con risorse di *lunga* durata, il *carbone*, si prevedono nuovi impieghi per la produzione di derivati liquidi, SNG e idrogeno attraverso noti processi chimici di trasformazione, che partiranno quando petrolio e gas non copriranno più interamente la richiesta.

In questo quadro di utilizzo delle fonti fossili occorre sicuramente una strategia di confinamento delle emissioni di CO₂ prodotta dai grandi impianti energetici. Senza una adeguata strategia sarebbe rischioso utilizzare le grandi riserve di carbone.

Altre ipotesi si possono fare sull'utilizzo futuro dell'energia *nucleare* le cui riserve di uranio sono sufficienti, sulla base dell'attuale parco di reattori LWR, per circa 54 anni se si limita l'estrazione di minerale alle sole rocce con più di 2000 ppm di uranio, mentre se si estraesse minerale fino a concentrazioni di 70 ppm la durata di questa fonte potrebbe allungarsi a circa 420 anni. Va però detto che in quest'ultimo caso sarebbe necessario movimentare una enorme quantità di minerale con problemi di costo e di impatto ambientale superiori a quelli collegati all'estrazione del carbone. Questi dati consentono di prevedere, nel secolo appena iniziato, un proseguimento della tendenza di crescita delle installazioni nucleari nelle zone di nuova industrializzazione. In alcuni paesi industrializzati si assiste invece alla tendenza opposta (ipotesi di *decommissioning*) a causa del fatto che su questi paesi ricade l'onere di dare avvio alla chiusura del ciclo del combustibile (*fuel reprocessing & disposal*). Tenendo conto delle diverse tendenze, sembra possibile che la tecnologia attuale riesca a mantenere, in relazione alla crescita economica del Terzo mondo, l'attuale percentuale di copertura del fabbisogno mondiale. Rilanci dell'energia nucleare debbono necessariamente passare attraverso nuove soluzioni tecniche intese a fornire, a costi accettabili, una sicurezza intrinseca contro gli incidenti nei reattori.

Le sorgenti di energia per le quali riesce più difficile elaborare previsioni per il futuro sono le cosiddette *nuove fonti rinnovabili*.

Per queste fonti non esiste ovviamente il problema della "durata delle riserve". Esiste piuttosto un problema iniziale di costi, sia economici, sia energetici.

E' noto che le fonti rinnovabili presentano costi di impianto più alti, a parità di costo di produzione, rispetto ad altre fonti, a compensazione del fatto che il "combustibile" rinnovabile (salvo le biomasse) ha costo zero ed è disponibile quasi ovunque.

Il raggiungimento della economicità è già avvenuto, in contesti favorevoli, per l'energia idroelettrica, geotermica, eolica e da biomasse. Finora non si è però tenuto conto *in modo completo* dei vantaggi che le fonti rinnovabili offrono sotto l'aspetto dell'assenza di emissioni inquinanti e climalteranti. Ciò dev'essere considerato in particolare durante la fase di sviluppo e dimostrazione della generazione elettrica con solare termodinamico, mentre l'economicità dell'energia fotovoltaica si profila a più lunga scadenza.

Più complessa è la questione dei *costi energetici*. Per realizzare un pannello solare, una turbina eolica o un pozzo geotermico, occorre spendere (a somiglianza delle altre fonti alternative) una certa quantità di energia fornita da combustibili fossili espressa dal *pay-back time*, periodo necessario affinché l'impianto restituisca una quantità di energia equivalente a quella incorporata.

La diffusione di qualsiasi fonte alternativa deve quindi fare i conti, inizialmente, con il consumo di quei combustibili fossili che è chiamata a sostituire.

Da qui una certa cautela nel valutare realisticamente la velocità di diffusione delle *nuove* fonti rinnovabili in questo straordinario periodo storico caratterizzato dalla necessità fisica di contenere i consumi delle fonti fossili.

Un buon metodo di valutazione può essere quello di fare un paragone ragionato con i tempi storici della diffusione di materie prime combustibili (idrocarburi e carbone) e di fonti ad alto costo di impianto (idroelettrico e nucleare). Essendo facilmente immagazzinabile e trasportabile, il petrolio ha avuto una rapidità di diffusione senza uguali. Tra le fonti rinnovabili la produzione di *biomasse* è quella che presenta modalità di uso più simili ai combustibili fossili, mentre le altre sono più vicine, per caratteristiche di costo d'impianto, all'idroelettrico e al nucleare.

Esaminiamo dapprima l'evoluzione di queste due fonti. Nel panorama mondiale l'*idroelettrico* ha raggiunto la quota del 6,2% del fabbisogno con un trend sostenuto (Fig.2) fino agli anni '60, seguito poi dalla stasi dovuta all'esaurimento dei siti idrologici nei paesi industriali, mentre lo sfruttamento dei numerosi siti nel Terzo mondo va a rilento per carenza di investimenti. L'energia idroelettrica oggi prodotta è pari al 35% circa della producibilità mondiale; c'è quindi margine per un raddoppio di produzione in termini assoluti, equivalente al mantenimento dell'attuale quota.

Il nucleare, dopo una rapida partenza propiziata dalla crisi petrolifera del 1973, si mantiene sul livello del 6% a causa delle problematiche territoriali e di sicurezza di questi megaimpianti, nonché della concorrenza economica delle centrali a carbone.

Le *nuove fonti rinnovabili*, nel seguito indicate con la sigla F.R. (che comprende, oltre all'energia eolica, geotermica, solare, biomasse avanzate, anche il *recupero del calore di scarico* dagli impianti termoelettrici di qualsiasi tipo e taglia), non soffrendo questo tipo di vincoli, dovrebbero avere un trend di crescita più sostenuto nel lungo termine.

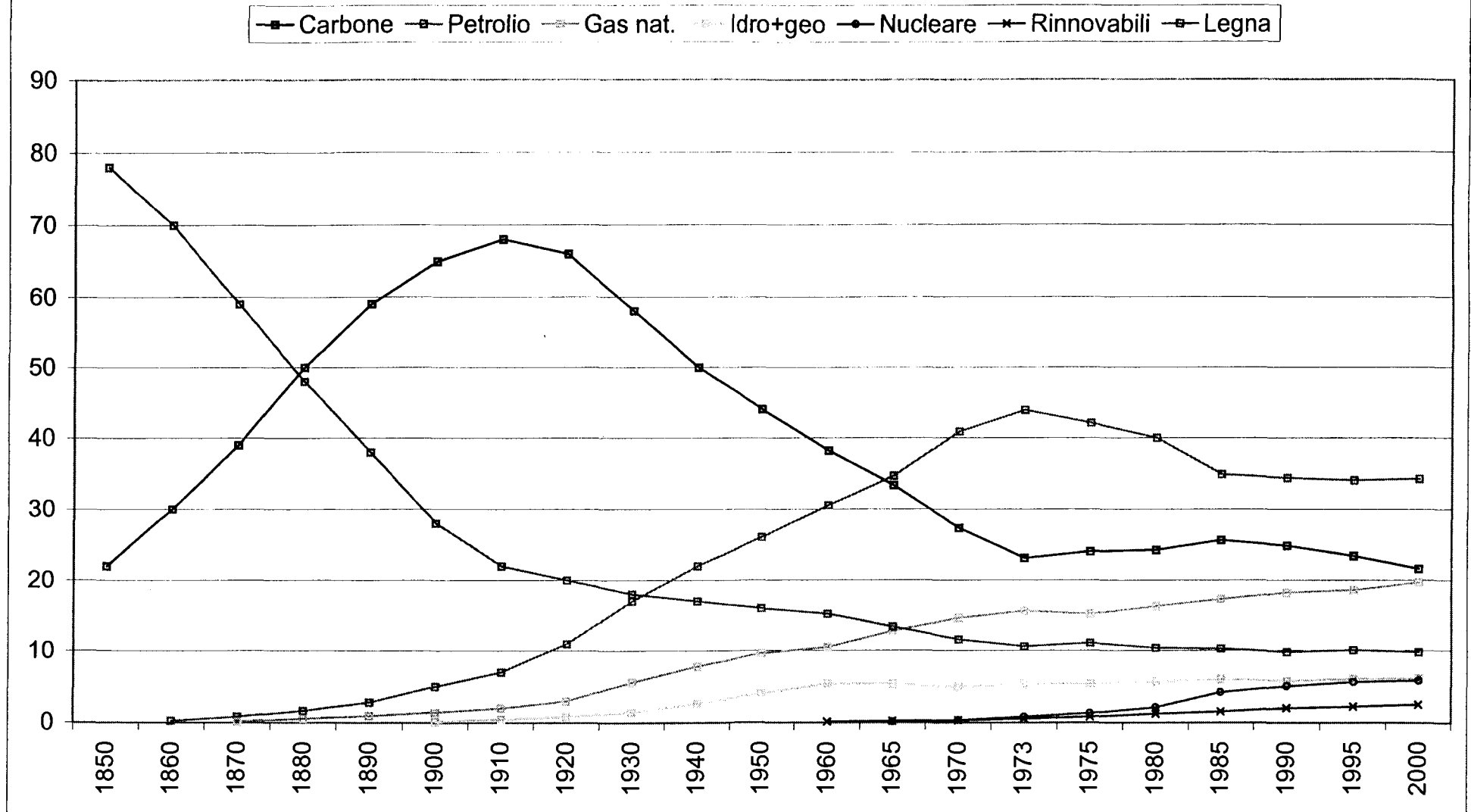
L'elaborazione di possibili scenari per le F.R. è tuttavia una cosa non semplice.

Le fasi principali della diffusione di una fonte richiedono tempi che si possono valutare concretamente soltanto ricorrendo ai tabulati storici.

Secondo il grafico elaborato (Fig. 2) incrociando dati ENI, Shell e IASA, il petrolio, che nel 1912 copriva 8% del totale, ha raggiunto un massimo pari al 44% nel 1973 (crescita media: 6% al decennio). Anche il carbone è passato rapidamente dal 8% (coperto intorno al 1810) al valore massimo, pari a 68% del consumo mondiale, raggiunto nel 1910 (crescita media: 6,3% al decennio). Ma appena si è manifestata nei primi anni del secolo la concorrenza del petrolio, la quota del carbone si è ridotta altrettanto velocemente.

In sostanza si può dire che il petrolio si è diffuso rapidamente avendo trovato un vecchio concorrente *handicappato* (carbone) e nuovi concorrenti *frenati* o dal costo delle infrastrutture (gas naturale) o dal costo di impianto e dai problemi di localizzazione e sicurezza (idroelettrico e nucleare).

Fig.2 - Consumo energetico mondiale. Percentuali per Fonte



Come è noto il gas naturale è frenato dalla necessità di realizzare costose reti di trasporto e distribuzione. Sebbene la prima società industriale per l'utilizzo del gas naturale sia stata formata nello stesso anno (1858) in cui veniva messo in produzione in Pennsylvania il primo giacimento di petrolio, tuttavia sarebbero dovuti passare ottanta anni prima che il gas raggiungesse quell'8% del consumo mondiale che il petrolio aveva raggiunto in soli cinquanta anni.

La crescita iniziale delle F.R. (da zero al 2,4% in una quarantina di anni) assomiglia molto alla crescita iniziale del gas, che ha raggiunto lo stesso livello in quaranta anni.

Vediamo come queste nozioni possono aiutarci nel delineare lo scenario in cui le F.R. si troveranno a diffondere nel secolo appena iniziato. Esse dovranno competere con gli idrocarburi, i quali (essendo in via di esaurimento i giacimenti a basso costo) eserciteranno contro le F.R. una resistenza simile a quella esercitata nel novecento dal carbone contro la crescita degli idrocarburi.

Una crescita "frenata" da vecchie fonti sulla difensiva e da possibili fonti nuove (nucleare sicuro? idrati di metano?) sembra essere lo scenario più probabile per la futura diffusione delle energie rinnovabili. Nel 1994 esse coprivano (senza conteggiare la legna combustibile) circa 8% del consumo mondiale, di cui 6% fornito da fonte idroelettrica. La legna, che copre ancora una quota rilevante (10% circa) dei consumi globali, non può essere *interamente* conteggiata nelle F.R. che sono, per definizione, senza emissioni *nette* di CO₂. Infatti viene oggi *ricostituita* solo una frazione modesta della legna bruciata. Vedremo in seguito questo problema.

Cerchiamo ora di valutare il tempo necessario affinché le F.R. passino dal 2,4% attuale a un livello *rassicurante* nei confronti dell'effetto serra, in quanto riduce indirettamente le emissioni da combustibili fossili. Questo livello si può ritenere raggiunto (in uno scenario consapevole dell'uso razionale dell'energia) quando la somma di F.R., idroelettrico e legna rinnovabile raggiungerà il 50% circa del fabbisogno mondiale. Assumendo che la fonte idroelettrica mantenga il livello attuale di 6,2% e richiamando dal § 4.1 la quota ricoperta in futuro (4-5%) dalla legna rinnovabile nell'ipotesi di completo sviluppo delle coltivazioni forestali, possiamo ritenere che il livello rassicurante richieda una *quota di F.R. pari a circa 40%* del fabbisogno totale.

Da un lato, per attestarsi su questo livello, le F.R. impiegheranno certamente più tempo di quanto abbiano impiegato il carbone o il petrolio con crescite medie superiori al 6% al decennio.

D'altro canto, confrontando con le fonti ad alto costo d'impianto, le F.R. avranno un trend di crescita, stante la possibilità di scelta della taglia d'impianto e la ricordata assenza di vincoli sulla localizzazione e sulla sicurezza, maggiore del trend medio del nucleare (2% al decennio).

Per avere indicazioni più precise analizziamo le singole fasi di crescita.

Le considerazioni che seguono *prescindono* (per il momento) dalla accelerazione che la diffusione delle F.R. può ricevere in presenza di vincoli normativi sulle emissioni.

Nel passaggio dall'attuale quota all' 8%, è molto probabile che, le F.R. assumeranno una velocità di crescita simile a quella a suo tempo sperimentata (Fig.2) dal gas naturale (1,6% al decennio).

Nella successiva fase di crescita intermedia (dall'8% al 16% del fabbisogno) il gas naturale ha sperimentato una crescita pari a 2,7% al decennio.

Le F.R. potrebbero diffondere in questa fase, sempre a causa del freno operato dagli elevati costi unitari d'impianto, più o meno alla stessa velocità del gas naturale.

Quest'ultimo, superata la fase intermedia, copre oggi il 20% del fabbisogno globale anche grazie al trasporto per nave criogenica in tutto il mondo. Ma il costo del trasporto e della liquefazione si è riflesso sulla velocità di crescita, scesa a 1,5% al decennio.

Poiché le piccole taglie di impianto favoriscono la disseminazione nel territorio, le F.R. non richiedono nuove linee di trasporto a lunga distanza dell'energia. Pertanto nella fase matura (dal 16% al 40% del fabbisogno) le F.R. dovrebbero mostrare un trend di crescita simile a quello della fase precedente, comunque più elevato di quello attuale del gas.

A questo punto si profilano *due scenari* in relazione al tipo e alla intensità dei vincoli alle emissioni di CO₂ che saranno approvati in futuro facendo seguito al protocollo di Kyoto. Nello schema seguente riassumiamo per ogni fase di crescita i tempi di diffusione impiegati dalle F.R. nelle diverse ipotesi di scenario.

Fase di crescita	Senza enfasi normativa		Con enfasi normativa
	(Crescita/dec.)	(tempi)	(tempi)
dal 2,4 % al 8%	1,6%	35 anni	24/19 anni
dal 8% al 16%	2,7%	30 anni	20/16 anni
dal 16 al 40%	2,7%	89 anni	60/48 anni
totale	-	154 anni	104/83 anni

Nello scenario *senza* enfasi normativa le F.R. si diffonderanno sulla falsariga della crescita del gas naturale sopra analizzata. Nello scenario con *enfasi normativa* assumeremo che la velocità di crescita nelle singole fasi sia 1,48-1,85 volte maggiore (a seconda della forza dei vincoli) di quella del precedente scenario.

Nel primo caso occorrerebbero 154 anni per raggiungere l'obiettivo del 40% del fabbisogno, mentre nel secondo caso sarebbero sufficienti 104/83 anni.

Previsioni più dettagliate non è possibile farne senza perdere in affidabilità.

Tra gli operatori energetici a livello mondiale che hanno elaborato scenari di consumi, la Shell è quella che ha studiato con maggiore attenzione il futuro delle F.R. elaborando uno specifico scenario con enfasi sulla loro diffusione. In questo scenario³ (*Sustained Growth 1860-2060*) il tasso medio di crescita dei consumi (2%) rilevato tra il 1973 e il 2000, viene esteso esponenzialmente (Fig.3) fino al 2060, assumendo che i consumi siano soddisfatti in modo crescente dalla diffusione delle F.R., a fronte di un realistico contributo delle fonti fossili, nucleare e idroelettrica.

In un secondo scenario (*Dematerialization*) la Shell ha studiato uno sviluppo con enfasi sulla diffusione delle tecnologie innovative efficienti e sull'uso di nuovi materiali con bassa intensità energetica. Questo scenario prevede, accanto al solito contributo delle fonti tradizionali, un più limitato consumo globale, essendo l'integrazione ottenuta sempre con le F.R.

Poichè la crescita dei consumi nei prossimi decenni sarà piuttosto legata alla curva *logistica* della crescita della popolazione mondiale, è ragionevole aspettarsi all'anno 2060 (a fronte di un aumento previsto della popolazione mondiale pari al 50%) un *raddoppio* circa del fabbisogno mondiale come nello scenario *Dematerialization*, mentre lo scenario *Sustained Growth* assume addirittura una *triplicazione*.

In quest'ultimo scenario le principali F.R. (eolica, solare, geotermica, biomasse avanzate) crescono molto in fretta fino a raggiungere il 55% nel 2060, come mostrato nella Fig.3. Si tratta di velocità di crescita che non sono mai state toccate da nessuna fonte nel passato!

Viceversa, nello scenario *Dematerialization* la velocità media di crescita delle F.R. è pari a 5-6% al decennio, valore che si ritiene realistico in relazione a decise restrizioni normative sulle emissioni di CO₂.

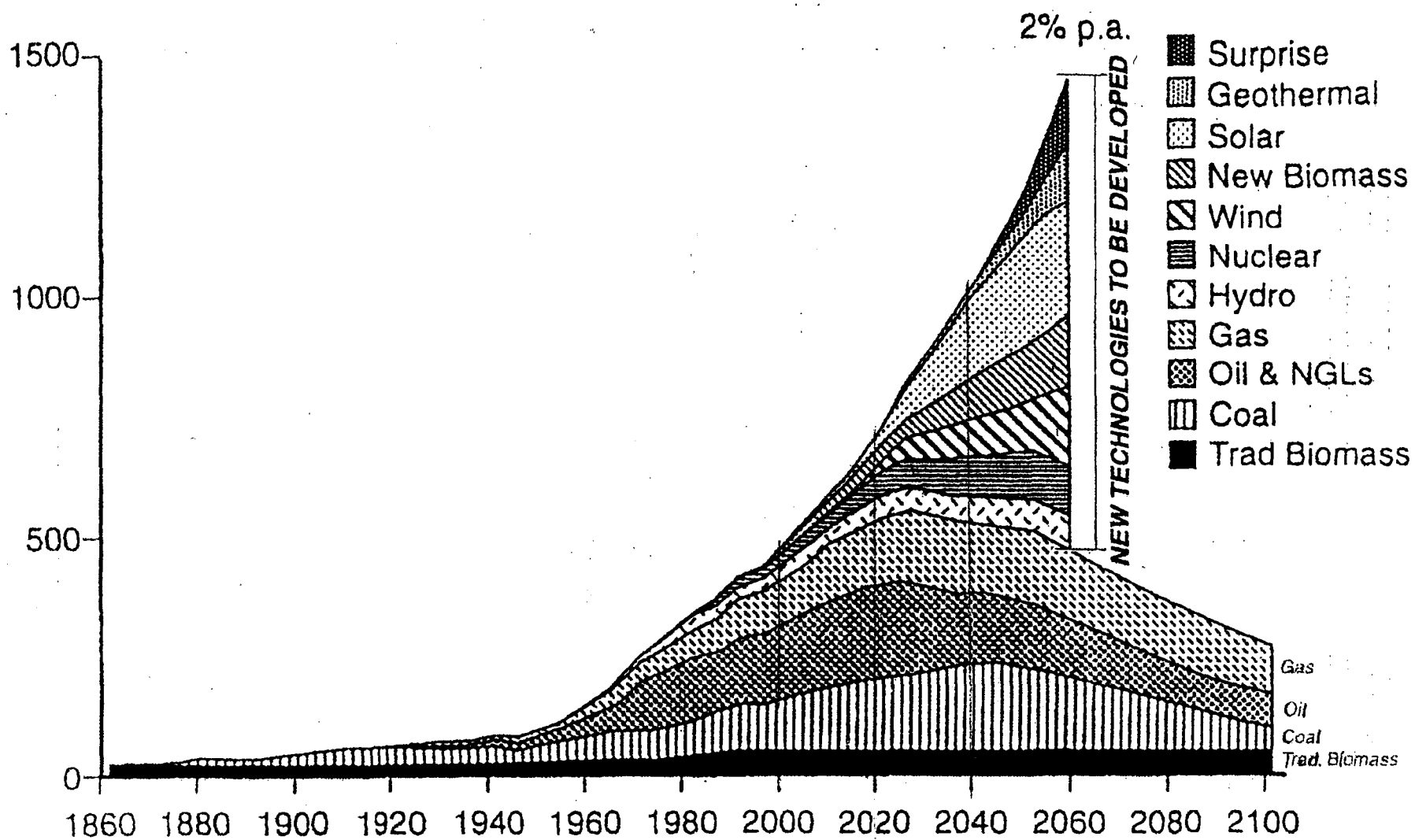
Lo studio della Shell ha soprattutto il merito di avere indagato sulle *potenzialità* delle F.R. a una data imprecisata. Lo scenario *Sustained Growth* valuta che le varie fonti potranno dare, tenuto conto dei vincoli realizzativi (area di terreno impegnato, disponibilità di siti adeguati, investimenti negli impianti, ecc.) le seguenti produzioni:

- Eolica 3300 Mtep/a
- Biomasse avanzate 3600 “
- Solare 5400 “
- Geotermica 2700 “

Queste produzioni possono essere riferite a *diversi* orizzonti temporali in dipendenza della *effettiva* velocità di diffusione che le fonti mostreranno. La Shell indica come riferimento l'anno 2060, mentre secondo la nostra analisi comparativa le produzioni indicate si potranno più probabilmente avere nel periodo 2080-2120.

Fig. 3 – Scenario dei consumi energetici 1860-2100 elaborato dalla Shell con enfasi sulla diffusione delle nuove fonti rinnovabili.

Exajoules



Lo slittamento non provoca tuttavia grossi scompensi nelle previsioni in quanto, se sommiamo il contributo totale delle F.R. riportate nel prospetto (15.000 Mtep/a) al contributo fornito nel 2100 dalle fonti tradizionali (pari a circa 9.600 Mtep/a, vedi Fig.3), otteniamo una disponibilità totale di energia (24.600 Mtep/a) pari a 2,34 volte il consumo mondiale attuale. Ciò appare *adeguato* a far fronte tra un secolo all'aumento di popolazione (pari a 1,56-1,6 volte) e alla corrispondente crescita del consumo *medio procapite* derivante dallo sviluppo economico del Terzo mondo.

3 – Ripartizione della popolazione in Aree di consumo energetico

Per ottenere la *evoluzione* nei prossimi secoli dei consumi energetici globali si può utilizzare una suddivisione della popolazione mondiale in aree geoeconomiche che risultino *omogenee* sotto il profilo del consumo energetico. Dal punto di vista qualitativo le Aree sono già note.

La prima Area è usualmente quella dei Paesi Industrializzati (PI), l'unica che abbia una definita delimitazione geografica comprendente l'intera Europa fisica, America del Nord, Giappone, Australia, Nuova Zelanda: in sostanza l'area OCSE più la parte europea dell'ex URSS. Resta fuori la Turchia in quanto i suoi parametri energetici non rientrano in quest'area.

La seconda Area riguarda le zone di Nuova industrializzazione (Area NI) che sono giunte alla soglia industriale imboccando nuovi processi produttivi caratterizzati da più bassa intensità energetica.

La terza Area riguarda i paesi in via di sviluppo (PVS) ovvero quelle popolazioni che hanno già fatto uno o più passi verso l'industrializzazione. In quest'area vengono usualmente comprese grandi entità nazionali. In realtà bisogna distinguere, all'interno di questi paesi, tra le singole *zone* con gradi assai diversi di sviluppo che le collocano in Aree differenti.

Infine l'Area delle zone Non Sviluppate (Area NS) comprende le popolazioni con bassi consumi, ancora prevalentemente allo stadio agricolo-pastorale.

Una prima suddivisione concreta tra le diverse Aree è quella che si può dedurre dai dati economici raccolti nelle "World Tables" (*Banca Mondiale*) e negli "International Financial Statistics Yearbook" (*FMI*) degli anni precedenti il 1994, mentre i dati sulla popolazione sono ripresi dall'annuale "World population Report" dell'ONU.

Tuttavia l'evoluzione dei parametri economici non sempre coincide con l'evoluzione dei consumi. Occorre dunque disporre dei consumi energetici, che sono generalmente di provenienza ONU, integrati per gli anni più recenti con quelli di riviste specializzate (es. BP Statistical Review).

Un ausilio concreto nella consultazione di questi dati è fornito dalla Enciclopedia Geografica Garzanti (Novembre 1995) che ha tratto da queste fonti, per ogni paese, diversi parametri di nostro interesse, tra cui il *PNL procapite* e il *consumo energetico procapite*. Riguardo al primo di questi dati utilizzeremo il valore riferito al *potere di acquisto* (PPA espresso in \$ USA) che consente un più corretto raffronto economico tra vari Stati.

3.1 - Caratteristiche generali delle singole Aree

L'Area dei Paesi industrializzati (PI) ha, come accennato, caratteristiche definite.

Più complesso è indicare le *zone* che costituiscono l'Area di Nuova industrializzazione, perché non vi è una corrispondenza generale tra Stati e zone.

Talvolta vengono indicati come paesi di Nuova industrializzazione quelli che sono arrivati alla soglia dei grandi impianti industriali dopo l'ultima guerra.

Si tratta però di un criterio puramente cronologico che non tiene conto del fatto che oggi il concetto di "nuova industrializzazione" riveste una caratterizzazione *tecnologica* legata a processi e prodotti che determinano *ridotti consumi energetici* in *zone* con livelli *medio-alti* di PIL-procapite.

I processi di produzione a bassa intensità energetica sono venuti alla ribalta dopo il 1973, quando la grande crisi petrolifera fece capire che gli sprechi energetici non erano più accettabili.

Non a caso vengono spesso citate come esempi di nuova industrializzazione le cosiddette "tigri asiatiche" (Corea del Sud, Taiwan, Hong Kong, Singapore, con un totale di 73 milioni di abitanti), paesi che hanno notevolmente accresciuto il loro PIL-procapite producendo su vasta scala prodotti a

bassa intensità energetica (componenti e apparecchi elettronici, ottica e fotografia, meccanica leggera, giocattoli, manifatture varie).

Su questi paesi ha sicuramente influito l'esempio del Giappone, passato in soli cinquanta anni dalle macerie del dopoguerra ai vertici del PIL-procapite mondiale, grazie a intelligenti scelte produttive che denunciano una intensità energetica circa 2 volte inferiore a quella degli USA.

La corretta definizione di Nuova Industrializzazione comprende, a nostro avviso, tutte le *zone* che sono giunte alla soglia industriale dopo la crisi energetica del 1973 e sono pertanto caratterizzate da produzioni con *più basse intensità energetiche*.

Il modo di produzione industriale con bassi consumi si è sviluppato anche in particolari distretti nei grandi paesi in via di sviluppo. Cina, India, Brasile, Indonesia, ecc. sono grandi realtà (acriticamente classificate tra i PVS) che contengono al loro interno sia distretti *industriali*, sia larghe zone in *via di sviluppo* (agricoltura tradizionale con piccole industrie disseminate), sia infine zone povere allo stadio *agricolo-pastorale*.

Realtà non semplici da classificare sono quei paesi che, pur non avendo ancora una struttura veramente industriale, hanno tuttavia un consumo e un PIL-procapite paragonabili a quelli dei paesi di nuova industrializzazione.

Si tratta in genere di paesi esportatori di petrolio (OPEC) i quali denunciano un alto consumo-procapite di energia in conseguenza del forte uso di combustibili a buon mercato, necessario per soddisfare i crescenti consumi di elettricità, acqua potabile desalinizzata, motorizzazione, confort ambientale, ecc. che si accompagnano al benessere creato dal petrolio. Nelle zone dei pozzi petroliferi vi sono anche installazioni di *gas flaring* (bruciamento in torcia del gas naturale non recuperabile) che vanno ad incrementare le emissioni di CO₂.

3.2 - Dati economici ed energetici dei principali paesi nel mondo

Nella Tabella 1 sono riportati (per ordine decrescente di popolazione) i valori procapite del PNL e del consumo energetico (anno 1993) dei principali Stati o aggregati di Stati relativi a una popolazione pari al 95% di quella mondiale.

Consideriamo i valori della *produttività energetica* (inverso della intensità energetica). Essa è bassa nelle economie notoriamente *poco efficienti*. Si va da un minimo (600 \$/tep) della Corea del Nord, ai 1120 \$/tep dell'Europa orientale (Russia compresa), ai circa 2200 \$/tep dell'Arabia Saudita, dove si fa gran consumo di petrolio autoprodotta.

Vi è poi un gruppo di paesi che si trovano a diversi stadi sulla via della completa industrializzazione (Corea del Sud, Taiwan, Malaysia, Thailandia, Messico, Brasile, Turchia, Egitto, Indonesia, Cina, India) che denunciano produttività energetiche *elevate* (da 4000 a 8000 \$/tep), pari o superiori a quelle del Giappone (5090 \$/tep) e dell'Europa Occidentale (5480\$/tep), a loro volta nettamente superiori a quella degli USA (2720 \$/tep).

Ai fini della suddivisione della popolazione mondiale in Aree di consumo, si potrebbero definire delle Aree di reddito, vista la forte correlazione del rapporto PNL-procapite/consumo-procapite quando si tiene conto del contributo della legna combustibile, che rappresenta una quota notevole nei paesi del Terzo mondo, mentre ha un'incidenza assai bassa nei PI (§3.4).

Tuttavia vi sono diversi motivi che rendono inopportuna questa scelta.

In primo luogo la correlazione è valida se si considera anche il consumo di legna combustibile, che viceversa non viene computata nel calcolo delle emissioni in quanto fonte rinnovabile.

Inoltre la metodologia basata sui consumi energetici risulta *più affidabile* di quella basata sul PNL in quanto la determinazione di quest'ultimo (di cui si hanno solo semplici stime in molti casi) è spesso più aleatoria della contabilità dei combustibili commerciati e consumati.

Nella definizione delle Aree di consumo si è pertanto adottato il criterio basato sul *consumo energetico*.

La Fig.4 mostra in ordinata il consumo-procapite (in valore decrescente) dei 49 principali Stati non appartenenti all'area PI elencati nella Tab.1. Sulle ascisse ogni punto è centrato sul segmento di popolazione di ciascun paese, il cui nome è riportato, per esigenze di editing, nella Fig. 5.

I punti della curva assumono il tipico andamento decrescente che caratterizza la distribuzione statistica di un bene economico scarso tra molti piccoli percettori. Va però notato che i punti relativi a paesi molto popolosi come Cina e India non rientrano, se considerati come tali, nella curva.

Questi paesi vanno quindi suddivisi in zone *omogenee* in relazione al consumo-procapite (e in certa misura al PNL-procapite).

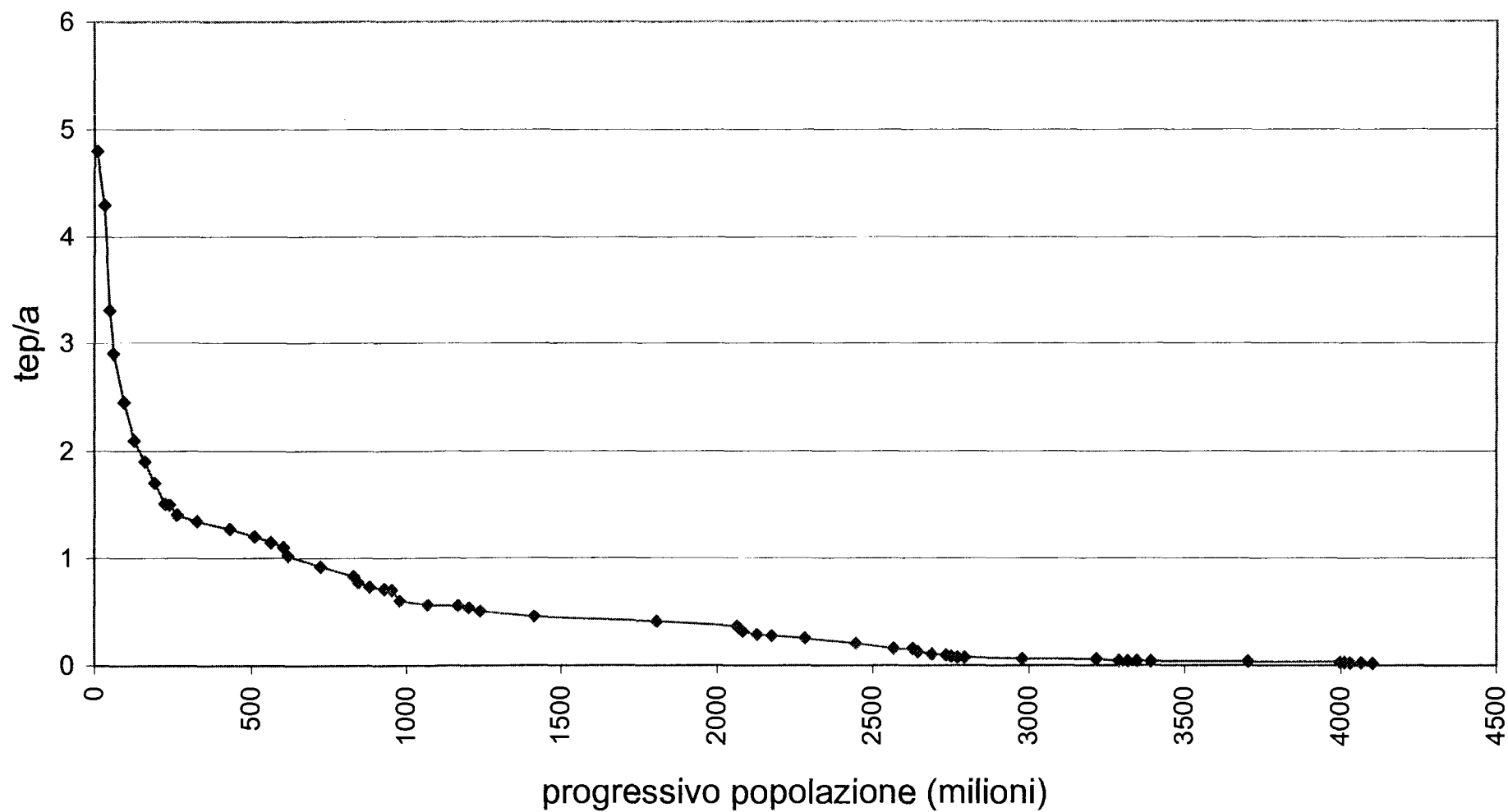
Rappresentando Cina e India in Fig.4 mediante più punti (zone) si osserva che la curva risultante si dispone quasi interamente secondo un andamento esponenziale. In particolare le zone **Cina1** , **India1** mostrano consumi omogenei all'Area PI. Le zone **Cina2** , **India2** sono omogenee all'Area Nuova industrializzazione. Le zone **Cina3**, **India3**, **Cina4** sono omogenee all'Area PVS, mentre infine le zone **Cina5** , **India 4** appartengono all'Area del Non sviluppo.

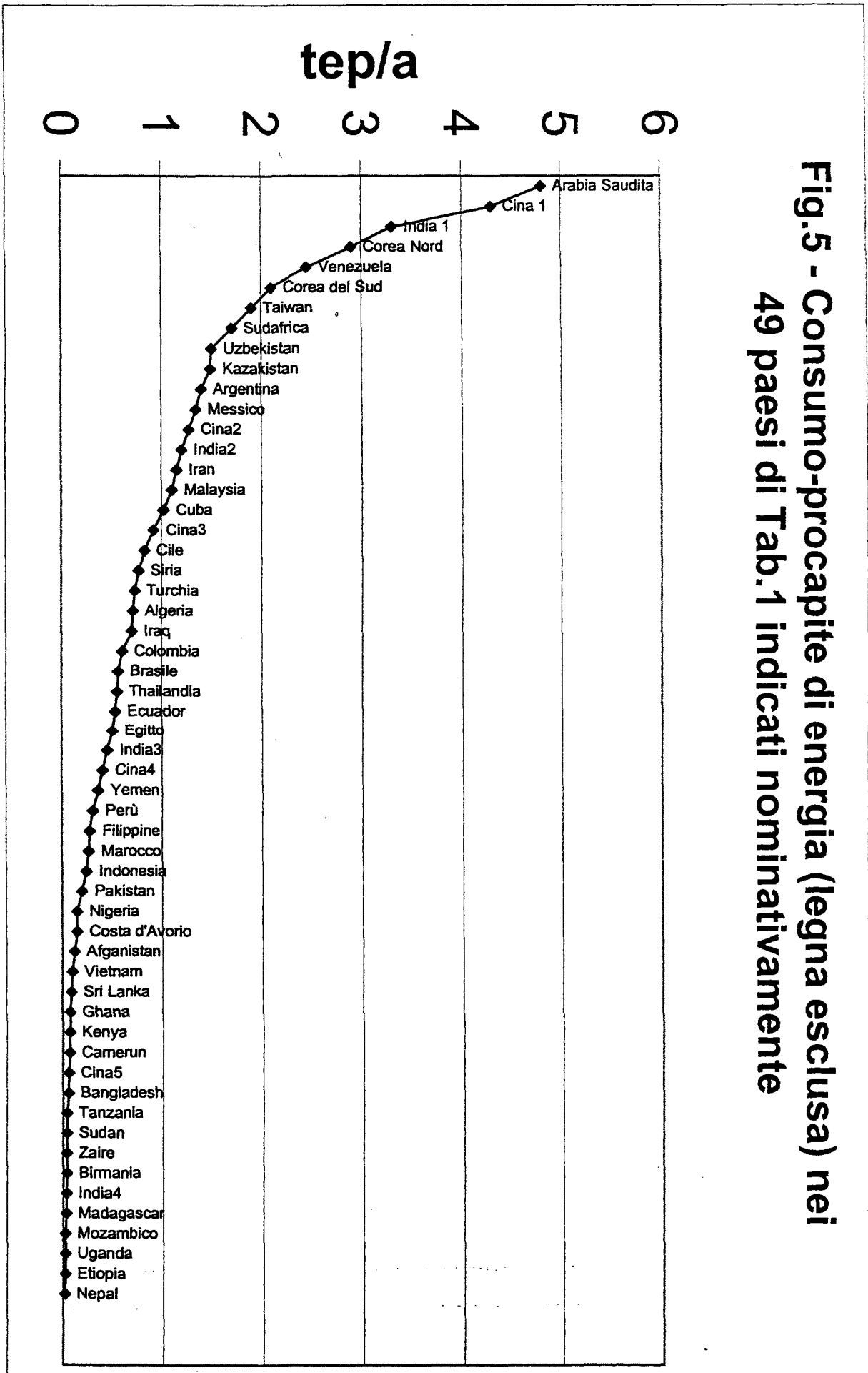
Tabella 1 – Dati economici ed energetici dell'Area Paesi Industrializzati e dei principali Stati nel mondo (1993)

Il PNL procapite è espresso in Unità di Potere di Acquisto (PPA). – I singoli Stati sono ordinati rispetto a valori decrescenti della popolazione. Nel consumo energetico non è compresa la legna.

	Popolazione (milioni)	Consumo procapite. (tep/a)	PNL procapite PPA \$(USA)	Consumo energ. (Mtep/a)
America Settentrionale	290	7,9	21.790	2290
Europa Occidentale	365	3,7	20.300	1350
Europa Orientale	327	5,7	6.430	1864
Giappone, Australia, N.Zel.	146	3,76	18.800	549
<i>Totale Area PI</i>	<i>1128</i>	<i>5,38</i>	<i>-</i>	<i>6053</i>
Cina	1208	0,57	2946	690
India	910	0,23	1150	210
Indonesia	191	0,245	2730	47
Brasile	147	0,56	5240	82
Pakistan	137	0,20	1970	27,4
Bangladesh	118	0,055	1160	6,5
Nigeria	108	0,15	1360	16,2
Messico	90	1,34	7170	120
Vietnam	73	0,09	1250	66
Filippine	66	0,28	2440	18,5
Turchia	61,2	0,73	4840	44,7
Egitto	60,4	0,50	3600	30,2
Iran	60	1,15	4670	69
Thailandia	58	0,55	5270	32
Etiopia	53,4	0,02	370	1,06
Birmania	45,5	0,037	670	1,7
Corea del Sud	44,4	2,10	8320	93,2
Zaire	43,6	0,04	469	17,4
Sudafrica	42	1,70	3885	71,4
Colombia	34,5	0,60	5460	20,7
Argentina	33,8	1,40	5120	47,3
Tanzania	28,8	0,04	469	11,5
Kenia	27,8	0,07	1350	1,9
Algeria	27,8	0,71	2870	19,7
Sudan	27,4	0,04	1162	1,1
Marocco	26,5	0,27	3340	7,1
Corea del Nord	23,5	2,90	1750	68,1
Perù	23,3	0,31	3110	7,2
Uzbekistan	22,3	1,50	2790	38,8
Nepal	21,4	0,017	1130	0,36
Venezuela	21,4	2,45	8120	52,4
Taiwan	21,1	1,90	8200	40,1
Uganda	20,6	0,02	1036	0,4
Iraq	19,8	0,70	3500	14,0
Malaysia	19,7	1,10	7400	21,7
Sri Lanka	18,1	0,09	2650	2,0
Arabia Saudita	17,9	4,80	10850	85,9
Afganistan	17,1	0,12	700	2,1
Kazakistan	17	1,49	4490	25,3
Ghana	16,9	0,08	930	1,35
Mozambico	15,5	0,024	921	0,37
Cile	14,3	0,83	7060	11,8
Madagascar	14,3	0,03	710	0,25
Siria	14,2	0,77	5200	10,9
Yemen	13,8	0,36	1374	4,9
Costa d'Avorio	13,8	0,15	1510	2,1
Camerun	12,9	0,07	2400	0,9
Ecuador	11,2	0,53	4140	5,9
Cuba	11,0	1,02	2000	11,2
Totale parziale	5.252	-	-	8.132
Residuo (micro-Stati)	278	-	-	114
Mondo	5.530	-	-	8.246

Fig.4 - Consumo procapite di energia (esclusa legna) nei paesi indicati in Fig.5.
Ogni punto è centrato sul segmento di popolazione di ogni paese.





Il grafico rappresenta sinteticamente la situazione energetica di circa 4130 milioni di persone non appartenenti all'area dei paesi industrializzati. Tenendo conto dei 1128 milioni di abitanti dei PI, rimangono 280 milioni di abitanti (5% della popolazione mondiale) relativi a un centinaio di piccoli Stati (responsabili solo dello 0,6% del consumo mondiale) della cui ripartizione in Aree si tiene conto secondo criteri statistici.

La **ripartizione** in Aree di consumo della popolazione riportata in ascissa della Fig.4 richiede la definizione delle soglie di confine, per ottenere le quali abbiamo utilizzato un **mix** di criteri economici ed energetici.

E' noto che i paesi appartenenti all'Area PI hanno un consumo medio-procapite superiore a 3 tep/a. Adottando questa definizione dell'Area PI, risulta dalla Fig. 5 che le popolazioni di Arabia Saudita e delle zone *Cina1, India1* (un totale di 53 milioni) vanno aggregate all'Area PI a causa dei loro alti consumi-procapite.

L'Area di Nuova Industrializzazione riguarda una gamma di Stati il cui consumo-procapite va da 2,9 tep/a della Corea del Nord (Fig.5) fino a 1,1 tep/a della Malaysia, passando per Venezuela, Corea del Sud, Taiwan, Sudafrica, Uzbekistan, Kazakistan, Argentina, Messico, *Cina2, India2, Iran.*

Poiché al disotto della Malaysia abbiamo paesi con basso PNL-procapite (Cuba, *Cina3*, ecc) appartenenti all'area PVS, assumeremo che il **confine** tra le due Aree di consumo sia intermedio tra 1,1 tep/a della Malaysia e 1,02 tep/a di Cuba.

L'Area PVS comprende dunque una serie di paesi che vanno da Cuba fino alla zona di bassi consumi in cui si trova verosimilmente il confine tra l'area PVS e quella Non Sviluppata.

L'Area Non Sviluppata comprende paesi il cui PNL-procapite è generalmente inferiore a 365 \$/a, corrispondenti mediamente nei paesi interessati a circa 1300 \$/a PPA (potere di acquisto). Quest'ultima soglia tiene conto anche del reddito (non censito) autoconsumato dalla popolazione agricola. Tuttavia anche il livello di 1300\$/a PPA è sinonimo di povertà assoluta.

Gli economisti hanno sviluppato un criterio supplementare per classificare i paesi che, essendo collocati in vicinanza della citata soglia, possono dare origine a incertezze. Ciò che caratterizza infatti i paesi del Non Sviluppo anche per il **futuro** è la **tendenza a perdere l'aggancio con i PI.**

Nei paesi industriali il PNL aumenta con un tasso medio del 2,1 % da cui si deduce, sottraendo il tasso demografico (0,6%), che il PNL-procapite aumenta mediamente con il tasso di 1,5%.

Pertanto alcuni paesi (es. Vietnam, ecc) collocati appena **sotto** la soglia dei 1300 \$/a, ma con un tasso di crescita procapite superiore a 1,5%, possono a buon diritto essere classificati tra i PVS. Viceversa può accadere che paesi collocati appena **sopra** la soglia abbiano denunciato, nel periodo cui si riferisce la nostra analisi, un tasso di crescita procapite inferiore a 1,5% o addirittura negativo, com'è il caso della Nigeria e della Costa d'Avorio.

Trattandosi tuttavia di paesi con risorse interne certe (petrolifere, forestali, ecc) appare giusto collocarli nell'area PVS, anche perché non va dimenticato che il criterio del tasso di crescita non ha validità generale in quanto può dipendere da congiunture locali con effetti **solo temporanei.**

Tenendo presenti queste considerazioni sembra ragionevole assumere una soglia di confine tra le due aree posta tra l'ultimo paese dei PVS (Sri Lanka, consumo procapite 0,09 tep/a) e il primo dell'Area NS (Ghana, consumo procapite 0,08 tep/a).

Dalla Fig. 4 si può ottenere la suddivisione della popolazione mondiale in Aree di consumo, in corrispondenza delle soglie di confine precedentemente definite (x = consumo procapite):

- Area PI $x > 3$ tep/a
- Area NI $1,06 < x < 3$ “
- PVS $0,085 < x < 1,06$ “
- Area NS $x < 0,085$ “

Nella Tabella 2 sono riportati i valori di popolazione e di consumi totali ottenuti.

In particolare la popolazione dell'Area NS risulta maggiore di quella indicata per il 1993 dalla Banca Mondiale⁴ (1304 milioni).

La cosa non desta imbarazzo poiché il dato della Banca Mondiale si riferisce alla popolazione con PNL-procapite inferiore a 365 \$/a (*povertà economica*), mentre nel nostro caso ci si riferisce alla popolazione con un consumo procapite (legna esclusa) minore di 0,085 tep/a (*povertà energetica*).

Tabella 2 – Parametri relativi alle Aree di consumo energetico (esclusa legna). Anno 1993

Area	Popolazione (milioni)	Consumo totale (Mtep/a)	Consumo medio procapite (tep/a)
Area PI	1128	6.054	5,36
Zone aggregate	53	232	4,37
Area NI	581	879	1,51
PVS	2.296	1.012	0,44
Area NS	1.472	69	0,047
Mondo	5.530	8.246	-

4 – Calcolo delle emissioni attuali di CO2 per Aree

A partire dai consumi energetici totali di Area della Tab.2 si sono costruiti nella Tabella 3 i consumi di *combustibili fossili* utilizzando le frazioni medie di impiego di fonti fossili in ciascun area.

Dai questi consumi si risale all'emissione di ogni area tenendo conto delle diverse frazioni di combustibili (petrolio, carbone, gas naturale) consumati in ogni regione, cosa che determina variazioni notevoli tra le singole Aree nelle emissioni di CO2 per ogni tep consumato.

Rispetto ai calcoli standard di emissioni per combustione di combustibili fossili (G.Marland et al.-1999), che forniscono per il 1993 una emissione globale di CO2 pari a 22,23 Gt/a (compresa industria del cemento e gas flaring), le emissioni totali della tabella 3 non mostrano differenze degne di nota.

Anche la *frazione* di emissioni (68% del totale) dei paesi industriali propriamente detti (Area PI) è solo leggermente differente (67,7%).

Il maggiore interesse dei nostri calcoli sta nella *evoluzione futura* delle emissioni, nonché nella *ripartizione* delle emissioni tra paesi di Nuova Industrializzazione, PVS e Area NS che non figura nelle elaborazioni standard.

L'ultima colonna mostra la grande differenza esistente tra le emissioni *procapite* di ciascuna Area. Ciò conferma ancora una volta che ai PI, con emissione media procapite pari a 13,36 t/a, compete l'onere degli interventi iniziali di riduzione delle emissioni, prevedendo tuttavia nel contempo un calendario degli interventi futuri che dovranno vedere come attori comprimari i paesi delle "Zone aggregate PI" (emissione media procapite 13,39 t/a) e i principali consumatori dell'Area Nuova Industrializzazione.

Tabella 3 – Consumi di combustibili fossili ed Emissioni per ciascuna Area. Anno 1993

Area	Combustibili fossili (Mtep/a)	Emissioni CO2 (Gt/a)	Emissioni procapite (t/a)
Area PI	5200	15,08	13,36
Zone aggregate	203	0,71	13,39
Area NI	747	2,88	4,96
PVS	890	3,26	1,42
Area NS	62	0,24	0,16
Mondo	7.105	22,17	-

4.1 - Influenza dei consumi di legna sulle emissioni globali

Nei consumi-procapite di energia riportati in Tabella 1 non è conteggiato il consumo di legna combustibile, in quanto nel computo delle emissioni di CO₂ tali consumi non hanno interesse perchè la legna viene correntemente *assimilata* a fonte rinnovabile.

Si tratta in realtà di una posizione convenzionale. I consumi di legna combustibile, (per i quali normalmente non si hanno dati contabili in quanto non rientrano nel circuito commerciale) sono valutati pari a circa 930 Mtep/a (*World Energy Council*, 1994). Essi contribuiscono nell'Area NS a circa 80% del consumo di energia, mentre nei PVS forniscono dal 20% al 50% del consumo a seconda delle zone.

L'importanza di una razionalizzazione produttiva di questo settore è enorme dal punto di vista delle emissioni e del Cambiamento climatico globale, perchè le quantità di legna bruciate e solo *parzialmente* ricostituite, contribuiscono in modo sensibile (considerando anche la pratica degli incendi boschivi per acquisizione di nuove aree agricole) ad *accrescere* le emissioni delle fonti fossili.

Inoltre la scomparsa di regioni alberate crea squilibri nel ciclo idrologico locale con conseguente desertificazione (esempio tipico il Sahel e alcune regioni del Mediterraneo).

Nel calcolo delle emissioni globali di CO₂ si deve quindi tener conto anche di quelle derivanti dalla combustione del Biota, particolarmente attiva nelle zone tropicali per la creazione di nuove aree agricole.

Nei PI l'uso di legna combustibile è ridotto. E' molto sviluppato invece il taglio del legname per costruzione in quantità procapite (1,2 mc/a) ben superiori a quelle del Terzo Mondo (0,25 mc/a). Dagli scarti del legname tagliato, col passare degli anni, si forma CO₂ per decomposizione, mentre il legno incorporato in vecchie case, mobilia, barche, pali, ecc. viene alla fine bruciato. Da queste fonti di emissione ci si aspetterebbe una emissione *netta* di CO₂ anche dalle foreste temperate settentrionali. Per fortuna, in queste regioni forestate il legname è un bene economico commerciabile, per cui gli alberi tagliati vengono spesso (ma non sempre!) *ricostituiti*, recuperando in tal modo parte del carbonio finito in atmosfera. Questa è la via da seguire per diffondere anche nel Terzo Mondo la pratica della ricostituzione e coltivazione delle foreste, la quale può rendere *veramente* rinnovabile la biomassa come fonte di energia, creando per di più una fonte locale di occupazione e reddito.

Secondo il *Summary for Policymakers* dell'IPCC (Rif.1) la stima di queste emissioni va dal **10% al 30%** del totale, a seconda delle caratteristiche quantitative di assorbimento del biota terrestre ancora oggetto di studio. Nelle simulazioni preliminari eseguite in Rif.9 l'emissione del biota risulta pari al 16% circa.

5 – Lo sviluppo economico a lungo termine

Lo studio più recente della crescita della popolazione è contenuto nel “*Rapporto sullo stato della popolazione mondiale 1999*” dell’ UNFPA, l’organismo delle Nazioni Unite che si occupa di problemi demografici (Rif.10).

Nel 1999 la popolazione mondiale ha toccato 6.000 milioni di abitanti, crescendo con un ritmo annuale di 78 milioni, che diventeranno 64 milioni tra il 2020 e il 2025 e caleranno poi a 33 milioni tra il 2045 e il 2050.

Il valore più probabile che sarà raggiunto nel 2050 è calcolato pari a 8.900 milioni di abitanti.

Estrapolando i tassi di incremento previsti, abbiamo stimato che la popolazione *massima* dovrebbe assestarsi intorno a 9.400-9.700 milioni alla fine del secolo.

La novità contenuta in questi dati è certamente positiva se si pensa che solo dieci anni fa lo stesso Organismo prevedeva un assestamento intorno ai 12.000 milioni.

Dunque si rafforza l’opinione di coloro che ritengono possibile che si diffonda nel mondo un equilibrato sviluppo economico (*Sviluppo sostenibile*) sostenuto da uno scenario energetico basato su uno stretto sentiero di crescita dei consumi in grado di far evolvere l’attuale quadro di consumi, dominato dai combustibili fossili, verso una serie di processi meno energivori e un insieme di fonti alternative *carbon free* e di nuove tecnologie ad alta efficienza.

Questa strategia ha le sue basi nella divisione che si è storicamente determinata nell’economia mondiale tra l’Area PI (che ha adottato le produzioni con maggiore intensità energetica), l’area NI (la cui struttura industriale è centrata su processi meno energivori) e l’area PVS, che generalmente importa i prodotti delle industrie pesanti pagando con le esportazioni dell’industria leggera, dei prodotti tipici dell’artigianato-agricoltura-foreste e di alcune materie prime.

Quanto all’area Non Sviluppata, la struttura economica è così debole che potrebbe, in linea generale, evolvere seguendo opposte tendenze. Ad esempio, la vocazione dell’industria turistica è molto sentita, in quanto rappresenta una concreta possibilità di poter evolvere l’economia verso forme di sviluppo *non* legate all’industria tradizionale.

Una dimostrazione di questa tendenza è fornita dai tassi medi di crescita del fatturato dell’industria turistica in varie zone del mondo⁶, come riportato di seguito (tra parentesi il volume di affari annuale):

- America Sett.	3%	(956 miliardi \$)
- Caraibi	3%	(28 “ “)
- Australia, Nuova Zelanda	3,3%	(534 “ “)
- Unione Europea	3,7%	(1008 “ “)
- America latina	6%	(125 “ “)
- Africa	7,5%	(58 “ “)
- Cina, Sud Est asiatico	14,1%	(127 “ “)
- Oceania	19,4%	(143 “ “).

Nei paesi del Terzo Mondo l’industria turistica mostra tassi di crescita da 2 a 6 volte più alti di quelli dei paesi maturi. Questa tendenza, che può essere oggi considerata espressione delle scelte di investimento del capitalismo internazionale maturo, rimarrà probabilmente incorporata nelle scelte autonome di sviluppo di paesi del Terzo Mondo nei quali risulterà più conveniente investire e

creare occupazione verso il turismo, l'artigianato e la valorizzazione del patrimonio naturale e forestale, piuttosto che verso l'industria tradizionale.

Per capire la fondatezza di una prospettiva *diversa* dalla industrializzazione tradizionale basta pensare alle condizioni di vita esistenti nei grandi centri urbani dei PVS, vero polo di attrazione dei ceti poveri provenienti dalla campagna.

Città del Messico: area urbana 9,8 milioni abitanti, dintorni con baraccopoli 18 milioni (totale quasi 28 milioni); **San Paolo:** area urbana 9,4 milioni, dintorni 16 milioni (totale 25,4 milioni); **Seoul:** area urbana 10,6 milioni, dintorni 11,4 milioni (totale 22 milioni); **Bombay** 15,3 milioni, **Tehran** 14,2 milioni, **Calcutta** 14 milioni, **Manila** 12,8 milioni, **Il Cairo** 12,5 milioni, **Lagos** 12,5 milioni, **Djakarta** 12,8 milioni; (fonte: *Bureau of the Census*⁶).

Secondo il citato Rapporto UNFPA¹⁰, nel 2030 vivranno inurbati circa 5 miliardi di persone sul totale di 8,1 miliardi e addirittura nell'America Latina la percentuale di popolazione urbanizzata sarà maggiore che in Europa.

La cattiva qualità dello sviluppo di paesi protesi a copiare ad ogni costo il processo di industrializzazione, rischia di ritorcersi sui PI che hanno assistito passivamente a questa involuzione. I maggiori consumi energetici sottesi dalle megalopoli del Terzo Mondo non tarderanno infatti a pesare anche sui rapporti con i PI.

Nelle invivibili megalopoli sorte come funghi nei paesi di Nuova industrializzazione e nei PVS si sono inseguiti *vecchi obbiettivi* di industrializzazione urbana senza neppur tener conto dei requisiti sanitari, ambientali e urbanistici messi in atto nei PI durante il XX secolo.

Il "collasso" ambientale e sanitario di queste megalopoli non tarderà se non si predisporranno fin d'ora le opportune iniziative economiche per il loro ridimensionamento (attrazione della popolazione verso attività di industria leggera decentrata, coltivazione forestale, agricoltura autonoma, villaggi turistici, ecc.).

La rinuncia allo sviluppo industriale *tradizionale* appare come l'unica strategia capace di evitare l'inurbamento esasperato. La conversione verso altre attività sarà favorita dalla offerta futura di prodotti industriali a buon mercato dovuta alla crescita dell'Area Nuova Industrializzazione.

5.1 – Lo scenario energetico sostenibile

La breve descrizione appena tracciata mostra che lo "Sviluppo economico sostenibile" deve appoggiare su uno *Scenario energetico sostenibile* strettamente intrecciato.

Per vedere come si caratterizza tale Scenario bisogna ripercorrere un pò di storia.

La spontanea suddivisione dell'umanità in diverse aree geoeconomiche era in parte scritta nelle caratteristiche morfologiche del pianeta.

Le basi storiche della prima rivoluzione industriale sono legate alla presenza nei PI dei giacimenti di carbone, sui quali si è costruita la siderurgia e le varie industrie pesanti. Questa tendenza non potrà che trovare conferma nel fatto che il 70% dei giacimenti mondiali di carbone (unica fonte fossile abbondante, Tab. 4) sono concentrati in poche regioni: USA, Russia, Cina, Europa. Tre di queste sono già industrializzate, mentre non è difficile preconizzare una rapida espansione della industrializzazione in Cina, il cui tasso di aumento del PIL è pari al 8%.

Accanto a questi dati di fatto, sappiamo anche che qualsiasi scenario di consumi energetici deve far leva sulla *diffusione* delle fonti rinnovabili (idroelettrica, geotermica, biomasse e biocombustibili, solare termico e fotovoltaico, eolico) che rappresenta una condizione *necessaria* per superare la trappola dell'effetto serra.

Per garantirsi completamente contro questo rischio (condizione *sufficiente*) occorre anche prevedere un uso *molto qualificato* dei combustibili fossili.

In particolare le grandi riserve di carbone potranno essere utilizzate in futuro senza danni ambientali solo grazie a specifiche tecnologie innovative. A tal fine bisogna mettere a punto per tempo le

tecnologie di produzione dal carbone di combustibili *puliti* (alla cui base c'è l'idrogeno) e le tecnologie per il confinamento sicuro in pozzi profondi (acquiferi, ecc) della CO2 così prodotta .

Questa strategia appare al presente un po' defilata al cospetto delle ottimistiche previsioni di consumo a breve termine sostenute principalmente dall'aumento della *estrazione petrolifera* che, dai grandi giacimenti del Medio Oriente, sta evolvendo verso le perforazioni off-shore profonde (piattaforme giganti). Tuttavia il grosso dei futuri fabbisogni di petrolio potrà venire solo dallo sfruttamento dei giacimenti non-convenzionali (Tab.4), comprendenti greggi pesanti, scisti e sabbie bituminose, i quali richiedono la messa in opera di nuove tecnologie di estrazione.

Molto elevate sono le risorse convenzionali e non-convenzionali di *gas naturale*. Va ricordato tuttavia che nei nuovi giacimenti sottomarini il metano è mescolato con CO2 fino a percentuali del 71% (isole Natuna, Indonesia).

Tabella 4 – Riserve accertate e Risorse totali delle principali fonti esauribili.
(Elaborazione da: "IPCC, Second Assessment Report" - 1995).

	Riserve accertate	Risorse totali	Ritrovamenti ulteriori
PETROLIO (Gtep)			
Convenzionale	144	204	> 240
Non convenz.	170	386	> 360
GAS NAT. (Gtep)			
Convenzionale	115	220	> 240
Non convenz.	165	650	> 530
CARBONE (Gtep)	603	3000	>3100
NUCLEARE (Gtep)	43 (LWR)	340 (LWR)	>24000 (FBR)
Contenuto totale di Carbonio (Gt)	690	3700	> 4000

Il limite di queste soluzioni è tuttavia abbastanza chiaro. Il costo delle perforazioni aumenta esponenzialmente con la profondità. Così pure aumenta il rischio di possibili fallimenti di ricerca, specialmente nelle trivellazioni in mare.

Nello sfruttamento degli scisti il limite sta, oltre che nei costi, nel disastro ambientale prodotto dal *sommovimento* di quantità enormi di materiale (il petrolio è presente negli scisti in percentuali assai basse) e nell'effetto climalterante dovuto alle emissioni *addizionali* di CO2 dagli impianti di separazione.

Si calcola che la emissione totale di CO2 relativa a una tonnellata di derivati così prodotti, è superiore del 30-60% rispetto a quella di una tonnellata di derivati del greggio.

Rispetto agli scisti bituminosi, la produzione *carbochimica* dei carburanti presenta il vantaggio di un minore *sommovimento* ambientale nelle zone minerarie, ma resta per intero il problema delle emissioni *addizionali* di CO2 prodotte dai noti processi di idrogenazione del carbone,

Rispetto al basso contenuto tecnologico della separazione del petrolio dagli scisti, la concentrazione di tecnologia insita nei processi carbochimici può determinare nei PI una *scelta* in questo senso. In ogni caso la produzione dei derivati da fonti non-convenzionali avrà inizio appena i costi di produzione diventeranno convenienti a fronte della crescita del costo della benzina prodotto dall'aumento del prezzo del greggio.

E' noto che durante il secondo shock petrolifero (1979-80), che portò in prezzo del barile a 36 dollari, il costo di produzione della benzina (circa 52 \$ al barile) aveva superato di gran lunga il punto di break-even rispetto al derivato della carbochimica (che aveva allora un costo di circa 40 \$ al barile). Nell'ultimo scorcio del 1979 infatti l'Amministrazione Carter aveva predisposto la realizzazione di un impianto carbochimico pilota.

Nel Febbraio 1986 il prezzo del barile scese a 12 \$, mantenendosi basso (sui 17-21 \$) fino al 1999. Da allora non si è più parlato di carbochimica.

La risalita del greggio iniziata nel 1999 potrebbe determinare lo *start-up* della carbochimica, qualora il prezzo del barile si mantenesse *stabile* sopra una certa soglia. Probabilmente ciò avverrà tra un paio di decenni, ma nessuno può escludere che eventi particolari avvicininno tale data.

Di per sé la carbochimica può avere impatto "*buono*" oppure "*cattivo*" nei confronti dell'effetto serra.

L'influenza sarà positiva se gli impianti saranno *dotati* di sistemi di confinamento della CO2 e produrranno idrogeno da utilizzare, soprattutto nei trasporti, come combustibile *pulito*. Sarà invece *negativa* se gli impianti, privi dei sistemi di confinamento della CO2, produrranno carburanti simili agli attuali derivati del greggio.

Oltre al petrolio, l'altro grande protagonista è il *gas naturale*. Questa fonte è la meno inquinante tra i combustibili fossili e certamente ha rappresentato una "boccata di ossigeno" per le grandi città industriali dell'Occidente inquinate dai fumi del carbone e del petrolio.

Al di là di alcune situazioni favorevoli (ad esempio, l'Italia e l'Europa si trovano al centro di importanti disponibilità internazionali di metano trasportabile via condotte) le prospettive future di consumo del gas naturale, pur ricordando le grandi risorse dei giacimenti non-convenzionali, presentano un problema di costi e di sicurezza legato al trasporto via mare con navi criogeniche.

Ciò ne fa, in prospettiva, un combustibile di elezione per i paesi ad alto reddito. Giappone, Europa, USA non guarderanno a spese per acquisire il gas dai PVS produttori, i quali a loro volta ne avranno un gran bisogno per disinquinare le loro megalopoli afflitte dalla polluzione.

Da un punto di vista quantitativo, le opzioni offerte dai combustibili fossili sono in grado di soddisfare nel breve periodo (20 anni) i consumi mondiali anche supponendo tassi di crescita economica elevata, quantunque tali opzioni siano caratterizzate (quale più, quale meno) da problemi logistici o da pericoli e rischi ambientali.

Questa temporanea disponibilità potrebbe diventare però una caratteristica *negativa* se dovesse indurre a trascurare il necessario sviluppo delle altre fonti.

Occorre fare una serie di scelte per valorizzare innanzitutto le fonti e i vettori energetici *puliti e rinnovabili*, che finora sono vissuti ai margini dello sviluppo a causa di scelte *troppo* strettamente basate sui meri costi economici.

Le scelte virtuose non sono però né facili, né automatiche. Anzi al presente si studiano correntemente (e acriticamente) scenari che assomigliano allo scenario *Pesante* da noi individuato come quello che presenta la "minor curva di emissioni di CO2" in grado di generare *con certezza* (risultando inadeguati anche i più efficaci interventi di contrasto) danni irreversibili alla biosfera.

Nel quadro dello "Sviluppo sostenibile" è necessario uno scenario in cui si punta più sulle nuove tecnologie che sui consumi tradizionali, spesso affetti da sovraconsumi.

Sprechi notevoli sono oggi in atto soprattutto nei grandi paesi consumatori, dovuti alla diffusione dei trasporti privati, dei consumi elettrici e del persistere in alcuni paesi di vecchi processi industriali energivori. Ma neanche i paesi del Terzo mondo sono immuni da sprechi.

Uno dei meccanismi negativi che bisogna *superare* è la tendenza già accennata a ripercorrere nei PVS le stesse modalità di sviluppo che già portarono negli anni '60 i paesi industriali vicini al collasso a causa del traffico e della polluzione ambientale nelle città.

6 – Scenari di emissione: “Tempestivo” e “Pesante”

La costruzione degli scenari energetici su un periodo di tempo (circa 3 secoli) confrontabile con quello impiegato a raggiungere la massima concentrazione di CO₂ in atmosfera, non può (come già ricordato) essere fatta partendo dalle consuete ipotesi sul tasso di sviluppo economico, valide quando si analizzano i consumi a breve. Piuttosto è necessario rifarsi ai consumi storici secondo quanto già detto al § 1.

Nelle previsioni si dovrà tener conto, a seconda dello scenario, di indirizzi di politica energetica che privilegiano la *riduzione delle emissioni*, oppure mirano a fornire quantità *abbondanti* di combustibili mettendo in secondo piano le preoccupazioni ambientali.

Nel primo caso si darà vita allo scenario *Tempestivo* caratterizzato da:

- *diffusione accelerata delle nuove fonti rinnovabili*
- *produzione tempestiva di idrogeno da processi carbochimici con accoppiata strategia di confinamento sicuro della CO₂*
- *ricorso limitato alle riserve non-convenzionali di petrolio (scisti, sabbie bituminose, ecc) che determinano gravi effetti ambientali*
- *strategia di confinamento sicuro della CO₂ accoppiata ai grandi impianti energetici (raffinerie, centrali elettriche, impianti carbochimici per carburanti).*

Nel secondo caso prenderà invece forma lo scenario *Pesante* caratterizzato da:

- *diffusione inerziale delle nuove fonti rinnovabili*
- *produzione di carburanti convenzionali da processi carbochimici*
- *ricorso sostenuto alle risorse non-convenzionali di petrolio e di gas con gravi effetti ambientali*
- *strategia tardiva di confinamento della CO₂ prodotta dai grandi impianti energetici.*

Tenendo presenti queste linee-guida e utilizzando i criteri di diffusione delle fonti già delineati nel § 1, si possono elaborare i summenzionati scenari di consumo. Essi vanno confrontati con le previsioni a *breve* degli operatori più qualificati (citiamo ad esempio lo scenario Shell³ e quello della Unione Europea⁷), mentre nel lungo termine il confronto va fatto con gli scenari dell'IPCC (§ 7.1).

Come già accennato, i nostri scenari di consumo dovrebbero essere sottoposti a una verifica interna di autoconsistenza, (che finora non è stato però possibile eseguire per l'inadeguatezza delle risorse). L'evoluzione dei consumi può essere infatti ottenuta anche *accoppiando* la crescita della *popolazione* delle singole aree con le serie temporali a lungo termine di *consumi procapite* (rispettivamente per lo scenario *Tempestivo* e *Pesante*) elaborate per ciascuna area, in modo indipendente, sulla base dei dati storici e degli indirizzi tecnologici di ciascun scenario.

Gli andamenti dei consumi-procapite dovranno risultare *congruenti* con la crescita economica delle aree sottosviluppate e con il continuo miglioramento delle tecnologie e dei processi produttivi, che consente *ovunque* una riduzione dei consumi, in particolare anche nei PI.

In sostanza si tratta di un procedimento di elaborazione con verifiche interne di merito sulla adeguatezza economica e tecnologica delle previsioni energetiche a lungo termine.

Una valutazione preliminare (Rif.9) ha fornito gli andamenti del consumo di energia primaria (scenari *Tempestivo* e *Pesante*) messi a confronto nella Fig.6

Dagli scenari di consumo energetico si passa ai relativi scenari delle *emissioni* di CO2 prodotta dai combustibili fossili, di cui in Fig. 7 sono date le curve.

Notiamo innanzitutto che nel *breve termine*, essendo la differenza di consumo abbastanza contenuta, non si risente un sensibile aggravio nelle emissioni.

Tuttavia nel *lungo termine* la differenza dei consumi, pur non elevata (circa 20%), unita alle *diverse modalità* di produzione e di consumo finale dell'energia, diventa *determinante* nella *divaricazione* delle emissioni tra i due scenari.

Lo scenario *Pesante* produce una curva di emissioni con un picco intorno al 2070-'80 pari a 76 Gt/a di CO2 notevolmente più alto del picco (51,5 Gt/a) dello scenario *Tempestivo*. Questa differenza rimane mediamente inalterata anche nel lungo periodo, determinando quindi un *sostanziale* aumento *nel picco* raggiunto dalla concentrazione di CO2 nello scenario Pesante.

Nella Figura 7 sono anche riportati i principali scenari elaborati dall'IPCC.

Le valutazioni comparate tra i diversi scenari sono raccolte nel § 7.1.

6.1 – Il potenziale di alterazione climatica

Per distinguere più chiaramente gli effetti sul riscaldamento globale prodotti da scenari che *inizialmente* non differiscono molto tra loro è opportuno introdurre il concetto di *potenziale di alterazione climatica* legato alla emissione *critica* definita come la “quantità di CO2 emessa in un determinato scenario da oggi al momento del picco di concentrazione in atmosfera”.

Nello scenario *Tempestivo* l'emissione critica (pari a 9.600 Gt di CO2) è uguale alla metà circa di quella dello scenario *Pesante* (18.400Gt).

Usando questa nozione, cerchiamo di analizzare uno scenario⁷ ritenuto “tranquillo” come quello studiato dalla D.G. XVII (IEPE) della UE, istituzione non particolarmente interessata all'aumento dei consumi.

Nella Tabella 5 sono riportati sinteticamente i principali parametri di questo scenario insieme con quelli dei nostri scenari.

Per calcolare la emissione critica dello scenario UE si sono prolungati nel tempo (secondo gli andamenti previsti nello scenario Pesante) i consumi al 2020 di ciascun combustibile. Questi scenari sono abbastanza simili. In ambedue è prevista al 2020 una modesta integrazione del petrolio convenzionale mediante combustibili ottenuti da scisti bituminosi e processi carbochimici.

Tabella 5 – Previsioni di consumo di combustibili fossili al 2020 secondo diversi scenari.
Confronto dei potenziali di alterazione climatica (emissione critica).

	Scenario Pesante	Scenario UE	Scenario Tempestivo
Petrolio	5300 Mtep/a	5300 Mtep/a	4200 Mtep/a
Carbone	4440 “	4000 “	3200 “
Gas naturale	3770 “	3970 “	3200 “
Nucl.+Idroel.	1500 “	1500 “	1500 “
Emissione critica	18.400 Gt (CO2)	≈17.000 Gt (CO2)	9.600 Gt (CO2)

Appare evidente dalla tabella che il potenziale di alterazione climatica dello scenario UE non è molto diverso da quello dello scenario Pesante, il quale rappresenta un livello di rischio inaccettabile.

Quale insegnamento trarre da questo confronto?

Innanzitutto bisogna ricordare che negli scenari *a breve* (come quello UE) le previsioni sono generalmente *in eccesso* poiché riposano nella convinzione che un'offerta eccessiva può essere facilmente corretta "in itinere".

Ciò è probabilmente vero finché riferito agli idrocarburi *convenzionali*, la cui estrazione può essere cambiata a piacimento entro certi limiti (vedi ruolo di compensazione dell'Arabia Saudita) secondo le esigenze del mercato o le politiche dei paesi produttori.

Quando però la previsione conduce a fare investimenti *assai impegnativi*, ai quali deve corrispondere una produzione *piuttosto rigida* (come nel caso dell'estrazione del petrolio dagli scisti o nel caso dei processi carbochimici), allora bisogna diventare molto guardinghi nelle elaborazioni poiché gli scenari, una volta imboccati, si *autoprolungano* nel tempo.

Senza voler drammatizzare, bisogna tuttavia avere il coraggio di dire che uno scenario come quello esaminato dovrebbe essere preso in considerazione solo dichiarando *contestualmente* le quantità di combustibili puliti (es. idrogeno, con relative attività di confinamento sicuro della CO₂) che si affiancheranno alla produzione di derivati petroliferi ottenuti con processi non-convenzionali.

Queste garanzie sono necessarie per mantenere una via di uscita dallo scenario *Pesante* nel caso che si manifestasse sempre più chiara la necessità di interventi di contrasto verso il cambiamento climatico.

Fig. 6 - Consumi energetici mondiali relativi a due scenari

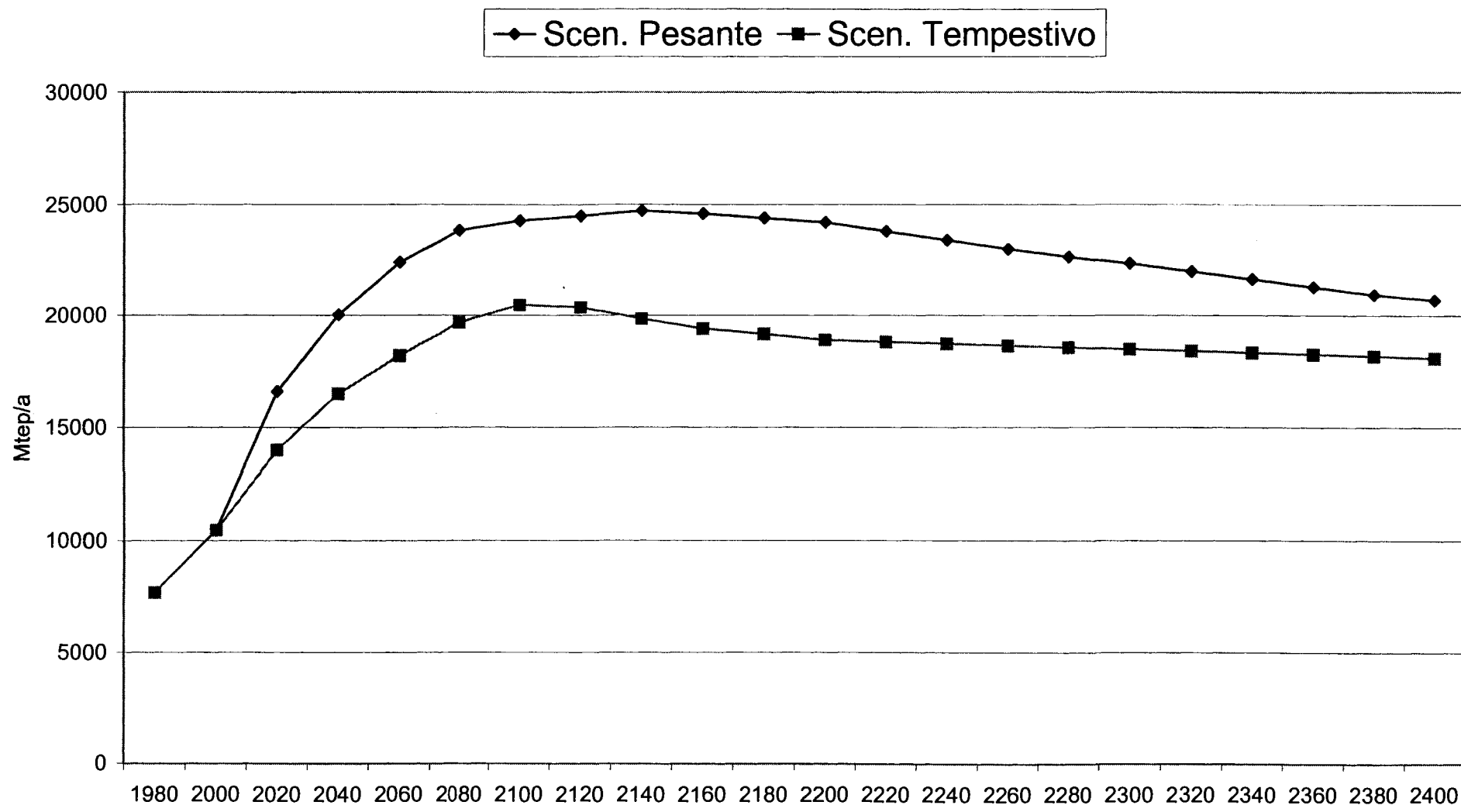
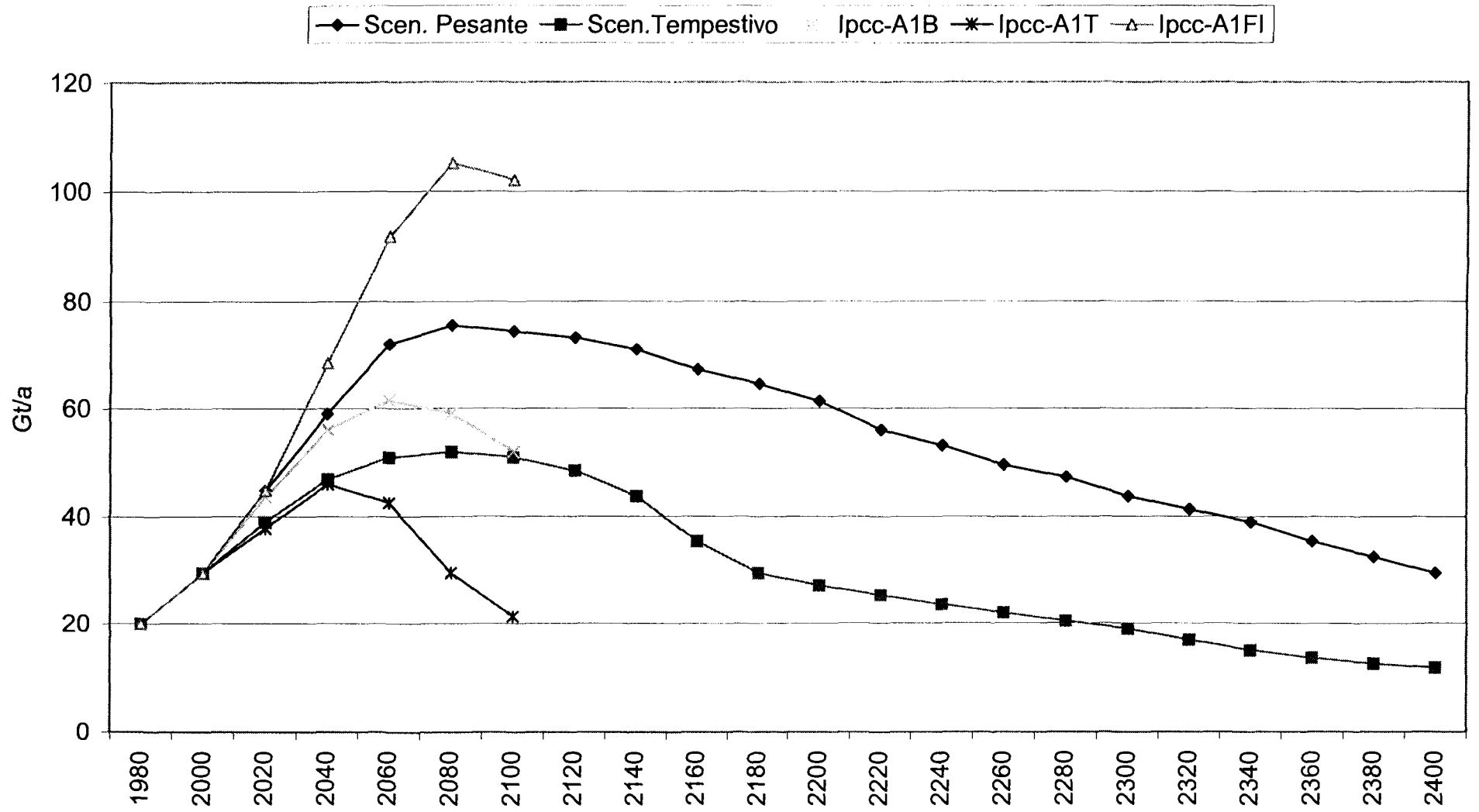


Fig. 7 - Emissioni globali di CO2 per diversi scenari



7 – Risultati delle simulazioni dell'effetto serra

Nel lavoro in Rif.9 sono state eseguite simulazioni preliminari del *radiation forcing* e del conseguente riscaldamento globale dovuto ai principali gas-serra preindustriali (CO₂, CH₄, N₂O, O₃) e ai principali gruppi di gas-serra *fabbricati dall'uomo* (CFC, HCFH, HFC, PFC, SF₆), scontando gli apporti degli aerosols (negativi) e del sole (positivi). Il modello adottato è “puntuale” con retroazioni di temperatura sul ciclo della CO₂, comprendente un modello di assorbimento negli oceani e un modello di emissione netta dal biota terrestre.

La filosofia che ha supportato questo lavoro è quella di fornire uno strumento non sofisticato, ma capace di fornire in tempi *brevi* risultati sui quali aprire un dibattito scientifico riguardo ai problemi dell'evoluzione del cambiamento climatico e dell'adozione di interventi di contrasto.

A questo proposito appare opportuna una breve osservazione sull'affidabilità delle simulazioni. Fissiamo per un momento l'attenzione sulla Fig.10 che riporta i risultati delle simulazioni contenute nel *Summary for Policymakers* dell' IPCC-WG1, recentemente approvato a Shanghai.

Sul margine destro del grafico b) sono riportati i segmenti che denotano per i diversi scenari il margine di incertezza dei valori del riscaldamento globale calcolati al 2100.

E' chiaro che ciò induce a prudenza sull'accuratezza delle simulazioni.

Tuttavia il significato generale dei calcoli è chiaro : dopo il 2100 la temperatura media del pianeta salirà ancora!

Esplorare questo “regno di nessuno” è dunque un compito delicato che va comunque eseguito.

Esaminiamo brevemente i principali risultati delle simulazioni contenute in Rif. 9.

Nel caso dello scenario *Pesante* (Fig. 8) risulta un *picco* di concentrazione di CO₂ in atmosfera (situato intorno al 2400-2500) compreso tra 1250-1340 ppm, pari a 4,5-4,8 volte il valore preindustriale. Il relativo aumento *di picco* (rispetto ad oggi) della temperatura media del pianeta risulta pari a 8,2-9,0 °C, mentre al 2100 l'aumento risulta “soltanto” di 2,5°C.

Ricordando che la temperatura della terraferma aumenta con velocità maggiore rispetto agli oceani (IPCC, *Third Assessment Report*), l'aumento di temperatura di *interesse antropico* risulta sicuramente *incompatibile*, già *molto prima* del picco, con la conservazione della biosfera entro limiti accettabili.

Anche le successive simulazioni effettuate inserendo i più efficaci *interventi di contrasto* (§ 7.2) *non* hanno portato a valori di concentrazione e di riscaldamento globale accettabili.

Nel caso dello scenario *Tempestivo* (Fig.9) il picco della concentrazione di CO₂ (situato intorno al 2300-2400) risulta compreso tra 750 e 800 ppm, con un aumento *di picco* (rispetto ad oggi) della temperatura media pari a 4,5-5,0°C, mentre alla fine del secolo l'aumento è di 2,0°C.

Sebbene anche questi valori di picco siano *inaccettabili*, è tuttavia possibile predisporre in tempo alcuni interventi globali adeguati (§ 7.2).

Sono ora necessarie due parole di commento alle simulazioni riportate nelle Figg.8 e 9.

La grande ampiezza dell'ascissa temporale non comporta assolutamente per gli autori nessuna presunzione di poter fare previsioni tanto lontane nel tempo⁹.

La parte di simulazione *che interessa non va infatti oltre il picco* di concentrazione della CO₂.

E pur assumendo questa limitazione temporale, si incontrano *sensibili incertezze* nella modellistica del ciclo del carbonio e del riscaldamento del globo. Di ciò è dato un esempio concreto riportando due curve con ipotesi lievemente differenti nel modello dell'assorbimento di CO₂ in Oceano.

Ciò premesso, ci sembra opportuno ricordare l'utilità che i risultati di queste simulazioni di lungo periodo siano *liberamente mostrati e discussi* in quanto consentono di valutare più correttamente

(all'interno di ogni determinato modello fisico della biosfera) il maggiore o minore impatto dei vari scenari di emissione e la maggiore o minore efficacia degli specifici interventi di contrasto.

Aumenta infatti il numero di coloro che si pongono l'interrogativo citato in Premessa:

“ *quando finalmente si arriverà alla definizione di una strategia globale, saremo ancora in tempo a mettere in atto i relativi interventi?* ” In sostanza, quali sono i tempi di attesa prima che i grandi interventi globali facciano sentire il loro influsso sul clima?

Una risposta esplorativa è contenuta in alcune simulazioni preliminari riportate in Rif. 9.

Consideriamo un grande intervento globale come il **confinamento sicuro** delle emissioni (o una loro **riduzione**) riguardante una frazione crescente da zero fino al 30% durante il picco di emissioni nel 2070-'80. L'intervento è stato sottoposto a simulazione partendo dalle condizioni di base dello scenario di emissioni denominato *Pesante* (Fig.8).

Se limitiamo la simulazione dell'intervento al 2100 scopriremo che esso è in grado di ridurre il ΔT a fine secolo da 2,5°C a 2,3°C.

Se invece prolunghiamo la simulazione (assumendo che il confinamento delle emissioni prosegua dopo il 2100) scopriremo che il **picco** di temperatura scenderà da 9,0°C a 5,8°C.

E' chiaro che l' **abbattimento del rischio** è molto diverso! Sulla base dei risultati al 2100 si direbbe che l'intervento sia *pressochè inutile*, mentre i risultati a lungo termine ci dicono che la biosfera passerebbe dalla *distruzione assicurata* alla *speranza di vita* (mediante applicazione di ulteriori interventi di mitigazione).

Eppure si tratta del **medesimo intervento** valutato a due date diverse.

Dunque per valutare *correttamente* gli interventi occorre fare simulazioni di lungo termine.

7.1 - Confronto con i risultati delle previsioni IPCC

Nel *Third Assessment Report (November 2000)* dell'IPCC sono riportati nella sezione “*Summary for Policymakers (WG1)*” i principali risultati delle simulazioni di previsione del riscaldamento globale.

Nella Fig. 10 sono sinteticamente mostrati gli scenari di emissione studiati recentemente nello “*Special Report on Emission Scenarios*” (SRES) e i corrispondenti aumenti della temperatura media globale risultanti dalle simulazioni.

I grafici degli scenari di emissione di CO₂ e degli aumenti medi di temperatura risultanti dalle simulazioni sono **troncati** alla data del 2100. Questa limitazione, forse suggerita dal senso di responsabilità a fronte della inadeguatezza attuale delle conoscenze sul ciclo del carbonio e sulle modalità del cambiamento climatico, **non aiuta** tuttavia i policymakers nel loro compito di estrarre dalle simulazioni le necessarie valutazioni generali che vanno a determinare gli indirizzi politici in sede del negoziato per Kyoto.

Tra gli scenari elaborati dall'IPCC (Fig.10), quelli che assumono una popolazione in continua crescita anche **dopo il 2100** (cioè gli scenari **A2, IS92a, B2**) sono basati su ipotesi ormai **obsolete** rispetto ai più recenti studi ONU sugli andamenti demografici.

Togliendo dal conto anche lo scenario **B1** che corrisponde a ipotesi troppo ottimistiche di sviluppo di tecnologie efficienti e *carbon free*, non restano che i tre scenari della famiglia **A1** (contraddistinta da una popolazione che **non cresce** più dopo il 2100), caratterizzati rispettivamente da:

- *enfasi sui combustibili fossili (A1FI)*
- *enfasi sulle fonti carbon free (A1T)*
- *bilanciamento tra le varie fonti (A1B).*

Questi scenari sono messi a confronto nella Fig. 7 con i due Scenari del presente lavoro, i quali

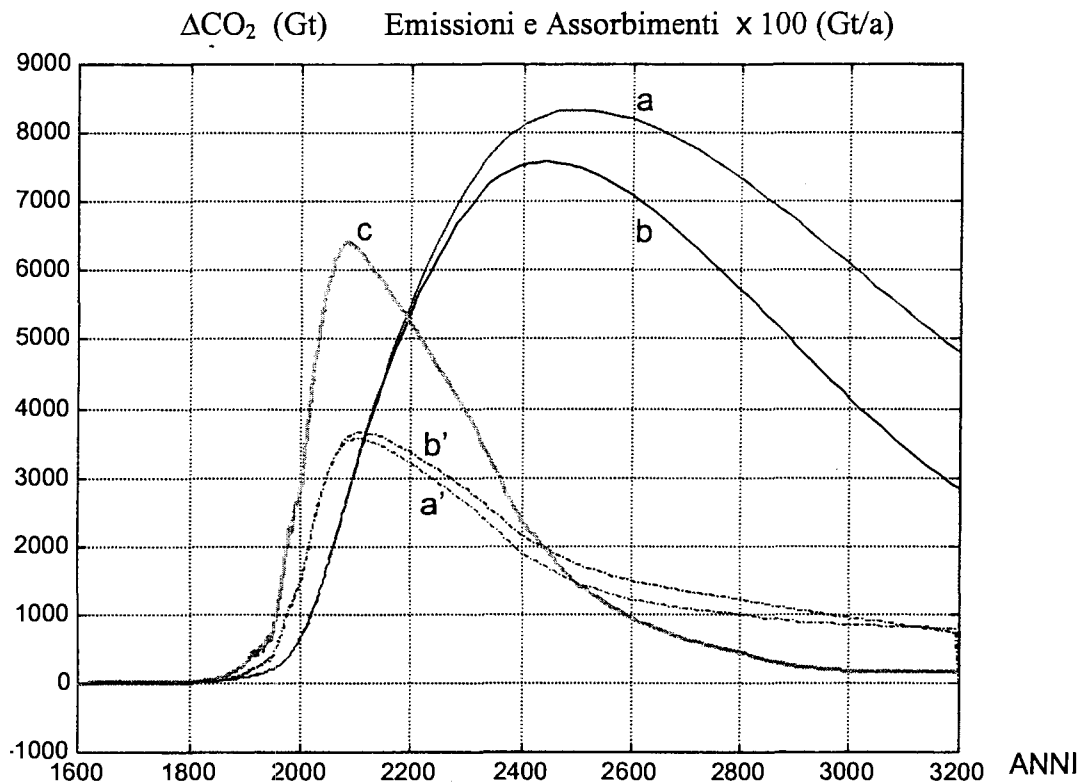
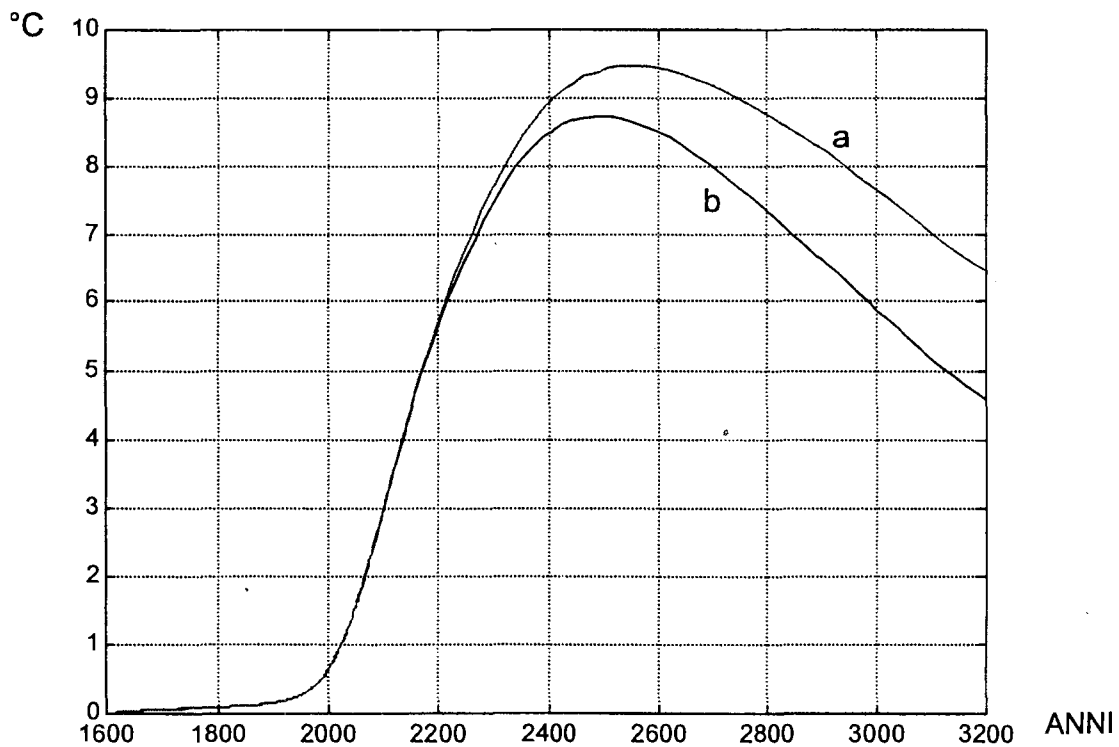


Fig. 8. Scenario 'pesante' Andamenti (a, b) dell'aumento di CO₂ in atmosfera rispetto al valore preindustriale calcolati con le ipotesi modellistiche descritte nel Rif.9. I corrispondenti assorbimenti in oceano sono raffigurati nelle curve a', b'. La curva c corrisponde alle emissioni. I valori delle curve antecedenti il 2000 corrispondono ai dati storici. Le emissioni future sono quelle previste dallo scenario **pesante**. Nel grafico sottostante è riportato l'aumento medio di temperatura globale.



ΔCO_2 (Gt) Emissioni e Assorbimenti $\times 100$ (Gt/a)

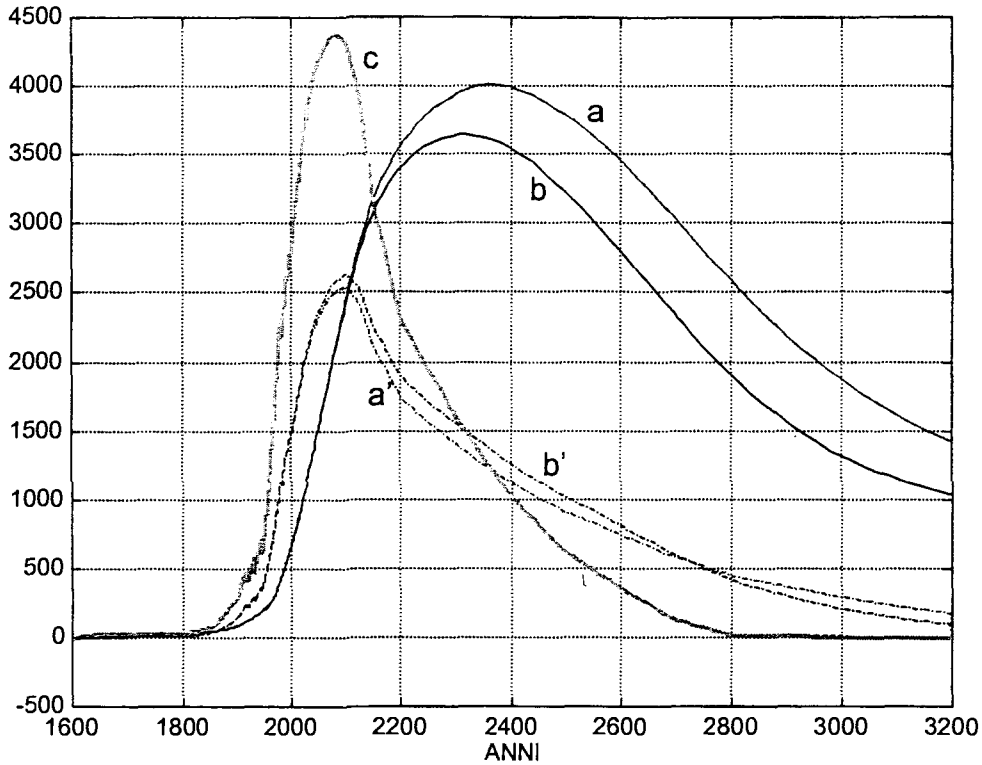
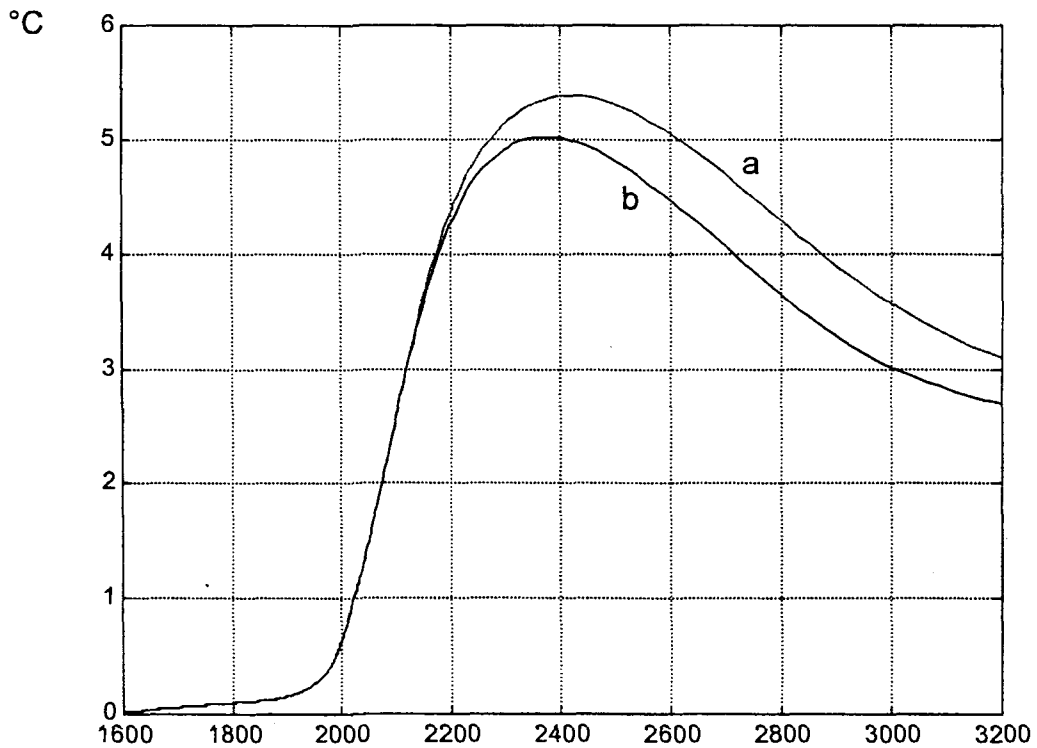


Fig. 9 - Scenario 'Tempestivo'. Andamenti (a, b) dell'aumento di CO_2 in atmosfera rispetto al valore preindustriale calcolati con le ipotesi modellistiche descritte nel Rif.9. I corrispondenti assorbimenti in oceano sono raffigurati nelle curve a', b'. La curva c corrisponde alle emissioni. I valori delle curve antecedenti il 2000 corrispondono ai dati storici. Le emissioni future sono quelle previste dallo scenario **tempestivo**. Nel grafico sottostante è riportato l'aumento medio di temperatura globale.



sono stati elaborati assumendo le seguenti ipotesi generali in accordo con i dati più recenti:

- a) aumento contenuto della popolazione mondiale fino a raggiungere un **massimo** di 9,4-9,7 miliardi alla fine del secolo (aumento del 54-59% rispetto al valore attuale)
- b) aumento del consumo energetico globale, alla stessa data, pari al 100% (scenario **Tempestivo**) oppure al 130% (scenario **Pesante**) rispetto al consumo attuale.

Pur scontando una certa difficoltà di fare valutazioni a causa del troncamento al 2100 degli scenari IPCC, va rilevato che i due scenari **A1T** e **A1B** presentano, già a partire dal 2040-2060, una caduta di emissioni **troppo marcata** in relazione ai tempi di cambiamento dei sistemi energetici.

A nostro avviso, pertanto, essi possono condurre a **sottovalutazioni** del riscaldamento globale a lungo termine.

Viceversa lo scenario **A1FI** presenta un **elevato** picco di emissione nel 2080, pari addirittura a 3,8 volte il valore attuale, che non trova probabilmente riscontro nelle reali capacità di estrazione e approvvigionamento di combustibili fossili, nonché negli elevati costi ambientali!

In questo quadro, lo scenario **Tempestivo** appare (Fig.7) come una **sintesi** degli scenari **A1B** e **A1T**. Nel lungo termine questa sintesi diventa più credibile (per le ragioni sopra dette) dei singoli scenari.

Lo scenario **Pesante** appare come una **sintesi** degli scenari **A1FI** e **A1B**, anch'essa più credibile, nel lungo termine, dei singoli scenari.

A conclusione di queste brevi note riteniamo di poter confermare che lo scenario **Pesante** si presenta come quello corrispondente alla **più bassa** curva di emissioni che presenta con certezza rischi **inaccettabili**.

Viceversa lo scenario **Tempestivo** corrisponde alla curva di emissioni che uno scenario tecnologico **avanzato deve mettere in conto** per consentire realisticamente la necessaria diffusione dello sviluppo economico nel mondo. Su questa curva è possibile intervenire con successo per ridurre i rischi a livelli accettabili.

7.2 - Simulazione di alcuni interventi di contrasto

Utilizzando come base le simulazioni degli scenari **Tempestivo** e **Pesante**, sono state effettuate simulazioni con inserimento negli scenari di emissione dei seguenti interventi scelti tra i più efficaci:

- 1 - strategia di **confinamento sicuro** della CO₂ capace di sequestrare il 30% del picco di emissione intorno al 2070-2080
- 2 - intervento di **riforestazione globale** capace di ripristinare in 60 anni 13,5 milioni di Km² di foreste distrutte, come indicato da Woodwell; questo intervento produce anche un prezioso assestamento del ciclo idrologico con benefici effetti sul clima
- 3 - intervento di **messa al bando**, a tempo debito, dei gas tecnologici climalteranti utilizzati nei cicli frigoriferi, negli aerosol, nei solventi, nelle schiume isolanti, ecc.
- 4 - interventi di riduzione delle emissioni **antropiche di metano**.

Rimandando al citato Rapporto Tecnico ENEA (Rif. 9) per maggiori particolari, è sufficiente ricordare che nello scenario **Pesante** l'applicazione in sequenza di tutti i suddetti interventi **non** è risultata sufficiente a ridurre il picco di concentrazione di CO₂ e di aumento di temperatura a valori accettabili.

Nel caso dello scenario **Tempestivo** il picco di CO₂ risulta ridotto mediante i primi due interventi al valore di 550-560 ppm, ritenuto generalmente accettabile e considerato dalla UE come un obiettivo da conseguire (Rif.11).

Lo stesso risultato si può all'incirca ottenere (rinunciando però al citato assestamento del ciclo idrologico) eseguendo il primo e il terzo intervento.

Infine gli interventi sulle emissioni di metano di origine antropica debbono essere *comunque* fatti per riequilibrare le possibili emissioni dovute al parziale disgelo, causato dal riscaldamento globale, del permafrost (nel quale sono contenute grandi quantità di metano sotto forma di idrati) presente nel terreno delle tundre artiche.

Non si è tenuto conto, per il momento, delle emissioni di questo gas (stimate pari a circa 1% delle emissioni totali) provenienti dagli idrati di metano presenti in quantità enormi nei fondali oceanici. Secondo alcuni studiosi il fenomeno va tenuto sotto osservazione perché in seguito le emissioni potrebbero aumentare a causa di fenomeni di liquefazione degli idrati (instabili) con forte emissione di metano. Il fenomeno sembra in relazione ai repentini cambiamenti di clima, studiati da G. Dickens⁸, avvenuti in passato.

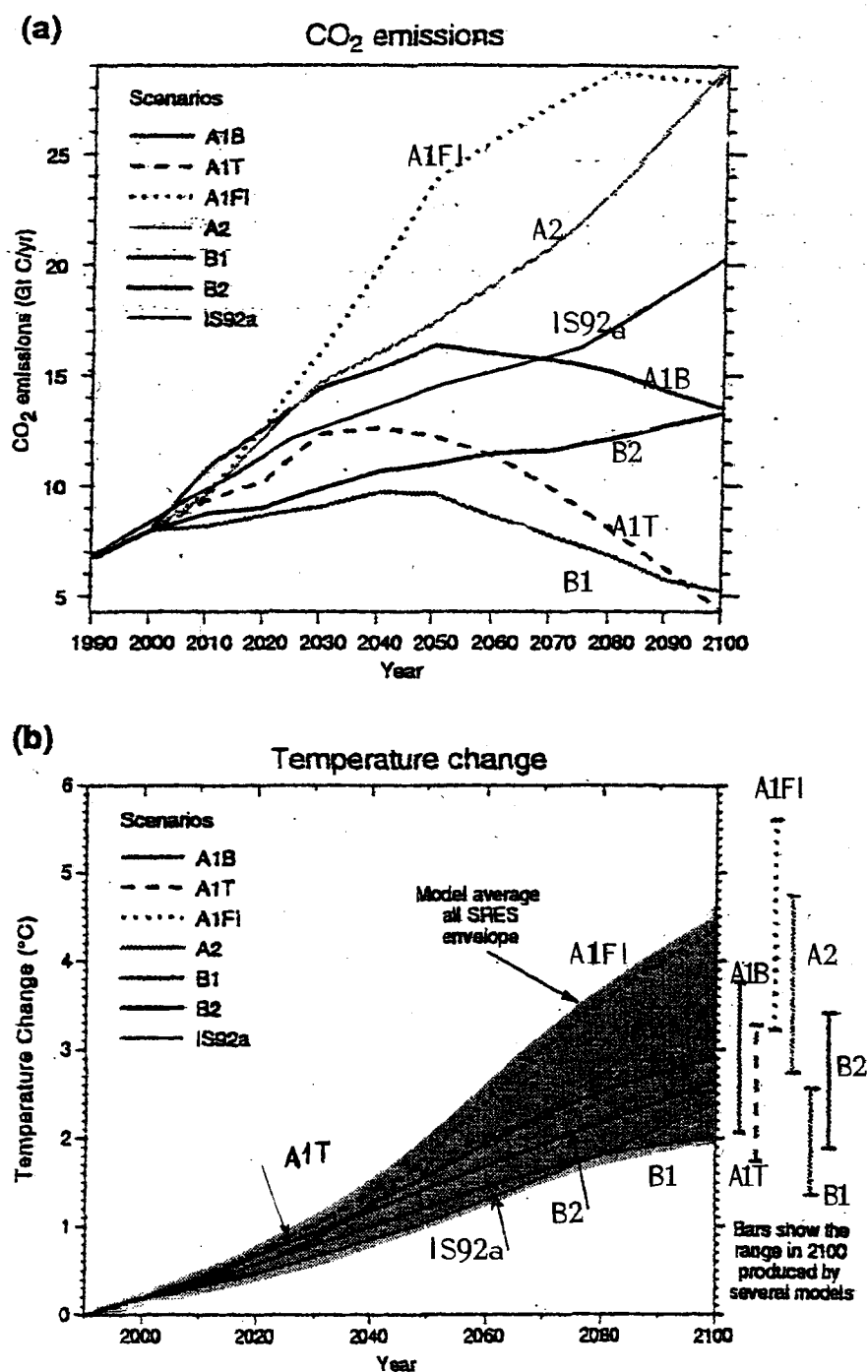


Fig.10 – La figura mostra le emissioni globali di CO₂, relative a 6 scenari studiati in ambito IPCC nel recente “Special Report on Emission Scenarios”(SRES), messe a confronto con lo scenario IS92a già elaborato nell’ambito del *Second Assessment Report-IPCC* (1995). Gli scenari del gruppo A1 descrivono una situazione di crescita contenuta della popolazione mondiale, con sviluppo economico elevato e relativi consumi energetici caratterizzati nei seguenti scenari: A1FI = enfasi sulle fonti fossili; A1T = enfasi sulle fonti *carbon free*; A1B = bilanciamento tra le varie fonti.

Lo scenario A2 descrive una popolazione mondiale in continua crescita dopo il 2100 con sviluppo economico accentrato (e quindi rallentato) su base regionale in ossequio a politiche di autosostentamento e preservazione delle identità etniche.

Lo scenario B1 assume lo stesso andamento di popolazione dello scenario A1, ma con un rapido cambiamento delle strutture verso un’economia di servizi (bassi consumi) con introduzione accelerata di nuove tecnologie efficienti e *carbon free*.

Lo scenario B2 assume una popolazione in continua crescita (sebbene meno accentuata che nello scenario A2), sviluppo economico intermedio e cambiamenti tecnologici meno rapidi con ricerca di soluzioni sostenibili su base regionale.

Riferimenti

- 1 – IPCC - Working Group 1 - *Third Assessment Report* – November 2000
- 2 – F. Biermann
“*The Case for a World Environment Organization*”
Environment , V.42, N.9, November 2000
- 3 – “*World Energy Use: Sustained Growth 1860 – 2100*”
Shell Group Planning – < shell.com/rw-br/ >
- 4 - “*Rapporto sullo sviluppo del Mondo nel periodo 2000-2001*”
Banca Mondiale – Washington D.C.
- 5 - G.Marland. et al.,
“*Global CO2 emissions from fossil fuel burning, cement manufacture and gas flaring*”- CDIAC, Oak Ridge National Laboratory - March 1999
- 6 - “Enciclopedia Geografica Garzanti” - (Novembre 1995)
- 7 - K.Leydon
“*World Energy projections, uncertainties and key challenges*”
DG XXVII - Shared Analysis Project – Final Symposium
‘Community Energy Policy for 21st Century’- Brussels, November 1999
- 8 - E. Suess et al. “*Flammable ice*”- Scientific American, November 1999
- 9 – M.Michelini, G.Giuli, G.Izzo, V.Pignatelli
“*Un Modello puntuale per la simulazione dell’effetto serra in relazione a due scenari di emissione di CO2, con alcuni interventi di limitazione dei gas serra*”
ENEA - RT/ERG/2000/1 – Giugno 2000
- 10 – “*Energia, Ambiente, Innovazione*”
ENEA – Anno 46, Giugno 2000
- 11 – “*UK Climate Change Report*” commissioned by J. Prescott, Secretary of State
for the Environment – January 2001

Edito dall' **ENEA**
Unità Comunicazione e Informazione
Lungotevere Grande Ammiraglio Thaon di Revel, 76 - 00196 Roma
Sito Web <http://www.enea.it>
Stampa Laboratorio Tecnografico - C.R. Frascati
Finito di stampare nel mese di giugno 2001