

Barry Commoner

Il costo ambientale dello sviluppo economico

Ecologia, 2, (5/6), 3-17 (luglio 1972).

L'ambiente viene definito come un sistema comprendente gli esseri viventi sulla terra e la sottile pellicola globale di aria, acqua e terreno che ne costituisce l'habitat. Questo sistema, l'ecosfera, è il prodotto dell'evoluzione congiunta e interconnessa degli esseri viventi e dei costituenti fisici e chimici della superficie terrestre. Nella scala temporale della vita umana lo sviluppo evolutivo dell'ecosfera è insostituibile: se il sistema dovesse essere distrutto non potrebbe essere ricostituito o sostituito sia con processi naturali che con qualsiasi sforzo umano.

L'elemento funzionale basilare dell'ecosfera è il ciclo ecologico, in cui ogni elemento separato influenza il comportamento del resto del ciclo ed è a sua volta influenzato da esso. Per esempio nelle acque di superficie i pesci eliminano rifiuti organici che vengono trasformati dai batteri in prodotti inorganici; a loro volta questi ultimi sono prodotti nutritivi per la crescita delle alghe; le alghe vengono mangiate dai pesci ed il ciclo è completo. Questo processo ciclico effettua l'autodepurazione del sistema ambientale, in quanto i rifiuti prodotti in uno stadio del ciclo diventano la materia prima necessaria per lo stadio successivo.

Questi cicli sono autoregolati ciberneticamente, mantenendo dinamicamente una condizione di stato costante di durata indefinita. Tuttavia, posto sotto una sollecitazione sufficiente da un fattore esterno il suddetto ciclo può superare i limiti dei processi di autoregolazione ed infine crollare. Così se il ciclo idrico è sovraccarico di rifiuti animali organici, la quantità di ossigeno necessaria a sostenere la decomposizione dei rifiuti da parte dei batteri decompositori può essere maggiore dell'ossigeno disponibile nell'acqua. Il livello di ossigeno si riduce quindi a zero; mancando dell'ossigeno necessario i batteri muoiono e questa fase del ciclo si ferma, arrestando il ciclo del tutto.

Evidentemente c'è un limite intrinseco al ritmo di ricambio degli ecosistemi locali e dell'ecosistema globale in toto. Gli esseri umani dipendono dall'ecosfera non solo per le loro esigenze biologiche - ossigeno, acqua, alimenti - ma anche per le risorse che sono essenziali alle loro attività produttive. Queste risorse, insieme con i minerali del sottosuolo, costituiscono il fenomeno insostituibile ed essenziale di tutte le attività umane. Se consideriamo i processi economici come il mezzo che amministra l'eliminazione e l'utilizzazione delle risorse disponibili alla società umana, allora la disponibilità continua di quelle risorse che vengono ottenute dall'ecosfera, cioè le risorse non minerali, e quindi la stabilità dell'ecosistema, è un requisito essenziale per il successo di qualsiasi sistema economico. Più semplicemente, qualsiasi sistema economico che spera di sopravvivere deve essere compatibile con la continua funzionalità dell'ecosistema.

Poiché il ritmo di ricambio di un ecosistema è intrinsecamente limitato, c'è un limite corrispondente al ritmo di produzione di qualsiasi suo costituente. Diversi segmenti dell'ecosistema globale - cioè terreno, acque dolci, ecosistemi marini - funzionano a diversi ritmi intrinseci di ricambio e quindi differiscono nei limiti di produttività. In basi puramente

teoriche va da sé che ogni sistema economico che sia costretto, per le sue proprie esigenze di stabilità, a crescere aumentando costantemente il ritmo con cui estrae ricchezza dall'ecosistema deve infine condurre l'ecosistema ad uno stato di collasso. Il calcolo dei limiti di ritmo dell'ecosistema globale o di qualsiasi parte principale di esso sono tuttora in uno stato del tutto primitivo.

A parte il precedente limite teorico e tuttora non specificato alla crescita economica, tale limite può insorgere molto più rapidamente se la crescita del sistema economico dipende da attività produttive che risultano particolarmente distruttive ai fini della stabilità dell'ecosistema. A differenza di tutte le altre forme di vita, gli esseri umani sono in grado di esercitare effetti ambientali che si estendono, sia quantitativamente che qualitativamente, molto al di là dell'influenza esercitata come organismi biologici. Le attività umane hanno introdotto anche nell'ambiente non solo tensioni intense dovute a fattori naturali (come i rifiuti corporali) ma anche sostanze del tutto nuove che non si trovano nei processi ambientali naturali - radioisotopi artificiali, detersivi, pesticidi, sostanze plastiche, vari metalli e gas tossici, e una gamma di sostanze di sintesi prodotte dall'uomo. Queste intrusioni umane hanno spinto al di fuori dell'equilibrio segmenti principali dell'ecosistema. L'inquinamento ambientale è il sintomo della rottura risultante dei cicli ambientali.

Il problema

Al fine di valutare il costo dello sviluppo economico in termini del deterioramento ambientale risultante è naturalmente necessario definire entrambi i termini, se possibile, entrambi i termini in dimensioni quantitative che possano dare una descrizione della loro correlazione. La definizione di sviluppo economico sembrerebbe qui applicabile, l'aumento di merci generato dall'attività economica. Il deterioramento ambientale è un concetto più allusivo. Sulla scorta della discussione precedente può essere definito come quelle alterazioni degradative negli ecosistemi che costituiscono l'habitat di qualsiasi forma di vita sul pianeta. Il problema è di descrivere le suddette modificazioni ecologiche in termini che possono essere riferiti, quantitativamente se possibile, ai processi dello sviluppo economico - cioè all'aumento di produzione di beni economici.

Per iniziare possiamo annotare la natura di autoregolazione degli ecosistemi: è questa proprietà che ne assicura la stabilità e la continua attività: questa proprietà basilare aiuta a definire sia il processo di degradazione ecologica che la natura dei fattori che lo possono provocare. Possiamo definire la degradazione ecologica o ambientale come il processo che porta ad uno stato di tensione un ecosistema, tanto da ridurre la capacità di autoregolazione, e che quindi se continuata, può imporre una tensione irreversibile al sistema e provocarne il collasso.

Un fattore che sia in grado di esercitare il suddetto effetto su un ecosistema deve essere originato al di fuori del sistema. Ciò deriva dalla natura ciclica dell'ecosistema che provoca automaticamente, il riaggiustamento del sistema a qualsiasi variazione interna nel numero o nell'attività di ognuno dei suoi normali costituenti biologici. Questo perché ciò che caratterizza il comportamento di un costituente che fa parte di un ciclo ecologico è il fatto che sia influenzato sia viene influenzato dal resto del ciclo. Per esempio, i rifiuti organici prodotti dai pesci in un ecosistema acquatico chiuso, come un acquario in equilibrio, non possono degradare il sistema poiché i rifiuti vengono trasformati in sostanze nutritive delle alghe e si spostano semplicemente attraverso il ciclo ecologico ritornando ai pesci. Per contro, se i rifiuti organici invadono lo stesso ecosistema dall'esterno, è certo che verrà accelerato il ritmo

di ricambio del ciclo e, se ciò avviene in un modo sufficientemente intenso, tutto l'ossigeno disponibile sarà consumato portando il ciclo ad un arresto.

Le variazioni interne di un ecosistema in risposta ad una forza esterna sono processi complessi e non lineari, che non sono facilmente riconducibili a semplici indici quantitativi. L'ecosistema acquatico è uno dei relativamente pochi casi in cui ci si può avvicinare, in qualche misura a questo fine - in quanto la tensione dell'ossigeno è un indicatore interno sensibile dell'avvicinamento del sistema all'instabilità. Tuttavia, nella maggior parte dei casi tali misure interne dello stato di un ecosistema non sono ancora state chiarite. Quindi, quale espediente pratico ma, si spera, solo temporaneo, occorre rifarsi alla misura dell'impatto sull'ecosistema di un fattore degradativo interno, espressa come indice di qualità ambientale.

Questo espediente ha il potere di consentire il confronto quantitativo tra gli effetti di impatti ecologici di diversa origine, argomento di particolare importanza in merito alla loro relazione con i processi economici. Più tardi, quando si saranno rese disponibili le necessarie informazioni ecologiche, i dati in questione potranno essere riferiti alle variazioni interne risultanti.

Così, in questo articolo il costo ambientale di un determinato processo economico sarà rappresentato dal suo impatto ambientale, un termine che ha le dimensioni della quantità di fattore esterno all'ecosistema che, per intrusione nello stesso, tende a degradare il potere di autoregolazione del sistema stesso.

Interessandoci degli eventuali impatti ambientali che possono derivare dall'attività umana, ci imbattiamo in una situazione alquanto complicata a causa della funzione speciale degli esseri umani sulla terra. In un certo senso gli esseri umani sono semplicemente degli altri animali nell'ecosistema terrestre che consumano ossigeno e alimenti organici e producono anidride carbonica, rifiuti organici, calore e aumentano di numero. In questa funzione, l'essere umano è una parte costitutiva di un ecosistema e quindi secondo la definizione precedente non esercita alcun impatto ambientale su di esso. Tuttavia, una popolazione umana esercita un impatto ambientale zero finché fa parte di un ecosistema come avviene, per esempio, quando gli alimenti vengono acquisiti dal terreno che riceve i rifiuti organici della popolazione. Una popolazione è separata da questo ciclo, per esempio, nell'insediamento cittadino in cui i rifiuti vengono immessi con o senza trattamento nelle acque di superficie. Allora la popolazione non fa più parte dell'ecosistema del terreno ed i rifiuti diventano esterni al sistema acquatico nel quale vengono immessi: si genera così un impatto ambientale che porta all'inquinamento idrico.

Sulla scorta di queste considerazioni la gente - considerata semplicemente come organismo biologico - genera un impatto ambientale solo nella misura in cui viene separata dall'ecosistema a cui appartengono in natura gli animali terrestri come, naturalmente, avviene, quasi universalmente negli Stati Uniti. L'intensità di questo impatto ambientale è generalmente proporzionale all'entità della popolazione.

Tutti gli altri impatti ambientali sono generati non dalle attività biologiche umane, ma dalle attività produttive umane e sono quindi regolati da processi economici. Tali impatti possono essere generati in più modi diversi. Per prima cosa, certi guadagni economici possono essere ottenuti da un ecosistema sfruttandone la produttività biologica. In questi casi, un costituente dell'ecosistema che ha valore economico - per esempio la messe agricola, il legname o il pesce - viene tolto dall'ecosistema nella misura in cui la sostanza o un conveniente sostituto

ritirato dal sistema non ritorna all'ecosistema da cui è stata tolta, costituisce su quel sistema un drenaggio che non può continuare all'infinito senza provocarne il collasso. Esempi di tali effetti sono l'erosione distruttiva del terreno in seguito a sfruttamento eccessivo e l'incipiente distruzione dell'industria baleniera a causa dell'estinzione delle balene.

Lo stress ambientale può anche derivare da un'intrusione di segno opposto - cioè la quantità di qualche componente dell'ecosistema viene aumentata dal di fuori: ciò può avvenire sia allo scopo di eliminare dei rifiuti o al fine di accelerare il ritmo di ricambio del sistema e di aumentarne la resa.

Esempi di questi effetti sono l'intrusione dei liquami nelle acque di superficie e l'intenso impiego di fertilizzanti azotati in agricoltura. In quest'ultimo caso, in seguito ad una riduzione dell'azoto disponibile dal deposito naturale di sostanze nutritive nel terreno (il suo humus organico) a causa di un periodo di supersfruttamento attraverso il prelievo non compensato di messi, cioè uno stress del tipo sopra descritto, il livello dei nitrati viene artificialmente aumentato aggiungendo dei fertilizzanti al ciclo ecologico del suolo. A causa della scarsa efficienza di fissazione delle sostanze nutritive da parte delle radici delle piante, che a sua volta risulta dalla quantità inadeguata di ossigeno nel terreno dovuta alla diminuzione di porosità che deriva dal ridotto contenuto di humus, una notevole quantità di fertilizzante sfugge dal terreno nelle acque di superficie - dove diviene uno stress esterno all'ecosistema acquatico, provocando una crescita eccessiva di alghe e la rottura risultante del ciclo acquatico di autodepurazione.

A parte gli stress di cui sopra - che rappresentano l'impatto di concentrazioni alterate dall'esterno di costituenti naturali degli ecosistemi - l'impatto ambientale può essere dovuto all'intrusione nell'ecosistema di una sostanza completamente estranea.

Per esempio il DDT esercita un potente impatto ambientale in parte poiché sconvolge facilmente relazioni ecologiche naturalmente equilibrate tra gli insetti parassiti, le piante che essi attaccano e gli insetti che a loro volta sono predatori dei parassiti, per cui spesso ne derivano esplosioni di forme parassitarie da DDT. In generale esiste un notevole pericolo di inquinamento ambientale ogni qualvolta l'attività produttrice introduce sostanze estranee all'ambiente naturale. Consideriamo ora il problema pratico della valutazione del costo ambientale dello sviluppo economico. Si è già fatta allusione all'aspetto teorico più generale di questo problema. Dato che l'ecosistema globale è chiuso e che la sua integrità è essenziale al funzionamento continuo di ogni sistema economico concepibile, deve esistere un limite superiore allo sviluppo di attività produttiva sulla terra.

Tuttavia, la suddetta affermazione teorica costituisce difficilmente una guida efficiente in senso pratico. La principale ragione è che la teoria non riesce a specificare la scala di tempo in cui è probabile abbia effetto la limitazione ecologica allo sviluppo economico. Ciò perché, si può assicurare la verità di un tale teorema astratto - per esempio che lo sviluppo economico sarà in fine limitato dall'estinzione del sole - e trascurarne le conseguenze pratiche a causa della scala di tempo piuttosto lunga implicata, in questo caso alcuni miliardi di anni.

Su queste basi sembrerebbe utile rendere il problema più concreto esaminando la correlazione tra sviluppo economico e impatto ambientale nel mondo reale. E poiché lo sviluppo è naturalmente un processo che dipende dal tempo, risulta valido proporre un approccio storico.

Origini degli impatti ambientali

Tabella 1. Aumenti postbellici nelle emissioni di inquinanti.

(*) Dimensioni NO x (ppm) x consumo di benzina (gall. x 10⁻⁶); valutati in base al prodotto del consumo di benzina per autoveicolo privato e delle ppm di NO, emesse da motori con rapporto medio di compressione 5,9 (1846) e 9,5 (1967) in condizioni di esercizio ad una

Inquinante	Anno	Produzione annua quantità	Anno	Quantità	Aumento (%)
Azoto dai fertilizzanti	1949	0,91 x 10 ⁶ t	1968	6,8 x 10 t	648
Pesticidi organici	1950	286 x 10 ⁶ lb	1967	1050 x 10 lb	267
Fosforo dai detersivi	1946	11 x 10 ⁶ lb	1968	214 x 10 ⁶ lb	1845
Piombo tetraetile **	1946	0,048 x 10 ⁶	1967	0,25 x 10 ⁶ t	415
Ossidi d'azoto **	1946	10,6 *	1967	77,5 *	630
Bottiglie di birra	1950	6,5 x 10 ⁶ lordo	1967	45,5 x 10 ⁶ lordo	595

pressione di 15 pollici al collettore.

(**) Emissioni degli autoveicoli.

Il comitato sulle alterazioni ambientali dell'«American Association for the Advancement of Science», in collaborazione con Corr e Stamler, ha tentato di descrivere le origini degli impatti ambientali negli Stati Uniti (1). Qui si descrivono i risultati dei loro lavoro iniziale. La maggior parte dei problemi di inquinamento negli Stati Uniti sono di origine relativamente recente. Il periodo postbellico, 1945-1946, costituisce un conveniente banco di prova poiché un certo numero di inquinanti - radioisotopi, detersivi, sostanze plastiche, pesticidi ed erbicidi di sintesi prodotti dall'uomo - sono dovuti all'insorgenza, dopo la guerra, di nuove tecnologie produttive. I dati statistici disponibili negli Stati Uniti per questo periodo offrono l'opportunità di confrontare le variazioni di livelli di vari inquinanti con le attività concorrenti del sistema produttivo statunitense riferibili agli effetti ambientali. Nonostante manchiamo di dati sufficientemente estesi sui livelli ambientali reali della maggior parte degli inquinanti, qualche stima delle variazioni storiche può essere fatta in base ad osservazioni intermittenti e ai dati calcolati sulle emissioni di inquinanti dalle loro origini.

Alcuni dei dati disponibili sono compendati nella tabella 1 che indica che dal 1946 le emissioni di inquinanti sono aumentate dei 200-2000 %. Per i fosfati, che sono degli inquinanti delle acque superficiali e provengono per lo più dai liquami comunali, sono disponibili dati sulla tendenza a lungo termine (2).

Nel periodo di trent'anni dal 1910 al 1940 il gettito di fosforo dai liquami comunali aumentò gradualmente da circa 17 Mlba⁻¹ (milioni di libbre all'anno) a circa 40 Mlba⁻¹; quindi il ritmo di aumento salì rapidamente cosicché nel periodo di 30 anni dal 1940 al 1970 il gettato di fosforo è aumentato a circa 300 Mlba⁻¹.

Va notato che questi sono dati riguardanti l'emissione calcolata di inquinanti e che quindi non sono necessariamente descrittivi delle loro concentrazioni effettive nell'ambiente o dei loro

effetti definitivi sugli ecosistemi o sulla salute umana. Tra l'immissione di un inquinante nell'ecosistema e la comparsa del suo effetto biologico possono intervenire numerosi processi complessi, in relazione reciproca tra loro. Inoltre, due o più inquinanti possono interamente sinergicamente intensificare gli effetti separati. La maggior parte di questi processi sono tutt'ora troppo scarsamente compresi per consentirci di convertire la quantità di un inquinante che entra in un ecosistema in una valutazione quantitativa dei suoi effetti degradativi. Ciò non di meno va da sé che i suddetti effetti sono notevolmente aumentati, in concomitanza con il rapido aumento dei livelli degli inquinanti, dal 1946. Poiché l'emissione di inquinanti è una misura diretta dell'attività alla fonte, essa rappresenta un utile mezzo per valutare i contributi di diverse fonti alla degradazione globale dell'ambiente.

Se definiamo impatto ambientale (I) la quantità di un dato inquinante introdotto annualmente nell'ambiente, possiamo riferire questo valore agli effetti dei tre maggiori che potrebbero influenzarlo con la seguente equazione::

$$I = \text{popolazione} \times \frac{\text{bene economico}}{\text{popolazione}} \times \frac{\text{inquinante}}{\text{bene economico}}$$

Il termine popolazione si riferisce all'entità della popolazione degli Stati Uniti in un dato anno, bene economico, alla quantità di una determinata merce prodotta (o nel caso specifico consumata) durante quel determinato anno e inquinante si riferisce alla quantità di un inquinante specifico (definito come sopra) ceduto all'ambiente a causa della produzione o del consumo della merce in gioco durante quel determinato anno. Questa relazione ci consente di valutare il contributo di tre fattori all'impatto ambientale totale:

- a) l'entità della popolazione P,
- b) la produzione o il consumo pro capite cioè l'"affluenza»,
- c) l'impatto ambientale, cioè la quantità di inquinante generata per unità di produzione o di consumo che riflette la natura della tecnologia produttiva.

Poiché siamo interessati all'identificazione delle fonti degli aumenti acuti negli impatti ambientali che si sono sperimentati dal 1946 in avanti, è interessante esaminare le variazioni concorrenti nelle attività produttive della nazione.

I dati più generali relativi alle suddette variazioni sono presentati in Fig. 2. Nel periodo 1946-1968 la popolazione degli Stati Uniti aumentò ad un ritmo approssimativamente costante di circa il 42 %; il GNP (adeguato al dollaro 1958) aumentò esponenzialmente di circa il 126 %; il GNP pro capite aumentò pure, approssimativamente in forma esponenziale, di circa il 59 %.

Possiamo rilevare subito che, in prima approssimazione, il contributo dell'incremento demografico ai valori globali degli impatti ambientali generati dal 1946 è dell'ordine del 40 %. Nella maggior parte dei casi, ciò rappresenta un contributo relativamente piccolo all'impatto ambientale totale poiché, come si è indicato in Tabella 1, questi valori aumentarono del 200-2000 % durante quel periodo.

Al fine di valutare gli effetti dei fattori rimanenti è utile esaminare i ritmi di crescita di diversi settori dell'economia produttiva. A questo scopo si è scelta una serie di attività produttive che, come è probabile, possono aver contribuito significativamente all'impatto ambientale e sono termini rappresentativi del quadro globale dell'economia. Dalla produzione annua (o, dove risulta più opportuno, dai consumi annui) degli Stati Uniti in toto si sono calcolati i tassi percentuali annui di aumento o diminuzione. I risultati di questi calcoli sono

presentati in Fig. 3, da cui è possibile derivare alcune utili generalizzazioni sul quadro dello sviluppo economico statunitense. Le attività produttive rientrano in tre gruppi principali.

Per prima cosa, produzione e consumo di certe merci sono aumentate ad un ritmo annuo circa uguale al ritmo annuo di aumento della popolazione, cosicché la produzione pro capite rimane sostanzialmente inalterata. Di questo gruppo fanno parte alimenti, tessuti e vestiario, le principali suppellettili domestiche, alcuni metalli e materiali da costruzione di importanza basilare, compresi acciaio e rame, e i mattoni.

In effetti, per queste necessità vitali basilare l'affluenza media è rimasta sostanzialmente inalterata. Secondariamente, la produzione annua di certe merci è diminuita dal 1946 o è aumentata ad un ritmo annuo al di sotto di quello demografico.

L'energia prodotta dagli animali di fatica è il caso estremo, con un tasso di declino annuo di circa il 10%. Altri articoli che appartengono a questa categoria sono il grasso saponificabile, le fibre di cotone, le fibre di lana, il legname, il latte, l'energia consumata dai trasporti ferroviari e le merci trasportate per ferrovia. Queste sono merci che sono state significativamente sostituite nel corso dello sviluppo globale dell'economia. È anche in declino la superficie di terreno coltivato.

In terzo luogo vi sono le attività produttive che sono aumentate ad un ritmo annuo superiore a quello presentato dall'incremento demografico. Alcune delle attività produttive in rapido aumento sono termini sostitutivi delle attività che presentano un tasso di declino in rapporto alla popolazione. Esse rappresentano generalmente la sostituzione tecnologica di un vecchio processo da un altro più recente, con la somma di merci prodotte che rimane sostanzialmente costante pro capite o aumenta. Questi processi di sostituzione riguardano: la sostituzione delle fibre naturali (cotone e lana) con le fibre sintetiche; del legname con la plastica; del sapone con i detersivi; dell'acciaio con l'alluminio e il cemento; del trasporto delle merci per ferrovia con il trasporto su camion; il terreno coltivato con fertilizzanti; le bottiglie con vuoto restituibile da quelle con vuoto a perdere.

Altre delle attività in rapido sviluppo evidenti in Fig. 3 sono conseguenze secondarie dei processi di sostituzione. Così la situazione dei prodotti naturali con quelli sintetici comporta l'impiego di quantità crescenti di sostanze chimiche organiche di sintesi, cosicché questa categoria ha presentato un aumento nettissimo. Inoltre, poiché molte sintesi organiche abbisognano del cloro come reagente il ritmo di produzione del cloro è pure rapidamente aumentato. E poiché il cloro viene efficientemente prodotto in una cella elettrolitica a mercurio, l'impiego del mercurio a questo scopo è aumentato ad un tasso notevolissimo. Analogamente, il tasso in rapido aumento dell'utilizzazione di energia è, in parte, una conseguenza secondaria di alcuni processi di sostituzione poiché alcune delle nuove tecnologie consumano più energia delle tecnologie che sostituiscono.

Vi è un terzo gruppo distinguibile fra le attività produttive in rapida crescita (Fig. 3). Non vi sono né sostituzioni di più vecchie tecnologie né sequele a queste sostituzioni, ma incrementi reali nella disponibilità pro capite delle merci. Come esempio di questa categoria è l'elettronica di consumo - radio, televisori, attrezzatura sonora, ecc. Questi articoli rappresentano veri aumenti di affluenza.

Fig. 2. Variazioni demografiche, Prodotto Nazionale Lordo = Gross National Product (GNP riferito alla quotazione del dollaro del 1958) e GNP pro capite per gli USA a partire dal 1946¹².

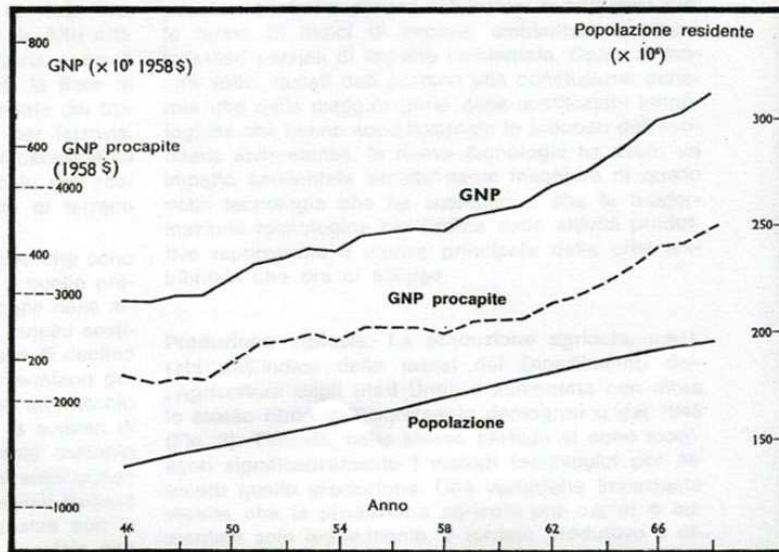
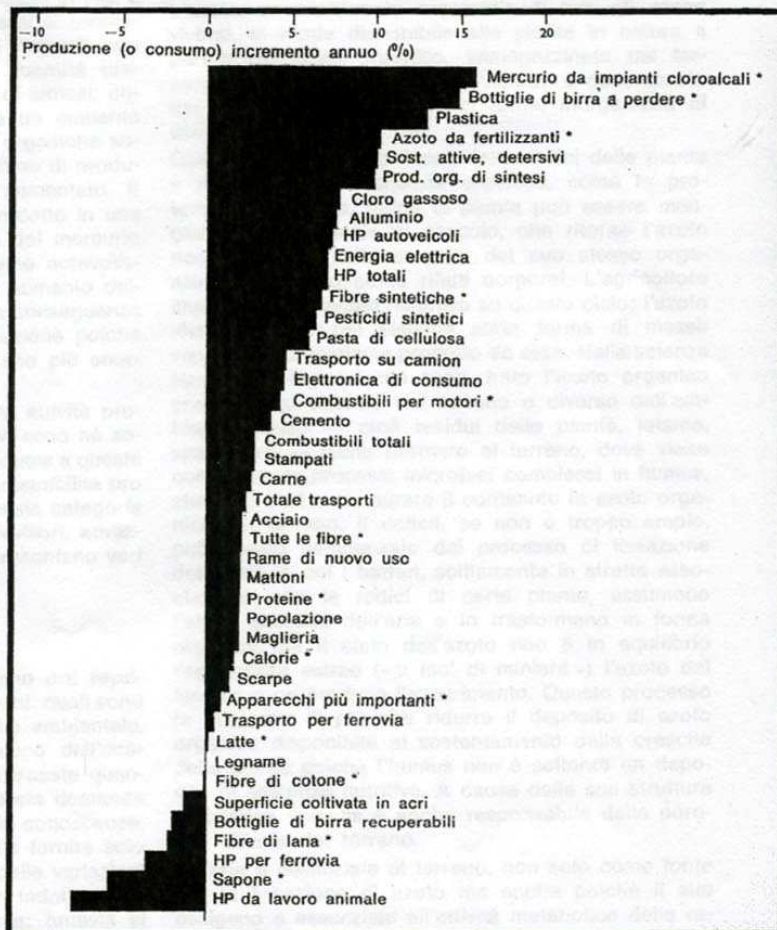


Fig. 3. Tassi di incremento annuo della produzione di generi di consumo negli USA¹³.



Impatto dello sviluppo economico

Date le precedenti conclusioni, possiamo ora reprimere la domanda originale in questi termini: quali sono i costi relativi, come intensità di impatto ambientale, dei diversi aspetti distintivi dello sviluppo dell'economia statunitense dal 1946 ad oggi ? Risposte quantitative ragionevolmente complete a questa domanda sono ben al di là dell'attuale stato delle conoscenze. Nella maggior parte dei casi è possibile fornire solo una descrizione qualitativa, informale, delle variazioni di impatto ambientale, che sono state indotte dalla trasformazione postbellica dell'economia; tuttavia si possono costruire diverse valutazioni quantitative nella forma di indici di impatto ambientale e alcuni inventari parziali di impatto ambientale. Come si mostra sotto, questi dati portano alla conclusione generale che nella maggior parte delle sostituzioni tecnologiche che hanno accompagnato lo sviluppo dell'economia statunitense, la nuova tecnologia ha avuto un impatto ambientale sensibilmente maggiore di quello della tecnologia che ha sostituito e che la trasformazione tecnologica postbellica delle attività produttive rappresenta il motivo principale della crisi ambientale che ora ci affligge.

Produzione agricola.

La produzione agricola, misurata dall'indice delle messi del Dipartimento dell'Agricoltura degli Stati Uniti, è aumentata con circa lo stesso ritmo dell'incremento demografico dal 1946 (Fig. 3). Tuttavia, nello stesso periodo si sono modificati significativamente i metodi tecnologici per ottenere quella produzione. Una variazione importante mostra che la produzione agricola pro capite è aumentata solo leggermente, il terreno produttivo è diminuito e l'impiego di fertilizzanti azotati inorganici è fortemente aumentato. Questo processo di sostituzione del terreno con il fertilizzante porta ad un impatto ambientale notevolmente aumentato.

La relativa situazione ecologica è la seguente (3): L'azoto, un costituente essenziale di tutti gli esseri viventi, si rende disponibile alle piante in natura a partire dall'azoto organico, immagazzinato nel terreno sotto forma di humus. L'humus è decomposto dai batteri con liberazione di forme inorganiche di azoto, ed infine di nitrati.

Questi ultimi vengono fissati dalle radici delle piante e ritrasformati in sostanza organica, come le proteine delle piante. Infine la pianta può essere mangiata da un animale al pascolo, che ritorna l'azoto non trattenuto nella crescita del suo stesso organismo al terreno come rifiuti corporei. L'agricoltore impone un drenaggio negativo su questo ciclo; l'azoto viene rimosso dal sistema sotto forma di messe vegetale o di bestiame prodotto da esso. Nella scienza agraria ecologicamente sana, tutto l'azoto organico prodotto dal sistema del terreno e diverso dall'ambiente stesso - cioè residui delle piante, letame, spazzatura - viene ritornato al terreno, dove viene convertito da processi microbici complessi in humus, aiutando così a restaurare il contenuto in azoto organico del terreno.

Il deficit, se non è troppo ampio, può essere compensato dal processo di fissazione dell'azoto in cui i batteri, solitamente in stretta associazione con le radici di certe piante, assumono l'azoto gassoso dell'aria e lo trasformano in forma organica. Se il ciclo dell'azoto non è in equilibrio l'agricoltura estrae («a mo' di miniera») l'azoto dal terreno e ne produce l'esaurimento. Questo processo fa qualcosa di più che ridurre il deposito di azoto organico disponibile al sostentamento della crescita delle piante poiché l'humus non è soltanto un

deposito di sostanze nutritive. A causa della sua struttura polimerica l'humus è anche responsabile della porosità all'aria del terreno.

E l'aria è essenziale al terreno, non solo come fonte per la fissazione di azoto ma anche poiché il suo ossigeno è essenziale all'attività metabolica delle radici, che a sua volta è la forza traente per l'assorbimento delle sostanze nutritive dalle radici. Negli Stati Uniti, per esempio, nei terreni della Fascia dei cereali (Corn Belt) circa metà dell'azoto organico originario del terreno è andato perduto dal 1880. Naturalmente, a parità di condizioni, il terreno è così relativamente infertile e produce una resa in messi relativamente scarsa.

Tuttavia, a cominciare dalla seconda guerra mondiale, si è applicata intensamente a questo problema una soluzione tecnologica: si sono applicate quantità in forte aumento di azoto inorganico al terreno sotto forma di fertilizzanti. L'impiego annuo di fertilizzanti azotati negli Stati Uniti è aumentato di un ordine di grandezza durante il periodo 1946-1968. In effetti, il fertilizzante azotato può essere considerato come un surrogato del terreno. Con l'intenso impiego di fertilizzanti è possibile accelerare il ritmo di ricambio dell'ecosistema del terreno in modo che ogni acro di terreno produca più cibo di prima.

I benefici economici di questa nuova tecnologia agricola sono sensibili e di per sé evidenti. Tuttavia, i vantaggi economici possono essere controbilanciati da un aumentato impatto ambientale. Ciò scaturisce dal fatto che, dato il ridotto contenuto di humus del terreno, le radici delle piante non assorbono efficientemente il fertilizzante. Ne consegue che una parte sensibile viene dilavata dal terreno come nitrato e passa nelle acque di superficie dove diviene un serio inquinante. I nitrati possono stimolare la crescita delle alghe, le quali nel loro inevitabile decadimento tendono a interrompere il ciclo acquatico di autodepurazione.

L'eccesso di nitrati che deriva dal drenaggio dei fertilizzanti porta ad un altro impatto ambientale, che può influenzare la salute umana. Mentre i nitrati negli alimenti e nell'acqua potabile appaiono relativamente innocui, i nitriti non lo sono, in quanto si associano all'emoglobina del sangue trasformandola in metaglobina - che non può trasportare ossigeno. Sfortunatamente i nitrati si possono trasformare in nitriti sotto l'azione dei batteri del tratto intestinale, specialmente dei bambini, e possono provocare l'asfissia e perfino la morte.

Su queste basi, il Servizio Sanitario Pubblico degli Stati Uniti ha definito 10 ppm di azoto nitrico come limite accettabile per i nitrati nell'acqua potabile. In diverse zone agricole degli Stati Uniti i livelli dei nitrati dell'acqua di pozzo e, in alcuni casi, nell'acqua potabile hanno superato questo limite. Gli studi da noi condotti nella zona di Decatur nell'Illinois dimostrano in modo del tutto diretto che nella primavera del 1970 quando l'approvvigionamento idrico della città, derivato da uno sbarramento del fiume Sangamon, registrò una concentrazione di 9 ppm di azoto nitrico, almeno il 60% dei nitrati proveniva dai fertilizzanti inorganici applicati alla campagna circostante (4).

L'effetto di questa modificazione della tecnologia agricola risulta evidente dalla tabella 2, in cui si confronta l'influenza dei diversi fattori relativi sull'impatto ambientale totale dovuto ai fertilizzanti azotati nel 1949 e nel 1968.

Tabella 2. Indice di impatto ambientale per l'azoto da fertilizzanti.

Fattori indice	1949	1968	1968/1949	Aumento (%)
a) popolazione (x 10 ⁶)	149 304	199 846	134	34
b) <u>produzione in messi</u> popolazione (produzione unitaria pro capite)	5,43 X 10 ⁻⁷	6.00 x 10 ⁻⁷	1,11	11
c) <u>azoto da fertilizzanti</u> produzione di messi (t per unità di produzione)	11 284 *	57 008	5,05	405
Indice totale (a X b X c) Fertilizzanti (x 10 ⁶ t)	914	6841	7,48	648

(*) L'indice di produzione delle messi rappresenta un criterio indicativo della produttività agricola uguagliando a cento la media 1957-1959.

Durante quel periodo l'impiego annuo totale di fertilizzanti azotati, cioè l'impatto ambientale totale aumentò del 648%. L'influenza dell'entità della popolazione aumentò del 34%; l'influenza della produzione pro capite delle merci (affluenza) aumentò dell'11%; l'influenza delle variazioni relative alla tecnologia dei fertilizzanti aumentò del 405%. È chiaro che l'ultimo fattore predomina nel grande aumento dell'impatto ambientale totale dei fertilizzanti azotati.

Specificamente si deve notare che nel 1949 circa 11.000 t di azoto fertilizzanti vennero usati per una produzione unitaria di messi, mentre nel 1968 circa 57.000 t di azoto vennero usati per la stessa resa di messi. Ciò significa che l'efficienza con cui l'azoto fertilizzante contribuisce alla resa in messi è diminuita di cinque volte. Ovviamente una parte sensibile dell'azoto aggiunto non entra nelle messi e deve comparire altrove nell'ecosistema.

Le basi biologiche del suddetto effetto vengono dimostrate dal confronto della resa in granturco nello Stato dell'Illinois con le quantità concorrenti di azoto fertilizzante aggiunte al terreno (5). Ciò dimostra che mano a mano che i livelli di fertilizzante aumentano la resa per acro aumenta, ma infine si ha un livellamento dovuto ai limiti naturali di crescita della pianta.

Così, tra il 1962 e il 1968 si è raddoppiato l'impiego di fertilizzanti ma la resa in messe è aumentata solo di circa il 10-15%. È chiaro che ai livelli maggiori di impiego dei fertilizzanti una porzione sempre più piccola di fertilizzante contribuisce alle messi; il resto viene dilavato nelle acque di superficie. In tal modo questa innovazione della tecnologia agricola aumenta fortemente lo stress ambientale dovuto alla produzione agricola.

I pesticidi hanno prodotto una situazione analoga, come è mostrato dalle variazioni nell'indice di impatto ambientale dei pesticidi tra il 1950 e il 1967 (tabella 3). In quel periodo vi fu un aumento del 168% dei pesticidi usati per produzione unitaria di messi sulla media nazionale. Sopprimendo i predatori naturali degli insetti ed i parassiti del parassita bersaglio, cosicché quest'ultimo diventa resistente agli insetticidi, l'impiego dei moderni insetticidi di sintesi tende ad esacerbare il problema dei parassiti per cui erano progettati. Ne consegue che si devono usare quantità sempre maggiori di insetticidi per mantenere la produttività agricola. L'impiego degli insetticidi è autoaccelerante --- in quanto determina sia una diminuzione di efficienza che un aumento dell'impatto ambientale.

Un'altra sostituzione tecnologica in agricoltura è l'aumentato impiego di recinti per la produzione di bestiame, che viene così preferito all'alimentazione libera. Il bestiame ad alimentazione libera è integrato nell'ecosistema del terreno; pascolo sull'erba del terreno e ripristina le sostanze nutritive del terreno con il letame. Ma quando il bestiame viene mantenuto in ampi recinti in cui viene alimentato con granturco e deposita intensamente i propri escreti nel recinto stesso, gli escreti non ritornano al terreno. Vengono invece drenati nelle acque di superficie dove si aggiungono agli stress dovuti all'azoto dei fertilizzanti e ai detersivi fosfatici.

L'entità dell'effetto è notevole. Attualmente i rifiuti organici prodotti nei recinti sono maggiori dei rifiuti organici prodotti da tutte le città degli Stati Uniti. Anche in questo caso la tecnologia più recente ha prodotto un serio impatto ambientale ed in questo caso ha sostituito una tecnologia che aveva un impatto ambientale sostanzialmente uguale a zero.

Prodotti tessili.

Mentre la produzione totale di fibre pro capite è rimasta più o meno costante, le fibre naturali (cotone e lana) sono state significativamente rimpiazzate dalle fibre sintetiche. Questa variazione tecnologica aumenta notevolmente l'impatto ambientale dovuto alla produzione ed all'impiego di fibre.

Un motivo è che l'energia necessaria per la sintesi del prodotto finale, un polimero lineare (cellulosa nel caso del cotone, cheratina nel caso della lana e poliamidi nel caso del nailon) è maggiore per i prodotti di sintesi. Nonostante non siano tutt'ora disponibili dati quantitativi, cioè risulta evidente dal confronto di due processi produttivi, mostrato in tabella 4. La produzione del nailon comporta ben 10 studi di sintesi chimica, ognuno dei quali richiede una notevole energia sotto forma di calore ed energia elettrica. Per contro, l'energia necessaria per la sintesi del cotone deriva, in forma libera, da una fonte rinnovabile - la luce solare - e viene trasferita senza combustione e risultante inquinamento dell'aria. Inoltre, le materie prime, per la sintesi della cellulosa sono l'anidride carbonica e l'acqua; entrambe risorse liberamente disponibili e rinnovabili, mentre la materia prima per la sintesi del nailon è il petrolio o idrocarburi simili - risorse queste non rinnovabili. Sembra quindi che lo stress ambientale dovuto alla produzione di una fibra artificiale sia probabilmente nettamente in eccesso su quello dovuto alla produzione di cotone in ugual peso.

Ciò è solo un'approssimazione poiché abbiamo bisogno di stime quantitative di gran lunga più dettagliate sotto forma di opportuni indici di impatto ambientale che tengono conto del combustibile e di altre sostanze usate nella produzione del cotone. Poiché una fibra sintetica come il nailon è innaturale, anch'esso ha un maggior impatto sull'ambiente, come sostanza di rifiuto, del cotone e della lana. I polimeri naturali del cotone e della lana sono costituenti importanti dell'ecosistema del terreno. Attraverso l'azione di muffe e batteri decompositori essi contribuiscono alla formazione dell'humus. In questo processo la cellulosa viene prontamente degradata. Così in natura cellulosa e cheratina non sono rifiuti poiché forniscono ai microrganismi del terreno sostanze nutritive essenziali e non si possono quindi accumulare.

Il contrasto con le fibre sintetiche è stridente. La struttura del nailon e di analoghi polimeri di sintesi è un'invenzione umana che non ha riscontro negli esseri viventi naturali: per questo motivo, a differenza dei polimeri naturali, quelli di sintesi non trovano nessun corrispettivo nell'armamentario naturale degli enzimi degradatori. Dal punto di vista ecologico i polimeri di sintesi sono letteralmente indistruttibili. Per questo motivo ogni frammento di fibra sin-

tetica o di polimero che è stato distrutto sulla terra o viene distrutto per combustione - e quindi inquina l'aria - o si accumula come rifiuto. Ne consegue, secondo una recente relazione, che frammenti microscopici di fibre plastiche, spesso rossi, azzurri o arancioni, sono ora diventati comuni in determinate acque marine (6).

Anche qui la sostituzione tecnologica è entrata in funzione; negli ultimi anni fibre naturali come la canapa e la juta sono state quasi totalmente sostituite da fibre sintetiche nella pesca. Uno dei motivi principali per cui vengono usate le fibre sintetiche è il fatto che resistono alla degradazione da parte delle muffe che, come si è già indicato, attaccano prontamente le reti in materiale cellulosico, come la canapa e la juta. Così la proprietà che esalta il valore economico della fibra sintetica su quella naturale - la resistenza alla degradazione biologica - è precisamente la proprietà che fa aumentare l'impatto ambientale della sostanza sintetica.

Detersivi

I detersivi di sintesi hanno in gran parte sostituito il sapone come prodotti detergenti domestici ed industriali mentre la produzione totale di prodotti detergenti pro capite è rimasta sostanzialmente inalterata. Il sapone si basa sui grassi, che per reazione con alcali danno il prodotto finale. Essendo un prodotto naturale i grassi vengono estratti da un ecosistema (per esempio quello rappresentato da una piantagione di pale da noce di cocco) e quando viene ceduto dopo l'uso ad un ecosistema acquatico il sapone viene facilmente degradato dai batteri decompositori. Poiché la maggior parte dei rifiuti comunali sono sottoposti a trattamento con degradazione dei rifiuti organici in prodotti inorganici, in pratica il residuo grasso dei rifiuti di sapone è degradato per azione batterica entro i confini di un impianto di trattamento dei liquami. Ciò che viene ceduto alle acque di superficie è solo anidride carbonica e acqua. Per questo motivo vi è un impatto scarso o nullo sull'ecosistema acquatico attribuibile al BOD dei prodotti di decomposizione del sapone. E nemmeno di degradazione del sapone, l'anidride carbonica, è solitamente un'intrusione ecologica di rilievo poiché viene prodotta in abbondanza da altre fonti ambientali ed ogni caso è un prodotto nutritivo essenziale per le alghe fotosintetiche.

Tabella 3. Indice di impatto ambientale per i pesticidi organici di sintesi.

	1950	1967	1967/1950	Aumento (%)
Fattori indice				
a) popolazione ($\times 10^3$)	151 868	197 859	1,30	30
b) <u>produzione di messi</u> popolazione (unità di produzione pro capite)	$5,66 \times 10^{-7}$	$5,96 \times 10^{-7}$	1,05	5
c) <u>consumo pesticidi</u> produzione di messi ($\times 10^3$ libbre per unità di produzione)	3326	8898	2,68	168
Indice totale (a \times b \times c) Pesticidi organici di sintesi ($\times 10^6$ libbre)	286	1050	3,67	267

Tabella 4. Cotone e nailon: caratteristiche ambientali.

Cotone	Nailon	Impatto ambientale relativo
Materie prime	Petrolio	Cotone: rinnovabile
Processo	Petrolio (distillato) ↓ Benzene (287,8° C) ↓ Cicloesano (148,9° C) ↓ Cicloesano (93,3-204,4° C) ↓ Acido adipico (315,6-371° C) ↓ Adiponitrile (93,3-121° C) ↓ Esametildiamina ↓ Nailon 610	Nailon: non rinnovabile Consumo di combustibile e risultante inquinamento atmosferico: probabilmente maggiore per il nailon che per il cotone
	Distillazione ed altre purificazioni nella maggior parte degli stadi suddetti, energia necessaria per il funzionamento del processo	
	Poliamide	Cellulosa totalmente biodegradabile, poliamide non degradabile

Tabella 5. Indice di impatto ambientale per il fosforo dei detersivi.

	1946	1968	1968/1946	Aumento (%)
Fattori indice				
a) Popolazione ($\times 10^3$)	140 686	194 846	1,42	42
b) <u>detergente *</u> popolazione (libbre pro capite)	22,66	15,99	0,69 (1,00) •	(0)
c) <u>fosforo</u> detergenti (libbre per t di detergente)	6,90	137,34	19,90 (13,70)	(1270)
Indice totale (a \times b \times c) Fosforo dai detersivi ** ($\times 10^6$ libbre)	11	214	19,45	1845

* Se si assume che il 35% in peso di detersivo sia formato dal composto attivo.

** Se si assume che il contenuto medio di fosforo dei detersivi sia il 4%.

• A causa di incertezze sul contenuto di composto attivo nei detersivi, specialmente appena dopo la loro introduzione, la diminuzione apparente nell'impiego pro capite di detergenti non è considerata significativa, i numeri tra parentesi si basano sull'assunto che questo valore non si modifichi significativamente.

Rispetto al sapone la produzione di detersivi di sintesi rappresenta una fonte più grave di inquinamento. Una volta usati e ceduti all'ambiente i detersivi generano un impatto ambientale più intenso di quello di una quantità confrontabile di sapone. Anche i detersivi più recenti, che sono considerati degradabili poiché la catena paraffinica della molecola (essendo non ramificata contrariamente ai precedenti detersivi non degradabili) è decomposta

dall'azione batterica, lasciano ciò nonostante un residuo di fenolo che può non degradarsi ed accumularsi nelle acque di superficie. Il fenolo è una sostanza piuttosto tossica essendo estraneo all'ecosistema acquatico.

A differenza dei saponi i detersivi vengono formulati con notevoli quantità di fosfati al fine di esaltarne l'azione detergente e per il raddolcimento dell'acqua. I fosfati possono facilmente provocare l'inquinamento idrico stimolando, allo stesso modo dei nitrati, una crescita eccessiva di alghe.

Quasi tutto l'aumento del fosforo nei liquami può essere attribuito al contenuto di fosforo dei detersivi. Poiché il sapone è del tutto esente da fosfati l'impatto ambientale dovuto ai fosfati è chiaramente una conseguenza della modificazione tecnologica nella fabbricazione di prodotti detergenti. La variazione di impatto ambientale dei fosfati contenuti nei prodotti detergenti tra il 1946 e il 1948 è presentata in tab. 5. In questo periodo l'indice globale di impatto ambientale aumentò del 1845%. L'aumento agli effetti dell'entità della popolazione fu del 42%; l'effetto dell'impiego pro capite di prodotti detergenti non venne modificato mentre il fattore tecnologico, cioè quello dovuto alla sostituzione del sapone esente da fosfati con detersivi contenenti in media circa il 4% di fosforo, aumentò circa del 1270%. È del tutto evidente l'importanza relativa di questa variazione della tecnologia dei prodotti detergenti nell'intensificare l'impatto ambientale.

Effetti ambientali secondari delle sostituzioni tecnologiche

Un aumento nella produzione di sostanze chimiche organiche di sintesi porta in svariati modi ad una intensificazione degli impatti ambientali. Questa parte dell'industria ha bisogno di un elevato approvvigionamento di energia e nel determinare una maggior produzione di energia l'industria contribuisce ad aumentare i livelli degli inquinanti atmosferici che vengono emessi dalle centrali termoelettriche; inoltre, nelle sintesi organiche viene liberata nell'ambiente un'ampia gamma di reagenti ed intermedi, che sono estranei agli ecosistemi naturali e spesso tossici, generando in tal modo impatti ambientali importanti e spesso mal compresi. Un esempio è rappresentato dall'enorme moria di pesci e della fitotossicità derivanti dalla cessione di rifiuti organici, insetticidi ed erbicidi alle acque di superficie o dell'aria.

Forse il più grave impatto ambientale attribuibile all'incremento di produzione di sostanze chimiche organiche di sintesi è dovuto all'intrusione del mercurio nelle acque di superficie. Quest'effetto è mediato dalla produzione di cloro. Il cloro è un reagente di vitale importanza in molte sintesi organiche, circa l'80% della produzione attuale di cloro ha il suo sbocco finale nell'industria chimica organica di sintesi. Una notevole porzione della produzione di cloro viene effettuata in celle elettrolitiche al mercurio; fino alle recenti misure di controllo imposte all'industria, circa 0,5-0,5 libbre di mercurio venivano cedute all'ambiente per ogni tonnellata (non metrica) prodotta in questo modo.

Ciò significa, per esempio, che la sostituzione del nailon al cotone ha generato un impatto ambientale intensificato dovuto al mercurio poiché la produzione del nailon comporta l'impiego di intermedi clorurati. In fig. 9 sono illustrati i rapidi aumenti in parallelo nella produzione di sostanze organiche di sintesi, di cloro e dell'impiego del mercurio in quest'ultima.

La sostituzione dell'acciaio e del legname da parte dell'alluminio contribuisce al sovraccarico di inquinanti atmosferici poiché la produzione di alluminio causa un consumo estremo di

energia. Per ogni libbra di alluminio prodotta sono necessari circa 29.860 BThU per generare l'elettricità necessaria, mentre si impiegano soltanto circa 4615 BTRU per libbra di acciaio prodotta. Il cemento, che tende a sostituire l'acciaio nei materiali da costruzione, causa anch'esso un consumo estremo di energia. La produzione di sostanze chimiche, alluminio e cemento risponde di circa il 28% dell'impiego industriale totale di elettricità negli Stati Uniti.

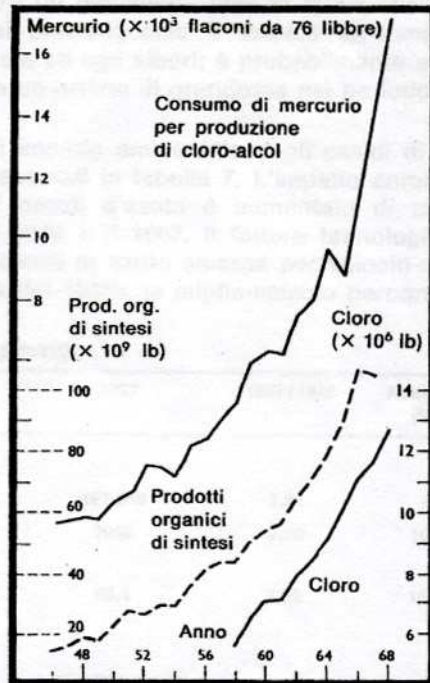


Fig. 9. Variazioni nella produzione annua di composti organici di sintesi e di cloro gassoso e consumo di mercurio per la produzione del cloro gassoso negli USA dal 1946¹⁶.

Imballaggi

La sostituzione delle vecchie forme di imballaggio da parte di contenitori «a perdere», come le bottiglie con vuoto non restituibile, è un altro esempio di intensificazione dell'impatto ambientale dovuto al quadro postbellico dello sviluppo economico. Vi è stato un enorme aumento di impatto ambientale a causa delle bottiglie di birra, che non vengono assimilate dai sistemi ecologici e che, per la loro produzione, comportano un notevole dispendio di energia. Il fattore principale in questo intensificato impatto ambientale è la nuova tecnologia --- l'impiego di bottiglie a perdere per contenere la birra --- piuttosto che l'affluenza rispetto al consumo pro capite di birra o l'incremento demografico. In un recente studio si dimostra che il dispendio totale di energia --- per la fabbricazione della bottiglia, la lavorazione, la spedizione, ecc. --- necessario per erogare uguali quantità di liquido nelle bottiglie a perdere è 4,7 volte maggiore di quello delle bottiglie restituibili.

Veicoli a motore

Infine c'è il problema di valutare l'impatto ambientale delle variazioni nei quadri di trasporto dei passeggeri e delle merci dal 1946. Particolarmente importante è l'aumentato impiego di automobili, autobus e camion. L'impatto ambientale del motore a combustione interna è dovuto all'emissione di ossidi d'azoto, monossido di carbonio, perdita di carburante e piombo. Le intensità di questi impatti, misurati dai loro livelli nell'ambiente, sono in funzione non solo delle

migliaveicolo percorse, ma anche della natura del motore stesso - cioè anche i fattori tecnologici sono rilevanti. Le variazioni tecnologiche nel campo dei motori per automobili dalla seconda guerra mondiale in poi hanno peggiorato l'impatto ambientale (Fig. 11). Così per le automobili private il chilometraggio totale per litro (nel testo: le miglia percorse per gallone) di combustibile sono declinate da 14,97 nel 1849 a 18,08 nel 1967, in gran parte perché la potenza media è aumentata da 100 a 240. Un'altra importante variazione tecnologica ha riguardato il rapporto di compressione medio, che è aumentato da circa 5,9 a 9,5%. Questa variazione ingegneristica ha avuto due importanti effetti sull'impatto ambientale del motore a benzina.

Per prima cosa si rendono necessarie quantità sempre maggiori di piombo tetraetile come additivo al fine di sopprimere la detonazione che si produce ad alti rapporti di compressione. L'impiego del piombo tetraetile è aumentato significativamente nel periodo 1946-1968. In sostanza tutto questo piombo viene emesso nei gas di scarico del motore e si dissemina nell'ambiente. Poiché il piombo non è un elemento funzionale in qualsiasi organismo biologico ed è tossico, esso rappresenta un'intrusione esterna nell'ecosistema che genera un notevole impatto ambientale.

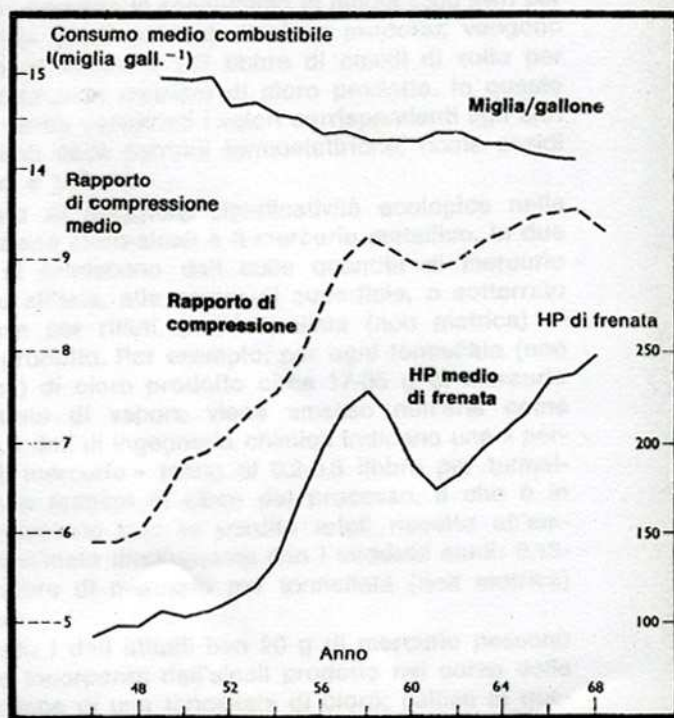


Fig. 11. Caratteristiche medie dei motori degli autoveicoli privati negli Stati Uniti dal 1946²⁰.

Una seconda conseguenza dell'aumento del rapporto di compressione del motore è stato l'aumento della concentrazione di ossidi d'azoto emessi nello scarico del motore. Ciò è avvenuto poiché la temperatura del motore aumenta con il rapporto di compressione. Poiché l'aria introdotta nel cilindro del motore è formata di azoto ed ossigeno, la formazione di ossidi di azoto (dalla reazione tra i due elementi - n.d.r.) è esaltata a temperature elevate. Attraverso una serie di reazioni fotoattivate a cui partecipano i gas di scarico del combustibile, gli ossidi

d'azoto inducono la formazione del nitrato di perossiacetile, l'ingrediente nocivo dello smog fotochimico. Lo smog di questo tipo è stato dapprima identificato a Los Angeles nel 1942-1943; era sconosciuto nella maggior parte delle altre città degli Stati Uniti fino agli ultimi anni '50 e '60 ma è ora un inquinante urbano quasi universale. Il nitrato di perossiacetile è tossico all'uomo, alle messi agricole ed agli alberi; è probabilmente aumentato di circa un ordine di grandezza nel periodo 1946-1968. Gli indici di impatto ambientale degli ossidi di azoto vengono presentati in tabella 7. L'impatto ambientale totale degli ossidi d'azoto è aumentato di circa il 630% tra il 1946 e il 1967.

Tabella 7. Indice di impatto ambientale per gli ossidi di azoto (autoveicoli privati).

	1946	1967	1967/1946	Aumento (%)
Fattori indice				
a) popolazione (x 10 ³)	140 686	197 849	1,41	41
b) <u>veicolo–miglia</u>	1982	3962	2,00	100
c) <u>ossidi d'azoto</u> *	33,5	86,4	2,58	158
Indice totale (a x b x c)				
	10,6	77,5	7,3	630
Ossidi d'azoto *				

(*) Dimensioni = NO_x (ppm) x consumo di benzina (x 10⁶ galloni). Valutate in base al prodotto del consumo di benzina per autoveicolo privato e delle ppm di NO_x emesse da motori aventi un rapporto di condizioni di esercizio a 15 pollici di pressione al collettore: 1946, 500 ppm di NO_x; 1967, 1200 ppm.

Il fattore tecnologico (la quantità di ossidi di azoto emessa per veicolo-miglio) è aumentata del 158 %, le miglia-veicolo percorse pro capite sono aumentate di circa il 100 % ed il fattore popolazione di circa 41 %. Nel caso del piombo tetraetile il massimo aumento di impatto è dato dalle miglia-veicolo percorse pro capite (100%), seguite dal fattore tecnologico (83 %) e dal fattore popolazione (41 %). In tal modo le maggiori influenze sull'inquinamento da autoveicoli sono l'aumento del chilometraggio pro capite (in parte a causa delle variazioni nella distribuzione lavoro-residenza dovuta all'espansione della periferia) ed al maggiore impatto ambientale per miglio percorso dovuto alle variazioni tecnologiche del motore a benzina.

Analoghe considerazioni valgono per quanto riguarda la spedizione per terra di merci tra le città. In questo caso la spedizione con camion ha presentato la tendenza di sostituire la spedizione per ferrovia. Ed ancora la tecnologia subentrata in sostituzione ha un impatto ambientale più acuto della tecnologia sostituita. Ciò risulta evidente in base all'energia necessaria a trasportare merci per ferrovia e con camion: 624 BThU/t-miglio per ferrovia e 3462 BThU/t-miglio con camion. Va anche notato che l'acciaio e il cemento necessari a produrre tratti uguali di ferrovia e di autostrada differiscono per la quantità di energia necessaria nel rapporto di 1 a 3,6. Ciò è dovuto alla natura di elevato consumo energetico nella produzione del cemento ed al fatto che per la sistemazione del traffico intenso di camion sono necessarie quattro corsie. Inoltre l'autostrada suddivisa richiede un diritto di precedenza di 400 piedi mentre un terrapieno ferroviario abbisogna solo di 100 piedi. In tutti questi modi la sostituzione delle ferrovie con i veicoli a motore non solo per le merci ma anche per il viaggio dei passeggeri ha intensificato l'impatto ambientale risultante.

Inventario dell'impatto ambientale

L'analisi di cui sopra rappresenta soltanto dei piccoli frammenti di un tutto complesso. Ciò che è necessario è un inventario completo dei vari indici di impatto ambientale associati all'impresa produttiva e l'identificazione delle origini dei suddetti impatti entro il processo di produzione e degli ecosistemi in cui si introducono. Tale insieme di dati, che rappresenta un inventario di impatto ambientale, viene sotto derivato come un indice esplorativo in riferimento ad un articolo produttivo per cui si è avuta a disposizione una certa quantità di dati --- la produzione di cloro e alcali da parte degli impianti cloroalcali che utilizzano celle elettroniche al mercurio. I dati necessari comprendono: 1) gli indici di impatto ambientale associati alle merci introdotte, cioè principalmente energia elettrica, sale e mercurio; 2) gli indici di impatto ambientale che rappresentano i rifiuti del processo e le proprietà dei sistemi ecologici da essi influenzati; 3) gli indici di impatto ambientale rappresentativi dei rifiuti ecologicamente significativi associati con le merci in uscita del processo (cloro e alcali) e con il destino ambientale di queste sostanze.

Così, per esempio, la produzione di 1 MW (megawatt: milione di watt) di elettricità nelle centrali termoelettriche, che consumano combustibili fossili, determina la cessione all'atmosfera di 34,20 libbre di ossidi di zolfo. Poiché in un impianto cloro-alcali a cella di mercurio si consumano in media 4300 kWh per tonnellata (non metrica) di cloro prodotto, vengono cedute all'ambiente 147 libbre di ossidi di zolfo per tonnellata (non metrica) di cloro prodotto. In questo modo vanno calcolati i valori corrispondenti agli altri inquinanti delle centrali termoelettriche, come ossidi d'azoto e polveri.

Il rifiuto di maggiore significatività ecologica nella produzione cloro-alcali è il mercurio metallico. In due studi si forniscono dati sulle quantità di mercurio ceduto all'aria, alle acque di superficie, o sotterrato in fosse per rifiuti, per tonnellata (non metrica) di cloro prodotto. Per esempio, per ogni tonnellata (non metrica) di cloro prodotto circa 17-35 g di mercurio allo stato di vapore viene emesso nell'aria come rifiuto. I dati di ingegneria chimica indicano una « perdita di mercurio » totale di 0,2-0,5 libbre per tonnellata non metrica di cloro del processo, il che è in buon accordo con le perdite totali rispetto all'ambiente stimate direttamente con i suddetti studi: 0,13-0,57 libbre di mercurio per tonnellata (non metrica) di cloro.

Secondo i dati attuali ben 20 g di mercurio possono essere incorporati dall'alcali prodotto nel corso della produzione di una tonnellata di cloro; l'alcali in questione viene usato in 42 prodotti separati. Da un'analisi entrate-uscite dell'industria cloro-alcali si potrebbe costruire una matrice comprensiva per il passaggio nell'ambiente del mercurio contenuto nell'alcali attraverso i vari processi di fabbricazione. Recentemente, si sono adottati i metodi economici sulle entrate e sulle uscite (Leontieff e Isard) perché vi risultassero comprese le esternalità ambientali (8). Agli scopi attuali dovremo restringere l'analisi ad un gruppo di prodotti --- legno, pasta di cellulosa e carta, sapone, lisciva e prodotti detergenti --- che consumano circa il 26 % dell'alcali prodotto. Si può così stimare che su ogni 20 g di mercurio passato nell'alcali, il 26 % ossia 5 g compare in questi prodotti. I loro destini ambientali sono noti: le acque di rifiuto contenenti i prodotti detergenti passano nei corsi d'acqua allo stesso modo dei rifiuti liquidi di produzione della carta e della pasta di cellulosa; la carta viene infine bruciata e cede così il mercurio all'aria allo stato di vapore.

Si sta appena iniziando ad esaminare i dati ecologici relativi ad un inventario dell'impatto ambientale per la produzione cloro-alcali. Quando il mercurio metallico viene scaricato nelle acque di superficie, viene incorporato sotto forma di goccioline nel fango di fondo. Quivi può

subire l'azione di alcune specie di batteri che lo trasformano in una forma organica, il metilmercurio il quale, a differenza del mercurio metallico, è idrosolubile. In questa forma il mercurio viene quindi assunto dagli organismi che vivono nell'acqua ed alla fine contamina i pesci che la popolazione può mangiare. Negli ultimi mesi si è rilevato che i rifiuti al mercurio di un certo numero di impianti cloro-alcali hanno provocato l'aumento fino a valori superiori agli standard sanitari dei livelli di mercurio nei pesci delle acque di superficie adiacenti.

Emesso nell'aria il mercurio può essere assunto direttamente dagli esseri umani mediante assorbimento nei polmoni o può essere asportato per dilavazione delle precipitazioni, raggiungendo così il terreno e le acque, entrando così in questi ecosistemi. Pochissimo si sa tutt'ora sul trasferimento ecologico del mercurio nel terreno. Infine, poiché il mercurio è volatilissimo, quando viene riscaldato (come per [es. in](#) un inceneritore) viene vaporizzato ed emesso nell'aria. In uno studio recente si fa rilevare che gli inceneritori domestici di St. Louis scaricano annualmente nell'atmosfera circa 2000-3000 libbre di mercurio, gran parte del quale si forma nell'incenerimento di prodotti derivati dalla carta e dalla pasta di cellulosa.

Sulla base di questi dati si può ora produrre (in una forma del tutto incompleta e sperimentale) un inventario di impatto ambientale per la produzione cloroalcali.

Alcune conclusioni

I dati che si sono presentati rivelano una connessione funzionale tra lo sviluppo economico - almeno negli Stati Uniti dal 1946 - e l'impatto ambientale. È significativo che l'intervallo incrementale negli impatti ambientali calcolati concorda piuttosto bene con la misurazione indipendente dei livelli reali di inquinanti che si osservano nell'ambiente. Così, l'aumento dell'indice di impatto ambientale del piombo tetraetile calcolato dai dati relativi al consumo di benzina per il 1946/1967 è di circa il 400%; un aumento analogo dei livelli ambientali di piombo è stato registrato in base alle analisi degli strati di ghiaccio nei ghiacciai (9).

Analogamente l'aumento del 648% per il periodo di diciannove anni 1949-1968 dell'indice di impatto ambientale calcolato per i fertilizzanti azotati è in accordo con le poche determinazioni di campo su vasta scala che sono disponibili. Così i dati di campo dimostrarono che i nitrati che sono passati nel fiume Missouri nell'attraversamento del Nebraska nel periodo di sei anni (1956-1962) sono aumentati di un po' più del 200 % (10). Gli indici di impatto ambientale calcolati per diversi aspetti relativi all'impiego di veicoli a motore sono pure in accordo con le osservazioni generali di campo.

È ampiamente riconosciuto che l'aumento più rilevante fra i diversi aspetti del deterioramento ambientale dovuto ai veicoli a motore è espresso dalla formazione di smog fotochimico. Dal 1942 è aumentato, su scala nazionale, probabilmente di un ordine di grandezza, comparando in quasi tutte le più grandi città ed anche nelle città più piccole negli ultimi cinque anni. Tuttavia, nel periodo 1946-1968 l'impiego totale dei veicoli a motore, misurato dal consumo di benzina, aumentò all'incirca di solo il 200 % - incremento quindi troppo piccolo per rendere conto dell'aumento concorrente sull'incidenza dello smog fotochimico. È significativo che questa disparità tra l'aumento osservato nei livelli di smog e l'aumento nell'impiego dei veicoli corrisponda all'indice di impatto ambientale calcolato per gli ossidi di azoto, il fattore che innesca le reazioni dello smog, poiché quell'indice è aumentato del 630 % nel 1946-1967.

Questi dati in accordo con i dati reali di campo sostengono la conclusione per cui i calcoli rappresentati dall'indice di impatto ambientale forniscono un'utile approssimazione delle variazioni di impatto ambientale associate agli aspetti relativi allo sviluppo dell'economia

statunitense dal 1946. In particolare, si può porre una certa fiduciabilità sulla suddivisione dell'indice di impatto totale in diversi fattori: entità della popolazione, produzione o consumo pro capite e tecnologia della produzione e degli usi.

È interessante fare un confronto diretto tra i contributi relativi degli aumenti nell'entità e nell'affluenza della popolazione, con le variazioni nella tecnologia di produzione, e gli aumenti di impatto ambientale totale che si sono verificati a partire dal 1946. Il rapporto tra il valore del più recente indice totale ed il valore dell'indice del 1946 (o il valore dell'anno più remoto per cui sono disponibili i dati necessari) è indicativo delle variazioni nell'impatto totale in tutto questo arco di tempo. I contributi relativi dei diversi fattori a queste variazioni totali sono allora dati dai rapporti tra i rispettivi indici parziali. Il fattore popolazione contribuisce solo tra il 12 ed il 20 % alle variazioni totali nell'indice di impatto. Per tutti gli inquinanti tranne quelli veicolari, il fattore affluenza dà un contributo piuttosto piccolo - non più del 5% - alle variazioni totali nell'indice di impatto. Per gli ossidi di azoto ed il piombo tetraetile questo fattore risponde per circa il 40% dell'effetto totale, il che riflette un notevole aumento delle veicolo-miglia percorse pro capite a partire dal 1946. Le variazioni tecnologiche nei processi che generano i vari beni economici contribuiscono dal 40 al 90 % agli aumenti totali di impatto.

Nel valutare questi risultati va notato che il chilometraggio delle automobili è per se stesso fortemente influenzato da un tipo di trasformazione economica: il rapido aumento di residenze periferiche e l'incapacità concomitante di fornire un trasporto adeguato per ferrovia e con altri mezzi per compensare queste variazioni. Che l'aumento globale nelle veicolo-miglia percorse pro capite dal 1946 (circa 100%) vada riferito all'aumentata incidenza sulla suddetta variazione dell'aumento del percorso residenza-lavoro risulta dai risultati di un'inchiesta condotta nel 1963.

Si rilevò che il 90 % di tutti i viaggi in automobile, che rappresentano il 30% di tutto il chilometraggio percorso, comportano percorsi di una lunghezza di 10 miglia (16 chilometri circa) o addirittura inferiore. La distanza media residenza-lavoro risultò di circa 5,5 miglia (8,8 km). In tal modo è probabilmente appropriato considerare l'aumento nelle veicolo-miglia percorse dall'automobile come non totalmente attribuibile all'aumento di affluenza, ma piuttosto come risposta alle nuove relazioni lavoro-residenza che sono costose in fatto di trasporto.

Durante il periodo che va dal 1946 ai tempi attuali i livelli di inquinamento negli Stati Uniti sono fortemente aumentati generalmente più o meno di un ordine di grandezza. Sembra evidente dai dati su esposti che la maggior parte del suddetto aumento è attribuibile ad uno dei tre fattori che influenzano l'impatto ambientale --- la tecnologia di produzione --- mentre sia l'incremento demografico che l'aumento di affluenza esercitano un'influenza molto minore. In tal modo il principale motivo del forte aumento di stress ambientale va attribuito alle profonde trasformazioni nella tecnologia di produzione. Attività produttive con intensi impatti ambientali hanno sostituito attività con impatti ambientali meno rilevanti; il quadro di sviluppo è stato controecologico.

Questa conclusione viene facilmente trasposta a significare che la tecnologia sia quindi, per se stessa, ecologicamente nociva. Negli esempi che seguono si vedrà che questa interpretazione non è consentita. Si consideri la trasformazione della relazione attuale, ecologicamente erronea, tra terreno, messi agricole, popolazione umana e liquami. Supponiamo che i liquami, invece di essere introdotti nelle acque di superficie come attualmente viene fatto, sia direttamente che in seguito a trattamento, vengano invece attraverso tubature dai sistemi urbani di raccolta alle zone agricole dove - in seguito ad opportuni procedimenti di sterilizzazione vengono incorporati nel terreno. Tali tubature reimmetterebbero i rifiuti della popolazione

urbana nel ciclo ecologico del terreno, restaurando l'integrità del ciclo ed eliminando incidentalmente la necessità del fertilizzante azotato inorganico --- che pure esercita un'influenza sfavorevole sul ciclo acquatico.

Per questo motivo la popolazione urbana non è più esterna al ciclo del terreno ed è quindi incapace sia di produrre su di esso uno stress biologico negativo che di esercitare uno stress ecologico positivo sull'ecosistema acquatico.

Si noti tuttavia che questo stato di impatto ambientale zero non si realizza con un ritorno a condizioni primitive ma con un progresso tecnologico reale: la costruzione di un sistema di tubature per i liquami. Oppure si consideri l'esempio fornito dal trattamento tecnologico dell'oro e di altri metalli preziosi. L'oro è, dopo tutto, sottoposto a numerose manipolazioni tecnologiche, che generano una serie di notevoli valori economici. Tuttavia, riusciamo a far tutto ciò senza introdurre nell'ecosfera niente di più di una frazione piuttosto esigua di tutto l'oro acquisito dagli esseri umani.

Poiché gli conferiamo un valore così elevato, pochissimo oro viene disperso nell'ambiente. Per contro, la maggior parte di mercurio che è stato messo in commercio nell'ultima generazione è stato disseminato nell'ambiente con effetti del tutto sfortunati. È chiaro che fornita un'adeguata tecnologia --- e motivazione --- potremmo diventare tanto frugali nel trattare il mercurio quanto lo siamo per l'oro, evitando in tal modo il passaggio nell'ambiente della sostanza tossica. Ancora in questo caso ciò che serve non è necessariamente l'abbandono della tecnologia al mercurio ma piuttosto il miglioramento di questa tecnologia sino al punto di soddisfacente compatibilità con l'ecosistema.

Generalmente parlando allora sembrerebbe possibile ridurre l'impatto ambientale delle attività umane sviluppando alternative ed attività ecologicamente difettose. Ciò può essere compiuto non abbandonando la tecnologia ed i beni economici che questa può produrre, ma sviluppando nuove tecnologie che incorporino non solo la conoscenza delle scienze fisiche ma anche la saggezza ecologica. In base alle considerazioni precedenti si possono trarre alcune conclusioni:

1) Il deterioramento dell'ambiente, quale che sia il suo costo in denaro, tensione sociale e sofferenze personali è principalmente la conseguenza di una tecnologia ecologicamente difettosa che è stata usata per ricostituire la produttività delle imprese.

2) Gli impatti ambientali risultanti influenzano negativamente gli ecosistemi basilari che sostengono la vita degli esseri umani, distruggono il « capitale biologico » che è essenziale al funzionamento dell'industria e dell'agricoltura e possono, se incontrollati, portare al crollo catastrofico di questi sistemi.

3) Gli impatti ambientali già generati sono sufficienti a minacciare lo sviluppo continuo del sistema economico - servono a testimonianza le attuali difficoltà sperimentate negli Stati Uniti nel collocare nuove centrali in un periodo di accentuata penuria nella produzione di energia, le recenti riduzioni nell'innovazione industriale relativa ai campi dei detersivi, della produzione chimica, della fabbricazione chimica, degli insetticidi, degli erbicidi, della produzione di cloro, dei pozzi petroliferi, del trasporto del petrolio, degli aerei supersonici, della generazione di energia nucleare, degli impieghi industriali delle esplosioni nucleari - tutti derivanti dal rifiuto pubblico del concomitante deterioramento ambientale.

Qual è stato il costo reale della degradazione che ha rappresentato la risposta del sistema ambientale agli impatti intensificati esercitati su di esso ? Questa domanda, naturalmente, è molto difficile. Come si è precedentemente indicato, la teoria che collega l'impatto ambientale all'effetto indicato, la teoria che collega l'impatto ambientale all'effetto ecologico è per lo più scarsamente sviluppata.

Allo stesso tempo, all'economista, che tenti di riportare le «esternalità» rappresentate dal danno ecologico nell'ambito della valutazione economica, si presentano difficoltà formidabili. Non si ritiene tuttavia necessario in questa sede prendere in considerazione questi lavori, che sembrano concretarsi in un aumento di dati utili. Tanto più che esiste, come credo, un modo più semplice e più diretto di esprimere il costo rappresentato dal deterioramento ambientale al sistema economico.

Mi sembra che un modo significativo per valutare questi costi debba procedere secondo le seguenti direttrici: date le condizioni 1, 2 e 3 di cui sopra, sembra probabile, se vogliamo sopravvivere sia economicamente che biologicamente che molte delle trasformazioni tecnologiche attuate nell'economia degli Stati Uniti dal 1946 dovranno, per così dire, essere rifatte al fine di portare la tecnologia produttiva della nazione in un'armonia molto più stretta con le inevitabili esigenze dell'ecosistema. Ciò renderà necessario lo sviluppo di nuove tecnologie massive comprendenti: sistemi per riportare i liquami e la spazzatura direttamente al terreno, per la sostituzione delle sostanze sintetiche con quelle naturali, per sostenere l'inversione dell'attuale tendenza a sottrarre il terreno all'agricoltura e ad innalzare la resa per acro, per lo sviluppo di mezzi di trasporto su terra che funzionino con la massima efficienza riguardo al combustibile a basse temperature di combustione, per consentire una forte riduzione nell'impiego di sostanze organiche di sintesi biologicamente attive. In effetti ciò che è necessario è un nuovo periodo di trasformazione tecnologica dell'economia che inverta le tendenze controecologiche che si sono sviluppate dal 1946. Potremmo stimare il costo della nuova trasformazione da quello della precedente, che deve rappresentare un investimento di capitale, dell'ordine di centinaia di miliardi di dollari, al quale bisogna aggiungere, naturalmente, il costo di riparazione del danno ecologico in cui siamo incorsi, come l'eutrofizzazione del lago Erie, ancora un conto da pagare che va calcolato sulle centinaia di miliardi di dollari.

L'enorme entità di questi costi pone una domanda finale: esiste qualche connessione funzionale nell'economia tra la tendenza di una data attività produttiva a infliggere un intenso impatto ambientale (e l'entità dei relativi costi) e la funzione di questa attività nello sviluppo economico? Risulta infatti evidente anche da un rapido confronto tra le attività produttive in rapida espansione nell'economia degli Stati Uniti dal 1946 a quella che sono state sostituite, che le attività sostitutive comportano un profitto notevolmente maggiore di quelle che hanno sostituito. La correlazione tra profittabilità e sviluppo rapido è tale da essere presumibilmente computabile in termini economici. Il vincolo ulteriore con l'intenso impatto ambientale è pure funzionale o solo accidentale ?

Si è puntualizzato abbastanza spesso che l'inquinamento ambientale rappresenta un debito da lungo non pagato con la natura. È possibile che l'economia degli Stati Uniti si sia sviluppata dal 1946 derivando gran parte di questa nuova ricchezza dall'aumento di quel debito ? Se si rilevasse che ciò è vero quali tensioni si svilupperanno nell'economia se, ai fini della sopravvivenza della nostra società, si dovesse ora saldare quel debito? In che modo queste tensioni influenzano la nostra capacità a pagare quel debito --- a sopravvivere ?

NIBLIOGRAFIA

1. B. COMMONER, M. CORR and P.J. STAMMER, «Environment», 1971, 13, 2.
2. L.W. WEINBERGER, D.G. STEPHAN and F.M. MIDDLETON, «Ann. N.Y. Acad. Sci», 1966, 136, 131.
3. B. COMMONER, in «Global effects of environmental pollution» (ed. S. Fred Singer). Dordrecht-Holland: Reidel, 1970.
4. D.H. KOHL, G.B. SHEARER and B. COMMONER, «Isotopic analysis of the movement of fertilizer nitrogen into surface water». In press 1971.
5. J.H. DAWES. T.E. LARSON and R.H. HARMESON. «Proc. 24th Annual Meeting, Soil Conservation Society of America», Ft Collins, Colorado, 1968, p. 94.
6. See note in «Marine Pollution Bulletin», February 1971, 2, 23.
7. BRUCE HANNON (University of Illinois, Urbana), personal communication.
8. Vedere, per esempio: W. ISARD et al., «Papers of the Regional Science Association», 1969, 21, 79.
9. C.C. PATTERSON, «Environment», 1967, 10, 72.
10. B. COMMONER, «Environment», 1967, 10.
12. DEPARTMENT OF COMMERCE, «Statistical abstracts of the United States», p. 5. Washington: US Government Printing Office, 1970. DEPARTMENT OF COMMERCE, «The national income and product accounts of the United States 1929-1965», p. 4. Washington: US Government Printing Office, 1966.
13. «Statistical abstracts of the United States, 1948-1970» (cf. ref. 12).
14. BUREAU OF CENSUS, Current industrial reports, series M26A, inorganic chemicals and gases. «Statistical abstracts of the United States» (cf. nota 12).
15. GASOLINE CONSUMPTION DATA FROM, «Statistical abstracts of the United States (cf. ref. 12). Brake horsepower and compression ratio data from «Brief passenger car data», 1951 and 1970. Ethyl Corporation.