CRESCITA ECONOMICA E SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: UN MODELLO D'INTERAZIONE ECOLOGICA TRA DUE POPOLAZIONI.

Giovanni Scarano
Università Roma Tre

Abstract

Nel paper si propone un'analisi delle relazioni tra crescita economica, crescita demografica e capacità di carico degli ecosistemi naturali effettuata con un approccio di economia ecologica. Partendo dall'integrazione di un tipico modello di crescita economica, in cui il progresso tecnologico è volto a compensare la riduzione della produttività marginale del capitale, con il modello di crescita logistica, si introduce l'effetto di una risorsa naturale rinnovabile, trattata come una popolazione biologica inserita in un rapporto d'interazione ecologica con la popolazione umana. Lo scopo finale del lavoro è l'analisi delle condizioni di crescita sostenibile che emergono dal modello di interazione lineare delle due popolazioni. La connessione tra gli aspetti biologici e quelli economici del modello è effettuata integrando il concetto di capacità di carico per la popolazione umana con quello di sussistenza, un concetto proprio dell'economia "classica" pienamente coerente con un'analisi demografica di tipo malthusiano.

JEL Code: Q56, Q57, O41, J10.

Parole chiave: Crescita economica, Crescita demografica, Carrying Capacity, Sussistenza, Risorse rinnovabili.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, il problema del rapporto tra crescita demografica e scarsità delle risorse naturali è stato o sostanzialmente trascurato o banalizzato con approcci estremamente semplicistici.

La maggior parte dei modelli di crescita demografica si è concentrato principalmente sui meccanismi endogeni che regolano la fertilità e sulle loro interpretazioni economiche, ma ha quasi sempre ignorato gli effetti connessi alla pressione delle popolazioni umane sulle risorse naturali e ai feedback repressivi che da questa possono scaturire.

Nel modello di crescita neoclassico il tasso di crescita della popolazione gioca certamente un ruolo importante, determinando il livello di prodotto pro capite di steady state, ma i comportamenti demografici che lo determinano risultano essere del tutto esogeni rispetto al modello e non mostrano nessuna relazione con la disponibilità di risorse naturali o di beni prodotti.

La principale eccezione rispetto a questa tendenza generale è riscontrabile in alcuni studi di carattere empirico e, soprattutto, in alcuni classici filoni teorici di impostazione ambientalista. In questi studi, però, la dinamica demografica è affrontata in modo sostanzialmente *neomalthusiano*, con i suoi relativi risvolti di catastrofismo e di pessimismo tecnologico (Becker et al., 1999). Il tema fondamentale ed emblematico di questa letteratura è quello della *population bomb* (Ehrlich, Holdren, 1970, 1971, 1972), ovvero della previsione di un repentino raggiungimento dei limiti naturali alla crescita, con il conseguente scatenamento di feedback repressivi di carattere catastrofico, quali carestie, rivolte e guerre.

Questi approcci neomalthusiani presentano però gli stessi difetti della loro comune fonte d'ispirazione originaria, ovvero la teoria maltusiana della crescita demografica, e tutte le loro previsioni sono state, fino ad oggi, costantemente smentite da qualunque verifica empirica (Kelley, 1985). In questa letteratura, inoltre, la relazione intercorrente tra popolazione umana e risorse naturali è sempre stata analizzata solo per quanto riguarda l'impatto negativo esercitato dalla crescita della prima sulla conservazione o la riproduzione delle seconde e i conseguenti effetti repressivi dei danni prodotti.

Nel presente lavoro si vuole invece proporre un approccio caratterizzato da un maggiore ottimismo tecnologico, più coerente con le risultanze teoriche che sono emerse negli ultimi anni dalla letteratura sulla crescita endogena (Romer, 1986; King and Rebelo, 1990, 1993; Rebelo, 1991; Barro and Sala-i-Martin, 1995). Il modello utilizzato nell'analisi seguente parte da un modello di crescita logistica in cui la carrying capacity dell'ecosistema terrestre per la specie umana è funzione dell'accumulazione di capitale e dello sviluppo tecnologico (Scarano, 2008, 2011). In esso, i comportamenti demografici vengono specificati secondo i canoni dei modelli biologici o ecologici e presentano quindi profonde differenze con quelli dei tipici modelli di fertilità utilizzati più di frequente in economia. Si vuole, infatti, seguire qui un approccio tipico dell'*ecological economics* (Costanza, 1989), combinando i risultati di un classico modello di crescita economica con modelli tipici delle scienze ecologiche, quale quello della crescita logistica e quello dell'interazione lineare di due popolazioni biologiche.

Lo scopo principale del lavoro è l'individuazione delle condizioni di crescita sostenibile che emergono dal modello dinamico di interazione lineare tra la popolazione umana, che cresce grazie alla disponibilità di nuove risorse economiche generate dal sistema produttivo, e la risorsa naturale rinnovabile governata a sua volta da un modello di crescita logistica e dall'azione di raccolta umana.

2. Crescita maltusiana e crescita logistica

In ecologia, la *carrying capacity* di un ecosistema nei confronti di una determinata specie biologica è definita come il massimo numero di individui di quella specie che può sopravvivere, in un certo istante di tempo, grazie alle risorse che si rendono disponibili per essi all'interno dell'ecosistema stesso. Questo concetto può quindi essere facilmente collegato a quello di sussistenza, utilizzato nell'originario modello malthusiano di crescita demografica (Scarano, 2008, 2011). In assenza di progresso tecnologico, infatti, l'analisi maltusiana presuppone un limite superiore al livello dello stock di popolazione umana, strettamente determinato dalla produttività della terra. Ma l'originario approccio malthusiano, per quanto animato da pessimismo tecnologico, presupponeva comunque la possibilità di innalzare tale limite mediante il lavoro umano, per quanto con rendimenti decrescenti. (Malthus, 1970). Conseguentemente, quando la popolazione cresce, non si assiste a una crescita proporzionale del prodotto sociale, così che il reddito pro capite deve necessariamente ridursi, esercitando azioni repressive sui tassi di natalità e facendo aumentare i tassi di mortalità.

Questa ipotesi teorica è stata successivamente formalizzata, in modo forse troppo semplicistico e meccanicistico, mediante la seguente equazione differenziale:

[1] $$\dot{N}(t) = (b - d)N(t) = nN(t)$$

dove:

$N(t)$ è la numerosità della popolazione al tempo t;
b è il tasso di natalità;
d è il tasso di mortalità;
n è il tasso di crescita della popolazione.

L'integrale di questa equazione identifica il seguente sentiero di sviluppo temporale della popolazione di tipo esponenziale:

[2] $$N(t) = N(0)e^{nt}$$

In questo modello non appare esplicitamente alcun elemento riconducibile al concetto di *carrying capacity*. Quest'ultimo fu formalizzato, solo alcuni anni dopo la pubblicazione dell'ultima edizione del Saggio sul principio di popolazione di Malthus, da Pierre-François Verhulst (Verhlust, 1838). Il modello demografico proposto da Verhlust per correggere in modo più realistico il modello malthusiano, introduce infatti una costante positiva K, definita *carrying capacity* ambientale, che gioca un ruolo fondamentale nel far variare nel tempo il tasso di crescita della popolazione(Clark, 1990; Scarano, 2008, 2011). In questo modello, noto come modello della crescita logistica, il tasso di crescita sarà quindi dato da:

[3] $$n(t) = n_i\left(1 - \frac{N(t)}{K}\right)$$

dove n_i è il tasso intrinseco di crescita, ovvero il saldo tra tasso di natalità e tasso di mortalità al netto delle morti determinate dalla competizione intraspecifica sulle risorse dell'ecosistema o da altre cause di carattere puramente ambientale. K è invece il numero massimo di individui che può sopravvivere in ogni periodo di tempo, dato il flusso di risorse fornite dall'ecosistema.

L'equazione di Eulero per il sistema è data quindi dalla seguente equazione differenziale:

[4] $$\dot{N}(t) = n_i\left(1 - \frac{N(t)}{K}\right)N(t)$$

Il sentiero di evoluzione temporale della popolazione diviene quindi:

[5] $$N(t) = \frac{K}{1 + ce^{-n_i t}}$$

dove c è la condizione iniziale corrispondente al massimo tasso di variazione possibile della popolazione all'istante iniziale:

[6] $$c = \frac{K - N(0)}{N(0)}$$

La [5], a sua volta, implica che, se $N(0)>0$:

[7] $$\lim_{t \to \infty} N(t) = K$$

Ciò significa che K è un equilibrio dinamico stabile del sistema demografico.

Questo modello, elaborato per descrivere la dinamica di qualunque specie biologica all'interno del proprio ecosistema, può sembrare, però, poco adatta a rappresentare la complessità sociale ed economica della dinamica demografica umana. La specie umana, in primo luogo, contrariamente alle altre specie, è in grado di potenziare la disponibilità di risorse delle quali necessita mediante le attività di produzione. Ciò implica che la *carrying capacity* dell'ecosistema terrestre nei suoi confronti è mediata dal processo di produzione e dalla produttività del lavoro. Anche se la scarsità assoluta di risorse naturali può esercitare un'azione vincolante di ultima istanza, entro certi limiti essa può essere compensata dal ricorso ad altri tipi di risorse umane, quali il capitale artificiale e il progresso tecnologico (Solow, 1974a, 1974b; Romer, 2001). Nell'esperienza storica, a partire dalla rivoluzione industriale, un flusso continuo di innovazioni tecnologiche ha, di fatto, continuamente migliorato le capacità umane di sfruttare sempre nuove risorse naturali, allentando di continuo l'effettività della loro scarsità assoluta (Smulders, 1999). Ma questa evidenza storica presuppone un legame profondo tra investimento in capitale tecnico e progresso tecnologico. Ciò, da un punto di vista teorico, presuppone che il modello di crescita neoclassico presenti un progresso tecnico neutrale alla Hicks, con effetti del risparmio proporzionali su capitale e lavoro per ogni tecnica adottata, o che sia caratterizzato da una funzione di produzione Cobb-Douglas con progresso tecnico neutrale alla Harrod, come nel modello Solow-Swan (Foley, Michl, 1999).

Nel seguito del paper si adotteranno alcune ipotesi restrittive che possono aiutare a spiegare i iatti stilizzati della crescita demografica umana mondiale degli ultimi duecento anni (Scarano, 2008, 2011). In particolare, si assumerà che l'efficacia del lavoro sia una funzione crescente dello stock di capitale, che costituisce il modo più semplice per esprimere l'ipotesi che il progresso tecnico sia il risultato sistematico di una intenzionale attività di ricerca, finanziata in parallelo e proporzionalmente con le altre attività d'investimento.

3. Crescita demografica, *carrying capacity* e sussistenza.

Nel seguito del lavoro si prenderà in considerazione l'intera popolazione mondiale, operante in un unico sistema economico chiuso, la cui *carrying capacity* è definita in relazione all'intero ecosistema planetario(Scarano, 2008, 2011).

Si assuma che esista un livello di consumo individuale, socialmente e storicamente determinato, definito *sussistenza sociale* per differenziarlo dalla *sussistenza biologica*, che è in grado di garantire la riproduzione nel tempo di ciascun individuo con tutte le sue caratteristiche fisiche, psichiche, culturali e sociali e produttive (Scarano, 2008, 2011). In altri termini la *sussistenza sociale* individuale è il livello di consumo pro capite che garantisce la riproduzione a scala invariata del capitale umano. Tale livello di sussistenza, quindi, per definizione, non è costante nel tempo, ma è una funzione del tempo che, per ora, possiamo considerare esogena rispetto al modello. Definito il consetto di sussistenza sociale, si può ora ridefinire la *carrying capacity* come il numero massimo di individui socialmente e storicamente determinati per i quali può essere garantita la sussistenza. Essa, così specificata, dipenderà quindi dal rapporto tra consumo aggregato disponibile e sussistenza sociale individuale (Scarano, 2008, 2011):

[8]
$$N_{\max} = \frac{C(t)}{c(t)}$$

dove:

N_{max} è la *carrying capacity*;
$C(t)$ è il consumo aggregato disponibile al tempo t;
$c(t)$ è la sussistenza sociale individuale al tempo t;

Il consumo aggregato disponibile è a sua volta dato dalla differenza tra il prodotto aggregato e il risparmio aggregato:

[9]
$$C(t) = Y(t) - S(t)$$

dove:

$Y(t)$ è il prodotto aggregato al tempo t;
$S(t)$ è il risparmio aggregato.

Il consumo potenziale risulta quindi essere, dati gli investimenti e i livelli di sussistenza individuale, una grandezza residuale che determina il numero potenziale di nuovi individui che il sistema economico può sopportare.
Si assuma che il livello del prodotto sociale aggregato sia determinato dalla seguente funzione Cobb-Douglas a rendimenti costanti:

[10] $$Y(t) = [K(t)]^{\alpha} [R(t)]^{\beta} [A(t)L(t)]^{1-\alpha-\beta} \qquad 0 < \alpha < 1, \quad 0 < \beta < 0$$

dove:

K(t) è lo stock di capitale fisico in funzione al tempo *t*;
R(t) è lo stock di capitale naturale rinnovabile al tempo *t*;
A(t) è il progresso tecnologico esogeno specificato come efficacia del lavoro al tempo *t*;
L(t) è il numero dei lavoratori occupati al tempo *t*.

Si assuma, inoltre, come nel tradizionale modello di Solow, che i risparmi siano determinati in forma comportamentista non ottimizzante, secondo la seguente formula :

[11] $$S(t) = sY(t)$$

dove *s* è la propensione al risparmio sia media che marginale.

Si assuma inoltre, per semplicità, che vi sia perfetta identità tra risparmi e investimenti. La legge di moto del modello sarà quindi data da:

[12] $$\dot{K}(t) = sY(t) - \delta K(t)$$

dove δ è il tasso di ammortamento del capitale fisico.

Se si assume, per semplicità, che il tasso di attività sia pari a uno, si avrà ovviamente che:

[13] $$L(t) = N(t)$$

Inoltre, seguendo l'esempio di Kaldor (1957), Arrow (1962), and Romer (1990), si assuma che:

- il progresso tecnico sia funzione dell'accumulazione di capitale:

$$A(t)=A[K(t)];$$

- il tasso di variazione di A(t) dipenda dagli investimenti netti nel seguente modo:

[14] $$\frac{\dot{A}(t)}{A(t)} = \frac{A_K}{A(t)}\dot{K}(t) = \frac{A_K}{A(t)}\left[sY(t) - \delta K(t)\right]$$

dove:

$$A_K = \frac{dA(t)}{dK(t)}$$

- $A(t)$ aumenti nel tempo in modo da compensare la riduzione della produttività marginale del capitale:

[15] $$\frac{\partial Y(t)}{\partial A(t)} A_K + \frac{\partial^2 Y(t)}{\left[\partial K(t)\right]^2} \geq 0$$

Se la popolazione cresce secondo il modello logistico precedentemente illustrato, allora:

[16] $$N(t) = \frac{C(t)/c(t)}{1 + qe^{-n_i t}}$$

Dove q è la seguente condizione iniziale:

[17] $$q = \frac{\left[C(0)/c(0)\right] - N(0)}{N(0)}$$

In base all'equazione *[17]*, il tasso di crescita della popolazione sarà:

[18] $$n(t) = n_i\left(1 - \frac{N(t)}{C(t)/c(t)}\right) = n_i\left(1 - \frac{c(t)}{(1-s)y(t)}\right)$$

dove *y(t)* è la produttività del lavoro.

La crescita della popolazione può essere quindi maggiore di zero se e solo se:

[19] $$\frac{(1-s)y(t)}{c(t)} > 1$$

Nel modello coesistono quindi due tipi di accumulazione potenziale: quella del capitale e quella dei lavoratori. La prima dipende dal risparmio mentre la seconda dipende dall'eccesso di beni di consumo rispetto alle esigenze della sussistenza socialmente determinata. Il problema principale è quindi l'individuazione delle condizioni che consentono al consumo disponibile di eccedere quanto richiesto dalla sussistenza.

Se si esamina il tasso di crescita del prodotto in forma differenziale, si avrà:

[20] $$g_Y(t)=\frac{\dot{Y}(t)}{Y(t)}=\alpha\frac{\dot{K}(t)}{K(t)}+(1-\alpha)\frac{\dot{L}(t)}{L(t)}+(1-\alpha)\frac{A_K}{A(t)}\dot{K}(t)$$

Ma:

[21] $$\dot{K}(t)=g_K(t)K(t)$$

dove $g_K(t)$ è il tasso di crescita di $K(t)$.

Se si effettuano le opportune sostituzioni, si avrà che:

[22] $$g_Y(t)=\left[\alpha+(1-\alpha)\frac{A_K}{A(t)}K(t)\right]g_K(t)+(1-\alpha)n(t)$$

Quindi, $g_Y(t)>n(t)$ implica che:

[23] $$\left[\alpha+(1-\alpha)\frac{A_K}{A(t)}K(t)\right]g_K(t)>\alpha n(t)$$

Dividendo entrambi i membri per α e tenendo presente che gli esponenti della Cobb-Douglas sono interpretabili come le elasticità del prodotto rispetto ai fattori, si avrà che:

[24] $$\left[1+\frac{Y_L(t)L(t)}{Y_K(t)K(t)}\frac{A_K}{A(t)}K(t)\right]g_K(t)>n(t)$$

dove:

$Y_L(t)$ è il prodotto marginale del lavoro al tempo t.
$Y_K(t)$ è il prodotto marginale del capitale al tempo t.

In base alla [18], $g_Y(t)>n(t)$ implica che:

[25] $$\left[1+\frac{Y_L(t)L(t)}{Y_K(t)K(t)}\frac{A_K}{A(t)}K(t)\right]g_K(t)>n_i\,\frac{(1-s)y(t)-c(t)}{(1-s)y(t)}$$

Questa condizione mostra che il tasso di crescita del capitale, più l'incremento percentuale nel rapporto tra la quota del prodotto relativa al lavoro e quella relativa al capitale dovuto allo stesso tasso di crescita del capitale, deve essere costantemente maggiore del prodotto tra il tasso di crescita intrinseco della popolazione e la percentuale del reddito pro capite non destinato all'accumulazione di capitale che eccede la sussistenza individuale.

Quindi, l'incremento nell'efficacia del lavoro per unità di capitale deve essere maggiore della riduzione della produttività del capitale in assenza di progresso tecnologico.

4. Risorse naturali e crescita demografica in un modello di interazione di due popolazioni.

Si può ora passare a indagare il ruolo che può giocare la disponibilità di risorse naturali nel determinare la *carrying capacity* e la dinamica demografica umana. A tal fine, per semplicità, consideriamo l'esistenza di una sola risorsa, di tipo rinnovabile. Questo tipo di risorsa è sempre connessa a una popolazione biologica e quindi la sua disponibilità è regolata da dinamiche di tipo demografico. Il problema si configura quindi, da un punto di vista ecologico, come quello dell'interazione demografica di due popolazioni, quella umana e quella connessa alla risorsa rinnovabile.

In questa nuova prospettiva, si può ipotizzare che la velocità istantanea di variazione della numerosità di ciascuna delle due popolazioni sia direttamente proporzionale a una combinazione lineare delle numerosità di entrambe le popolazioni. Ciò consente di scrivere il seguente sistema di equazioni differenziali:

[26]
$$\begin{cases} \dot{N}(t) = k_{11}N(t) + k_{12}R(t) \\ \dot{R}(t) = k_{21}N(t) + k_{22}R(t) \end{cases}$$

dove:

[27]
$$k_{11} = n_i \left[1 - \frac{c(t)N(t)}{(1-s)[K(t)]^{\alpha}[R(t)]^{\beta}[A(t)N(t)]^{1-\alpha-\beta}} \right]$$

[28]
$$k_{12} = \frac{\partial k_{11}}{\partial R} dR = n_i \left[\frac{\beta c(t)N(t)}{\{(1-s)[K(t)]^{\alpha}[R(t)]^{\beta}[A(t)N(t)]^{1-\alpha-\beta}\}R(t)} \right] g_{\pi} R(t)$$

[29]
$$k_{21} = -h$$

[30]
$$k_{22} = g_i \left[1 - \frac{R(t)}{R_{\max}} \right]$$

I valori dei coefficienti k_{ij} misurano l'effetto che la numerosità di ciascuna popolazione esercita sulla velocità di crescita di se stessa e dell'altra. In particolare,

$k_{21}N(t)$ rappresenta la funzione di raccolta della risorsa, essendo *h* il raccolto pro capite annuo. I k_{ij} mostrano quindi la relazione intercorrente tra la crescita (o la decrescita) delle due popolazioni considerate. Se k_{ij}>0, la relazione tra la popolazione i e la popolazione j è di sinergia, se k_{ij}<0 la relazione è distruttiva. Se k_{12} e k_{21} hanno segni opposti, vi è parassitismo di una popolazione sull'altra.

Se il rapporto tra numeratore e denominatore del secondo addendo dell'espressione tra parentesi quadre si mantiene costante, ovvero se numeratore e denominatore variano allo stesso tasso, k_{11} risulterà essere una costante. Altrettanto vale per k_{12}, con riferimento al numeratore e al denominatore dell'espressione tra parentesi quadre. Se inoltre manteniamo costante il tasso di raccolto pro capite e assumiamo che *R(t)* sia di ampiezza trascurabile rispetto a R_{max} , così che il tasso di crescita della risorsa possa essere a lungo approssimato al suo tasso intrinseco, tutti i k_{ij} possono essere assunti costanti, e il sistema [26] diviene allora un sistema di equazioni differenziali del primo ordine, omogenee, lineari, a coefficienti costanti.

Senza dover procedere alla sua integrazione, è possibile indagare la sua dinamica, da un punto di vista qualitativo, studiando i suoi stati di equilibrio. Il sistema, infatti, evolverà allontanandosi dagli stati stazionari di equilibrio instabile e tendendo verso gli stati stazionari di equilibrio stabile (Bertuglia, Vaio, 2003).

Gli stati di equilibrio della dinamica del sistema si identificano con i punti in cui le derivate prime $\dot{N}(t)$ e $\dot{R}(t)$ si annullano. Essi devono quindi soddisfare il seguente sistema di equazioni:

[31]
$$\begin{cases} 0 = k_{11}N(t) + k_{12}R(t) \\ 0 = k_{21}N(t) + k_{22}R(t) \end{cases}$$

Escludendo il caso banale in cui i k_{ij} siano tutti nulli, l'unica soluzione del sistema si ha per *N(t)* = *R(t)* = 0, che identifica l'unico punto di equilibrio del sistema [26] nella sua versione lineare a coefficienti costanti e coincide con la completa estinzione di entrambe le popolazioni. Il problema fondamentale diviene dunque quello di capire se il punto di equilibrio è stabile o instabile e quindi quale è la dinamica del sistema nel suo intorno.

L'integrazione o quadratura di questo sistema, come noto, è costituita da combinazioni lineari di funzioni esponenziali del seguente tipo:

[32]
$$\begin{cases} N(t) = \alpha_1 e^{\beta_1 t} + \alpha_2 e^{\beta_2 t} \\ R(t) = \alpha_3 e^{\beta_1 t} + \alpha_4 e^{\beta_2 t} \end{cases}$$

I valori dei coefficienti α dipendono dalle costanti d'integrazione e non giocano un ruolo fondamentale nell'analisi qualitativa della dinamica. I valori di β_1 e di β_2 sono invece cruciali per l'analisi dinamica, perché determinano le caratteristiche di stabilità o instabilità del punto singolare nello spazio delle fasi. Come noto dalla teoria delle equazioni differenziali, questi valori possono coincidere con le radici dell'equazione caratteristica del sistema [26]:

[33] $$\beta^2 - (k_{11} + k_{22})\beta + (k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}) = 0$$

Ai fini della nostra analisi, la situazione più interessante coincide con il caso in cui le radici della [33] risultano essere entrambe reali ma di segno opposto.

L'equazione caratteristica [33] presenta radici reali di segno opposto solo se $k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21} < 0$ [1]. Questa condizione implica che il prodotto $k_{12}k_{21}$, che rappresenta l'effetto congiunto delle interazioni tra le due popolazioni, sia positivo e maggiore del prodotto $k_{11}k_{22}$, che rappresenta l'effetto congiunto delle dinamiche di autosostentamento o di competizione intraspecifica delle due popolazioni. Ciò significa che $k_{12} > 0$, $k_{21} > 0$ e implica una relazione di forte cooperazione tra le due popolazioni, in cui ciascuna trae grande vantaggio dall'interazione con l'altra. Questa situazione, oltre a caratterizzare il caso, in natura, di organismi simbionti, caratterizza il rapporto tra specie umana e specie viventi, sia vegetali che animali, addomesticate. Nel nostro caso rappresenterebbe una situazione di coltivazione della risorsa rinnovabile, volta a espanderne l'entità a danno di altre componenti dell'ecosistema terrestre aventi utilità nulla o irrilevante per la specie umana. k_{21} non può più rappresentare solo il raccolto pro capite, ma deve essere costituito dal saldo tra il tasso di riproduzione della risorsa per unità lavorativa e il quantitativo raccolto pro capite.

Le soluzioni [32] del modello lineare saranno combinazione lineare di una funzione esponenziale crescente e di una funzione esponenziale decrescente. Il punto singolare nello spazio delle fasi coinciderà con l'origine degli assi ed è un *punto a sella*. Esiste cioè una direzione dello spazio delle fasi lungo la quale il punto singolare agisce come un attrattore e un'altra direzione lungo la quale l'instabilità del punto singolare è massima (vedi fig. 1). Le due direzioni sono individuate dai due seguenti integrali:

[34] $$R(t) = \frac{\alpha_1}{\alpha_3} N(1)$$

[35] $$R(t) = \frac{\alpha_2}{\alpha_4} N(1)$$

La prima direzione è l'unica lungo la quale il sistema gravita verso il punto di sella, che lungo di essa risulta essere quindi un punto di equilibrio stabile. Lungo tutte le altre direzioni il punto di sella risulta essere invece un repulsore. Lungo la direzione [35], in particolare, la velocità di allontanamento risulta essere massima. Le due suddette rette risultano inoltre essere degli asintoti per le orbite del sistema. Ma mentre la prima respinge le orbite che provengono lungo la sua direzione, la seconda attrae verso di se tutte le altre orbite del sistema. Quindi, il punto di sella respinge le orbite del sistema come un punto di equilibrio instabile, ma l'effetto di repulsione varia secondo la direzione (vedi fig.1).

---

[1] Infatti, per le proprietà delle equazioni di secondo grado, $k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21} = \beta_1\beta_2$

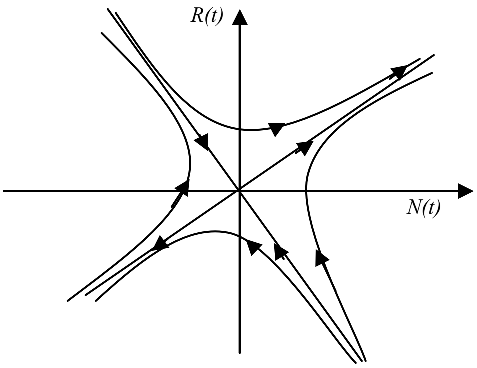

Fig. 1

5. Conclusioni

In base al modello di crescita logistica con *carrying capacity* determinata dal rapporto tra consumo disponibile e sussistenza sociale, in presenza di progresso tecnologico che generi rendimenti crescenti del capitale e di comportamenti demografici di tipo parametrico, la carrying capacity del pianeta per l'umanità risulta espandersi in parallelo con la crescita del prodotto aggregato. Un'accumulazione di capitale che generi endogenamente progresso tecnologico che potenzia l'efficacia del lavoro rende disponibili nuovi beni e servizi per individui aggiuntivi ai quali può essere garantito lo stesso tenore di vita dei propri genitori. In questa prospettiva, un tasso di crescita della popolazione positivo è il risultato di un progressivo spostamento verso l'alto della carrying capacity, generato dall'accumulazione di capitale. La crescita della popolazione di tipo esponenziale, sperimentata dall'umanità negli ultimi due secoli, può quindi essere vista come l'effetto dell'incremento della carrying capacity terrestre nei suoi confronti, piuttosto che come un devastante meccanismo esogeno di pressione sulle risorse naturali, come è stato spesso presentato nella letteratura ambientalista.

Mediante le dinamiche della crescita economica, l'umanità ha progressivamente intercettato flussi di materia e di energia precedentemente usati da altre specie viventi o da processi geofisici e geochimici del pianeta per soddisfare i propri bisogni crescenti. Questo processo può essere ovviamente limitato dalla disponibilità di risorse naturali, che devono in ultima istanza sostenere i processi di produzione e di crescita economica. Ma come mostrato dall'analisi del modello di crescita con risorse rinnovabili, questo limite può essere allentato mediante un processo di "coltivazione" del capitale naturale, che ampli la dimensione dei suoi elementi più funzionali al soddisfacimento dei bisogni umani.

Bibliografia

ARROW K.J., «The Economic Implications of Learning by Doing», *Review of Economic Studies*, vol. 29, 1962, pp. 155-173.

ARROW K. - BOLIN B. - COSTANZA R. - DASGUPTA P. - FOLKE C. - HOLLING C. S. - JANSSON B.O. - LEVIN S. - MALER K.G. - PERRINGS C. - THIRD D.P., «Economic Growth, Carrying Capacity and the Environment», *Science*, vol. 268, 1995, pp. 520–521.

BARRO R.J. - SALA-I-MARTIN X., *Economic Growth*, New York, McGraw-Hill, Inc., 1995.

BARRO R.J. - BECKER G.S., «Fertility Choise in a Model of Economic Growth», *Econometrica*, vol. 57, no. 2, 1989, pp.481-501.

BECKER - G.S. - MURPHY K. M. - TAMURA R., «Human Capital, Fertility, and Economic Growth», *Journal of Political Economy*, vol. 98, no. 5, Part.2, 1990, pp. S12-S37.

BECKER G.S. - GLAESER E.L. - MURPHY K. M., «Population and Economic Growth», *American Economic Review*, vol. 89, no. 2, 1999, pp.145-149.

BENHABIB J. - NISHIMURA K., «Endogenous Fluctuations in the Barro-Becker Theory of Fertility», in Demographic Change and Economic Development, WENIG A. - ZIMMERMANN K.F. (eds.), Berlin, Springer-Verlag, 1989.

BENHABIB J. - NISHIMURA K., «Endogenous Fertility and Growth», *C.V. Starr, Center for Applied Economics, Working Papers*, n. 90-20, 1990.

BERTOLA G., «Factor Shares and Savings in Endogenous Growth». *American Economic Review*, vol. 83, no. 5, 1993, pp. 1184-1198.

BERTUGLIA C. S., VAIO F., *Non linearità, caos, complessità. Le dinamiche dei sistemi naturali e sociali*, Bollati Boringhieri, Torino, *2003*.

CLARK W.C, *Mathematical Bioeconomics. The Optimal management of Renewable Resources*, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1990.

COHEN J.E., *How Many People Can the Earth Support?*, New York, London, Norton & Co., 1995.

COSTANZA R., «What is Ecological Economics? », *Ecological Economics*, vol. 1, no. 1, 1989, pp. 1-7.

EHRLICH P. - HOLDREN J., «The People Problem», *Saturday Review*, vol. 4, 1970, pp. 42-43.

EHRLICH P. - HOLDREN J., «Impact of Population Growth», Science, vol. 171, 1971, pp. 1212-1217.

EHRLICH P. - HOLDREN J., «Impact of Population Growth», in *Population, Resources and the Environment*, RIKER R.G. (ed.), Washington DC, U.S. Government Printing Office, 1972, pp. 365-377.

FOLEY D.K. - MICHL T.R., *Growth and Distribution*, Cambridge (Mass), London, Harvard University Press, 1999.

KALDOR N., «A Model of Economic Growth», *Economic Journal*, vol. 68, 1957, pp. 591-624.

KELLEY A.C., «Population and Development: Controversy and Reconciliation», *Journal of Economic Education*, vol. 16, no. 3, 1985, pp. 177-188.

KING R.G. - REBELO S.T,, «Public Policy and Economic Growth: Developing Neoclassical Implications», *Journal of Political Economy*, vol. 98, no. 5, part II, 1990, pp. S126-S150.

KING R.G. - REBELO S.T, «Transitional Dynamics and Economic growth in the Neoclassical Model», *American Economic Review*, vol. 83, no. 4, 1993, pp. 908-931

KREMER M., «Population Growth and Technological Change: One Million B.C. to 1990», *Journal of Economic Education*, vol. 16, no. 3, pp. 177-188.

LOMBORG B., *The Skeptical Environmentalist*, Cambridge (UK), Cambridge University Press, 2001.

LOTKA A.J., *Analytical Theory of Biological Populations*, New York, London, Plenum Press, 1998.

MALTHUS T.R., *An Essay on the Principle of Population*, Baltimore (Md.), Pelican Books, 1970.

MCNAMARA R.S., *One Hundred Countries, Two Billion People: the Dimensions of Development*, London, Pall Mall Press, 1973.

MEADOWS D.H. - MEADOWS D.L. - RANDERS J. - BEHRENS W., *Limits to Growth*, New York, Universe Books, 1972.

MEADOWS D.H. - MEADOWS D.L. - RANDERS J., *Beyond the Limit. Global Collapse or a Sustainable Future*, London, Earthscan, 1992.

MEADOWS D.H. - MEADOWS D.L. - RANDERS J., *The Limits to Growth: the 30-Year Update*, White River Junction (VT), Chelsea Green Publishing Co., 2004.

REBELO S., «Long-Run Policy Analysis and Long- Run Growth», *Journal of Political Economy*, vol. 99, no. 3, 1991, pp. 500-521.

ROMER P.M., «Increasing Returns and Long-Run Growth», *Journal of Political Economy*, vol. 94, no. 5, 1986, pp. 1002-1037.

ROMER P.M., «Endogenous Technological Change», *Journal of Political Economy*, vol. 98, no. 5, part II, 1990, pp. S71-S102.

ROMER D., *Advanced Macroeconomics*, New York, McGraw-Hill, Inc, 2001.

SCARANO G., «Capital Accumulation, Technological Progress and Environment», *International Journal of Global Environmental Issues*, vol. 8, no. 4, 2008.

SCARANO G., «Population, Earth Carrying Capacity and Economic Growth», *Rivista di Politica Economica*, 2011 (in corso di pubblicazione).

SOLOW R.M., «A Contribution to the Theory of Economic Growth», *Quarterly Journal of Economics*, vol. 70, no. 1, 1956, pp. 65-94.

SOLOW R.M., «The Economics of Resources or the Resources of Economics», *American Economic Review*, vol. 64, no. 2, 1974, pp. 1-14.

SOLOW R.M., «Intergenerational Equity and Exhaustible Resources», *Review of Economic Studies*, vol. 41, 1974, pp. 29-45.

SMIL V., «How Many People Can the Earth Feed? », *Population and Development Review*, vol. 20, no. 2, 1994, pp. 255-292.

SMULDERS S., «Endogenous Growth Theory and the Environment», in *Handbook of Environmental and Resource Economics*, VAN DEN BERGH J. C.J.M. (ed.), Cheltenham, Northampton (Mass), Edward Elgar, 1999.

VERHLUST P.F., «Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement», *Correspondance mathématique et physique*, vol. 10, 1838, pp. 113-121.