



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE ECONOMICHE ED AZIENDALI
"M.FANNO"

CORSO DI LAUREA IN ECONOMIA

PROVA FINALE

**"IL GREEN SOLOW MODEL E LA ENVIRONMENTAL KUZNETS
CURVE: LE ANALISI EMPIRICHE A SUPPORTO E CONTRO"**

RELATORE:

CH.MO PROF. BASSETTI THOMAS

LAUREANDA: CHERUBINI CAMILLA

MATRICOLA N. 1139888

ANNO ACCADEMICO 2018 - 2019

“La candidata, sottoponendo il presente lavoro, dichiara, sotto la propria personale responsabilità, che il lavoro è originale e che non è stato già sottoposto, in tutto o in parte, dalla candidata o da altri soggetti, in altre Università italiane o straniere ai fini del conseguimento di un titolo accademico. La candidata dichiara altresì che tutti i materiali utilizzati ai fini della predisposizione dell’elaborato sono stati opportunamente citati nel testo e riportati nella sezione finale ‘Riferimenti bibliografici’ e che le eventuali citazioni testuali sono individuabili attraverso l’esplicito richiamo al documento originale”

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
1. THE ENVIRONMENTAL KUZENTS CURVE	6
1.1 INTRODUZIONE.....	6
1.2 MODELLI TEORICI.....	8
1.3 ANALISI EMPIRICA.....	15
1.3.1 IL MODELLO ECONOMETRICO	15
1.3.2 I PRIMI RISULTATI EMPIRICI.....	16
1.4 LE CRITICHE	17
2. THE GREEN SOLOW MODEL.....	19
2.1 INTRODUZIONE.....	19
2.2 IL MODELLO	21
2.3 CONSIDERAZIONI E STATICA COMPARATA.....	25
3. LIMITI DEL GREEN SOLOW MODEL	28
3.1 LA CONVERGENZA	28
3.1.1 THE SPATIAL GREEN SOLOW MODEL.....	29
3.1.2 LA STRUTTURA	30
3.2.3 METODOLOGIA E DATI.....	32
3.2.4 RISULTATI.....	33
3.2 INDICATORI DI IMPATTO AMBIENTALE.....	35
3.2.1 IL MODELLO CIEP	36
3.2.2 METODOLOGIA E DATI.....	37
CONCLUSIONE.....	42
BIBLIOGRAFIA	43

INTRODUZIONE

A partire dalla metà del XX sec., quella del legame tra sviluppo economico e degrado ambientale è emersa essere una delle tematiche più dibattute tra gli economisti. La presa di coscienza delle gravi conseguenze dei cambiamenti climatici ha portato a una generale tematizzazione del problema ecologico. Tale questione, che ha inevitabilmente incorporato il sistema politico e istituzionale, responsabile della Regolamentazione, ha sottolineato l'urgenza di previsioni sull'evoluzione dell'ecosistema e la necessità di comprendere le conseguenze dell'attività economica sull'ambiente.

Numerosi ricercatori hanno cercato di indagare tale relazione, proponendo interpretazioni differenti e spesso conflittuali.

Una tra le posizioni più condivise prevede l'impatto positivo, nell'ambiente, dello sviluppo economico nel lungo periodo, il quale potrebbe quindi rappresentare un potente strumento per la mitigazione del problema.

Tale visione, nota come "*Environmental Kuznets Curve*", è divenuta un punto di partenza per modelli di economia ambientale, e un nodo di fondamentale importanza per molteplici studi empirici inerenti al rapporto crescita-ambiente. Tra i tanti, Brock e Taylor (2010) sviluppano un modello teorico capace di mettere in relazione la EKC con il classico modello di Solow: il "*Green Solow Model*". In particolare, viene dimostrato come le forze alla base della convergenza economica del modello di Solow abbiano anche un ruolo centrale nella convergenza delle emissioni di agenti inquinanti.

Nonostante il *Green Solow Model* riesca a dare una spiegazione teorica valida all'ipotesi della EKC, è chiaro che, essendo un modello, esso sia per sua stessa natura costruito su alcune assunzioni - che potrebbero limitarne l'efficacia. Per tale ragione - è legittimo chiedersi se l'eliminazione di determinate semplificazioni possa portare a risultati empirici differenti.

Nel seguente elaborato verranno proposte due analisi empiriche che, nell'esaminare la relazione tra qualità ambientale e crescita economica, si focalizzano su aspetti non convenzionali nella letteratura precedente, che gli stessi Brock e Taylor hanno ignorato.

In particolare, nel primo caso viene riconosciuta la possibilità di un'influenza delle nazioni confinanti nell'evoluzione del livello di emissioni, ragion per cui viene inclusa una variabile nel *Green Solow Model* che tenga conto di tale fenomeno. Inoltre, nell'analisi empirica vengono considerate le caratteristiche individuali, che differiscono tra paesi.

Nel secondo, invece, si prendono le mosse da una critica ampiamente condivisa inerente alle analisi empiriche: nella maggior parte dei casi i modelli econometrici sono condotti su un indice singolo d'impatto ambientale, ignorando conseguentemente le altre dimensioni dell'ecosistema. L'analisi proposta di seguito introduce un indicatore composito in grado di catturare più di una sfera ambientale, e quindi di esaminare la tematica in ottica più generale.

1. THE ENVIRONMENTAL KUZENTS CURVE

1.1 INTRODUZIONE

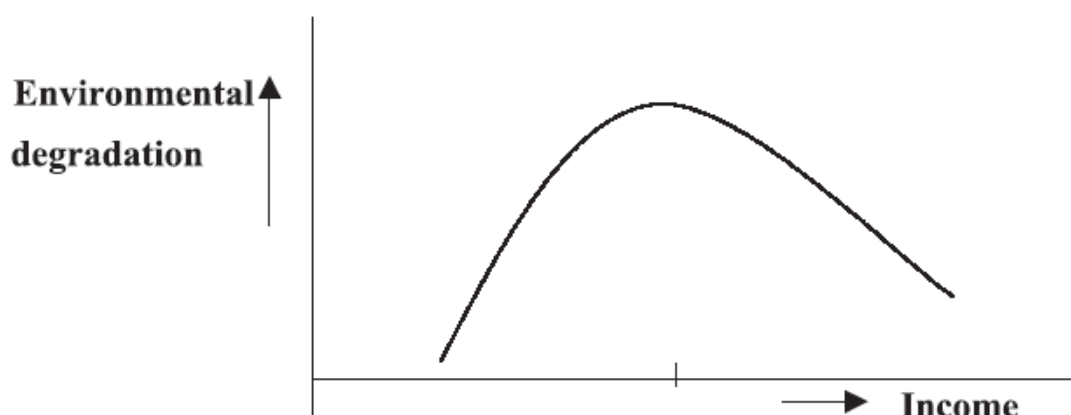
Una delle più note intuizioni in ambito di economia ambientale, divenuta il fulcro di un fervido dibattito da parte degli economisti, è la cosiddetta *Environmental Kuznets Curve*: una ipotizzata relazione tra il reddito *pro capite* di un'economia e determinati indicatori del degrado ambientale.

Alla base dell'ipotesi della EKC vi è l'idea che una continua crescita economica sia in grado di migliorare la qualità ambientale a seguito del raggiungimento di un adeguato livello di reddito. In altre parole: nei primi stadi dello sviluppo dell'economia, la crescita è associata a un aumento dei livelli di inquinamento, mentre nelle fasi successive, raggiunto un determinato livello di ricchezza *pro capite*, si assiste a un'inversione di tendenza, che comporta la riduzione del deterioramento ambientale.

L'andamento del degrado ambientale può essere rappresentato graficamente da una funzione a U rovesciata del reddito, come è possibile notare dalla Figura 1.

Il punto in cui si verifica l'inversione di tendenza della curva è noto come punto di svolta e rappresenta il reddito medio *pro capite* oltre il quale la qualità ambientale migliora.

Figura 1. The Environmental Kuznets Curve



Fonte: DINDA, S., 2004. Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey. *Ecological Economics*, 49(4), 431–455.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.02.011>

Il nome «*Environmental Kuznets Curve*» venne conferito per analogia con le ricerche di Simon Kuznets (premio Nobel nel 1971), il quale postulò una relazione di tipo parabolico tra la disuguaglianza sociale e reddito pro capite. È evidente che gli studi sulla EKC si siano ispirati in maniera significativa all'intuizione di Kuznets, applicando tuttavia l'idea a fenomeni di carattere ambientale.

Il concetto della EKC emerse per la prima volta alla fine dello scorso secolo all'interno dell'indagine di Grossman e Krueger (1991) sui potenziali impatti dell'accordo nordamericano di libero scambio (*North American Free Trade Agreement, NAFTA*) e divulgata successivamente nel *World Development Report 1992* della Banca Mondiale per la Ricostruzione e lo Sviluppo (*International Bank for Reconstruction and Development IBRD*). The *Environmental Kuznets Curve* mise in discussione il pensiero dominante in quegli anni: all'epoca, infatti, si riteneva che l'incremento del reddito conducesse inevitabilmente a un maggior inquinamento, dal momento che un maggior benessere implica un consumo più intenso e conseguentemente maggior produzione di agenti inquinanti.

L'idea che la crescita economica sia un prerequisito per mitigare l'inquinamento e migliorare la qualità ambientale, riscosse un notevole successo: alcuni autori cercarono di rafforzare l'argomentazione proponendo riflessioni fortemente a favore.

“[There is] clear evidence that, although economic growth usually leads to environmental degradation in the early stages of the process, in the end the best—and probably the only—way to attain a decent environment in most countries is to become rich” (Beckerman, 1992).

Tuttavia, non è mai stato affermato che la EKC sia una forma funzionale tipica di tutti gli agenti inquinanti o di tutte le sfere d'impatto ambientale. Esistono numerose evidenze empiriche contrarie, ragion per cui tale idea è stata fin dal principio oggetto di molteplici critiche, che verranno esposte successivamente.

1.2 MODELLI TEORICI

Nonostante la EKC sia un fenomeno essenzialmente empirico, molti hanno cercato di individuare i fattori economici all'origine dell'incremento o del declino del degrado ambientale nel corso della crescita.

Innanzitutto, i tre effetti considerati prevalenti per comprendere come lo sviluppo dell'economia influenzi la qualità ambientale sono: l'effetto di scala, l'effetto di composizione e gli effetti tecnologici (Grossman and Krueger, 1991).

L'effetto di scala è alla base della visione tradizionale che considera la crescita e la qualità ambientale come due obiettivi mutualmente esclusivi. L'incremento degli *output* richiede una maggior quantità di *input* e ciò implica l'utilizzo di più risorse naturali per il processo produttivo. Le emissioni sono l'effetto collaterale della produzione e contribuiscono al deterioramento dell'ambiente.

Cionondimeno, la crescita è alla base dei cambiamenti strutturali del sistema produttivo e questo comporta un impatto positivo sull'ambiente: apparati produttivi diversi hanno impatti ambientali differenti. Con il progresso, infatti, la composizione del sistema economico tende a svilupparsi e aumentano gradualmente le attività che generano un inquinamento minore. Inizialmente il deterioramento dell'ambiente cresce a causa del passaggio da industrie leggere (agricoltura e industria tessile) a quelle pesanti (industria mineraria, meccanica e simili). Successivamente, raggiunti elevati livelli di progresso economico, emergono attività ad alta conoscenza tecnologica e il settore dei servizi basati su l'informazione, evidentemente a minor impatto ambientale, provocando quindi l'inversione di tendenza.

Di primaria importanza per la spiegazione del fenomeno è inoltre il progresso tecnologico: l'incremento del reddito della nazione consente infatti un notevole investimento in Ricerca e Sviluppo, che porta all'introduzione di nuovi impianti e sistemi produttivi. Tale miglioramento dello stato della tecnologia da una parte consente di avere una produzione più efficiente, ovvero l'utilizzo di minori *input* per la medesima quantità di *output*, *ceteris paribus*, dall'altra l'adozione di nuove tecnologie in grado di emettere una minor quantità di inquinanti per unità di *input*.

Secondo la EKC, quindi, nei primi stadi della crescita l'effetto di scala provoca un crescente deterioramento della qualità ambientale, mentre in un secondo momento gli effetti positivi,

ovvero quelli tecnologici e di composizione della struttura del sistema produttivo, tendono a prevalere (Dinda, 2004).

Parte della letteratura teorica si è focalizzata sul ruolo della Regolamentazione, riconoscendo gli indiscutibili effetti positivi che le politiche mirate possono avere nell'ambiente. Con la crescita economica, infatti, si sviluppano nuove istituzioni sociali in grado di far fronte alle mutate preferenze dei cittadini. Secondo Panayotou (1997) la crescita del PIL di un paese crea le condizioni per l'incremento della qualità ambientale grazie alla crescente domanda di condizioni migliori e la capacità di reperire le risorse necessarie per portare avanti il cambiamento. Pertanto, se la riduzione del degrado ambientale si verifica o meno, dipende in maniera primaria dal governo, dalle istituzioni e dal funzionamento del mercato. Gli strumenti a disposizione dello Stato sono numerosi, come ad esempio l'introduzione di standard e tasse sull'inquinamento o altri strumenti in grado di internalizzare le esternalità negative che non si riflettono nei prezzi di mercato. Tra questi, di rilevanza primaria sono i cosiddetti diritti di proprietà: i capitali di carattere ambientale vengono protetti da diritti di proprietà privata e poi allocati in maniera efficiente in modo da ridurre al minimo l'impatto della produzione sull'ambiente.

Numerosi modelli teorici, come quello di McConnell, 1997, si sono invece concentrati sulle implicazioni microeconomiche delle scelte dei consumatori. Alla base di tali studi vi è il cambiamento delle preferenze rispetto alla qualità ambientale, dovuto all'aumento del reddito. Gli individui, raggiunti elevati standard di vita, pongono più attenzione alla qualità dell'ambiente, e ciò induce alla richiesta di nuove misure volte al miglioramento e a cambiamenti strutturali nell'economia (Dinda, 2004).

Da tali intuizioni è stato enfatizzato il ruolo dell'elasticità della domanda di qualità ambientale η a variazioni del reddito, che può essere definita come:

$$\eta = \frac{(\Delta E)\%}{(\Delta Y)\%} = \frac{\partial E}{\partial Y} \frac{Y}{E} \quad (1)$$

Dove E rappresenta la quantità di qualità ambientale domandata e Y il reddito. La (1) mostra che l'elasticità della domanda di qualità ambientale η è la variazione nella quantità domandata di qualità ambientale E rispetto a cambiamenti nel valore del reddito Y . Se $|\eta| < 1$, la qualità ambientale è un bene normale, mentre se $|\eta| > 1$ allora E è un bene di "lusso", ovvero un bene che gli individui tendono a domandare solamente ad elevati livelli di reddito. La maggior parte

degli autori, tra i quali Dinda (2004), considera η come un bene di lusso, tuttavia non è facile stimare la quantità di beni ambientali domandati, data la loro natura.

Per tale motivo, sono state proposte modalità alternative per misurare l'elasticità al reddito, come ad esempio “*The Willingness to Pay*” (*WTP*), ovvero la disponibilità a pagare per migliorare la qualità ambientale, all'aumentare del reddito. Secondo Pearce (2003) esistono due potenziali fonti empiriche per calcolare la *WTP*: la prima è lo studio dei benefici e dei costi di specifiche misure governative, mentre la seconda richiama gli studi della valutazione di beni che non hanno valore di mercato, in particolare i metodi di (a) *travel cost* e (b) *contingent valuation*¹.

L'elasticità alla *WTP* può essere definita come:

$$\omega = \frac{\partial WTP}{\partial Y} \frac{Y}{WTP} \quad (2)$$

Dove ω è l'elasticità della “*Willingness to Pay*”, *WTP* è la disponibilità a pagare per il miglioramento della qualità ambientale e *Y* rappresenta il reddito. Molti studi mostrano che, l'elasticità della “*Willingness to Pay*” è minore dell'unità, non giustificando l'idea che la qualità ambientale sia un cosiddetto “bene di lusso”.

In generale, la previsione di cambiamenti delle preferenze dei consumatori e l'analisi delle implicazioni microeconomiche sono compiti estremamente complicati. Inoltre, a seconda delle preferenze, si verificano *pattern* di consumo differenti e l'impatto delle azioni portate avanti dipende dall'utilità degli agenti. Per tale ragione, anche se la comprensione di meccanismi microeconomici è sicuramente utile, è difficile analizzarli in maniera sufficientemente approfondita (Kaika and Zervas, 2013).

Esistono vari modelli teorici che tentano di spiegare come, l'interazione tra preferenze dei consumatori e tecnologie, dia vita ad andamenti differenti della qualità ambientale in relazione al tempo. Tali modelli possono essere suddivisi in due categorie: i modelli statici, che considerano la crescita economica come il semplice aumento del livello di output, e quelli dinamici dove sia la crescita economica sia l'evoluzione delle emissioni o della qualità

¹ Per l'approfondimento della tematica si veda: PEARCE, D., 2003. Conceptual Framework for analysing the distributive impacts of environmental policies.

ambientale sono determinati dai cambiamenti dell'utilità degli agenti economici o delle tecnologie di produzione (Kijima et al., 2010)

I modelli statici possono essere ulteriormente classificati in due categorie, in base all'inclusione della funzione di produzione o meno: alcuni esaminano solamente le caratteristiche della funzione di utilità, ovvero il trasferimento dell'utilità marginale del consumo e dell'inquinamento, mentre altri considerano anche gli effetti del progresso tecnologico.

Tra i primi, Kijima et al. (2010) illustrano il modello proposto da McConnell (1997), il quale studia il ruolo dell'elasticità della domanda di qualità ambientale, quando il Reddito dipende dai consumi e dall'abbattimento delle emissioni.

Siano P il livello di inquinamento e C il consumo. Si assuma che il livello di inquinamento P sia una funzione del consumo C e delle spese di abbattimento A , quindi $P = P(C, A)$

E siano imposte le condizioni seguenti:

$$P_C > 0, P_{CC} > 0, P_A < 0, P_{AA} > 0, P_{AC} = 0,$$

Ovvero che la derivata parziale prima e seconda dell'inquinamento rispetto al consumo siano entrambe positive, mentre rispetto all'abbattimento la derivata prima sia negativa mentre quella seconda positiva. Ciò significa che all'aumentare del consumo, l'inquinamento cresce a rendimenti marginali crescenti, mentre all'aumentare dell'abbattimento decresce, ma a rendimenti marginali decrescenti.

L'utilità dell'agente rappresentativo è data da una funzione del consumo C e dell'inquinamento P :

$$U = U(C, P) \tag{3}$$

e soddisfa le seguenti condizioni: la sua derivata prima rispetto al consumo C è positiva $U_C > 0$, la derivata seconda rispetto al consumo negativa $U_{CC} < 0$, mentre rispetto all'inquinamento P , la derivata prima e la seconda risultano entrambe minori o uguale a zero, $U_P \leq 0, U_{PP} \leq 0^2$. Il reddito dell'agente rappresentativo è indicato da Y ed è allocato tra abbattimento A e consumo C , perciò il vincolo di bilancio è dato da $Y = C + A$.

La massimizzazione dell'utilità dell'agente U rispetto al vincolo di bilancio Y è data da:

$$\max U(C, P(C, Y - C)) \tag{4}$$

² I pedici corrispondono alle variabili rispetto alle quali vengono derivate le funzioni.

Quando $A > 0$, la condizione di primo ordine per il problema di massimizzazione è data da

$$U_C + U_P P_C = U_P P_A \quad (5)$$

$$U_C + U_P (P_C - P_A) = 0, \quad (6)$$

Viene dimostrato che la differenziazione di tale condizione, con le relative manipolazioni, porta a:

$$dP = [P_C(-U_P P_{AA}) + P_A(-U_{CC} - U_P P_{CC} + U_{CP}(P_A - P_C))] \frac{dY}{-\Delta} \quad (7)$$

Dove Δ è il determinante della matrice i cui elementi sono dati da la derivata parziale di secondo ordine di U e P .

I segni dei termini sono importanti per capire le origini della tendenza della EKC derivanti dall'equazione. McConnell (1997) dimostra che il segno di U_{CP} dipende dall'elasticità della domanda di qualità ambientale al reddito³. U_{CP} può assumere sia valori positivi che negativi, ma valori abbastanza elevati provocano un cambiamento nel segno di dP . Se U_{CP} fosse positiva e abbastanza elevata, l'elasticità sarebbe negativa: questo provocherebbe una crescita dell'inquinamento poiché il fattore $P_A(P_A - P_C)$ è positivo. In tal caso U_{CP} rappresenterebbe la tendenza della qualità ambientale a peggiorare, all'aumentare del consumo. Tuttavia, quando U_{CP} cambia il valore da fortemente positivo a fortemente negativo, allora l'andamento di P rispetto al reddito Y mostra la forma di U rovesciata.

Successivamente, seguendo il modello di McConnell (1997), Andreoni e Levinson (2001) propongono un modello più semplificato dove la funzione di Utilità dell'agente rappresentativo è data da:

$$U = C - zP, \quad (8)$$

Dove P rappresenta l'inquinamento, C il consumo e z la disutilità marginale, causata dall'inquinamento. Per semplicità z è fissata pari a 1. Il livello d'inquinamento dipende dal consumo e dallo sforzo di abbattimento dell'inquinamento E ed è dato da: $P = C - C^\alpha E^\beta$ con $\alpha, \beta > 0$.

³ McCONNELL, K. E. 1997. Income and the demand for environmental quality. *Environment and Development Economics*, 2(4), 383-399. <https://doi.org/10.1017/s1355770x9700020x>

Denominando il Reddito M e dati i limiti di reddito, ovvero il vincolo di bilancio $C + E = M$, il consumo ottimale e lo sforzo di abbattimento ottimale saranno:

$$C^* = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} M, \quad E^* = \frac{\beta}{\alpha + \beta} M. \quad (9)$$

Sostituendo C^* e E^* nella funzione di inquinamento P e differenziando rispetto a M otterremo:

$$\frac{\partial P^*}{\partial M} = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} - (\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right)^\beta M^{\alpha + \beta - 1} \quad (10)$$

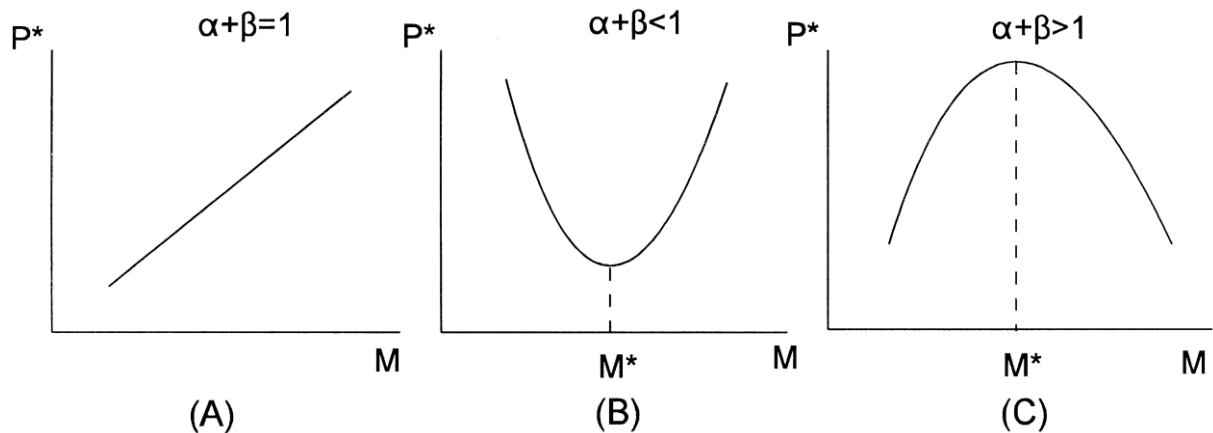
Da tale relazione possiamo dedurre che, quando $\alpha + \beta = 1$, lo sforzo dell'abbattimento presenta rendimenti di scala costanti, perciò la relazione tra inquinamento e reddito sarà lineare;

Se invece $\alpha + \beta \neq 1$, allora viene calcolata la derivata seconda come:

$$\frac{\partial^2 P^*}{\partial M^2} = -(\alpha + \beta - 1)(\alpha + \beta) \left(\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \right)^\alpha \left(\frac{\beta}{\alpha + \beta} \right)^\beta M^{\alpha + \beta - 2} \quad (11)$$

Notiamo quindi che se $\alpha + \beta < 1$, e perciò l'abbattimento presenta rendimenti di scala decrescenti, la derivata seconda dell'inquinamento P rispetto al reddito M , è convessa. Mentre, se $\alpha + \beta > 1$, ovvero quando l'abbattimento presenta rendimenti di scala crescenti, la derivata seconda di P è concava, dunque l'andamento del livello d'inquinamento presenterà la forma a U rovesciata descritta dalla EKC, rispetto al Reddito M .

Figura 2: Possibili andamenti della relazione Reddito-Inquinamento, al variare del valore di $(\alpha + \beta)$



Fonte: Andreoni, J., & Levinson, A., 2001. The simple analytics of the environmental Kuznets curve. *Journal of Public Economics*, 80(2), 269–286. [https://doi.org/10.1016/S0047-2727\(00\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0047-2727(00)00110-9)

Questo significa che se gli effetti di abbattimento mostrano rendimenti di scala crescenti, la EKC si verifica anche se non viene presa in considerazione la funzione di produzione. L'intuizione alla base del modello è che, quando il reddito di un paese è relativamente basso, anche il livello di consumo sarà basso: in tale situazione i rendimenti di abbattimento delle emissioni, anche se crescenti, non hanno un impatto notevole nella qualità dell'ambiente e le tecnologie di abbattimento necessitano di un investimento iniziale elevato. Per tale ragione uno Stato con una economia in via di sviluppo, non abbastanza ricca e/o inquinante, non avrà incentivi a spendere una somma notevole di denaro per introdurre tali tecnologie. Contrariamente, appena il paese raggiunge livelli di reddito sufficientemente alti, il consumo maggiore implica una maggior disutilità dell'inquinamento: perciò, avendo le risorse da poter investire, è preferibile una tecnologia ad alti costi fissi ma che garantisce costi marginali minori.

I modelli dinamici presentano delle caratteristiche molto differenti tra loro, per tale ragione non è facile sintetizzarne i risultati (Stern, 2017). La EKC, in generale, emerge da processi dinamici, dato che una determinata quantità del capitale viene dedicata allo sviluppo del settore ambientale. Il capitale totale viene suddiviso in due: una parte viene utilizzata per processi che creano inquinamento e danneggiano l'ambiente e l'altra è finalizzata al miglioramento della qualità ambientale (Dinda, 2004).

Alcuni modelli studiano la gestione, a livello istituzionale, del problema. Un chiaro esempio può essere il lavoro di Jones e Manuelli (2001), nel quale viene esposto un modello che si sviluppa su due orizzonti temporali e che considera la successione generazionale: i risultati rivelano che ogni generazione ha un'influenza nella Regolamentazione che concerne l'ambiente, nelle tasse da pagare in relazione al livello d'inquinamento prodotto o nella restrizione della scelta delle tecnologie. Ulteriori modelli, analizzano l'allocazione del reddito tra consumo e abbattimento in due periodi temporali, o in un arco di tempo continuo. (Kijima et al. 2010).

Altri invece si sono focalizzati sulle tecnologie di produzione: tra tutti, di notevole rilevanza è l'opera di Stokey' (1998) che esamina come i diversi sistemi di produzione influenzino la qualità ambientale. L'esito del loro studio mostra che tecnologie a basso impatto ambientale vengono adottate soltanto dopo una determinata soglia di reddito e solo da quel momento il livello di degrado ambientale inizia a diminuire.

Infine, alcuni autori sviluppano modelli di crescita neoclassici, con l'introduzione di tecnologie di abbattimento delle emissioni, dimostrando che in condizioni di equilibrio la crescita

dell'inquinamento è positivamente correlata con la crescita dell'*output* e negativamente correlata con il livello di emissioni: questo conduce alla convergenza delle emissioni tra paesi. Tra tutti, noto è il modello di Brock e Taylor (2010) "*The Green Solow Model*" che verrà analizzato in modo approfondito nel capitolo successivo.

I vari studi che tentano di illustrare l'origine della curva a U rovesciata si concentrano su aspetti differenti del fenomeno e i loro risultati dipendono inevitabilmente dalle assunzioni, necessarie per la semplificazione della realtà. Per tale ragione l'affiancamento di studi empirici è essenziale al fine di dare una giustificazione all'ipotesi sottostante *l'Environmental Kuznets Curve*.

1.3 ANALISI EMPIRICA

1.3.1 IL MODELLO ECONOMETRICO

Per testare le possibili relazioni tra il livello di inquinamento o pressione ambientale e reddito (*pro capite*) viene spesso adottata la seguente specificazione, come semplice modello di regressione lineare:

$$y_{it} = \alpha_i + \beta_1 x_{it} + \beta_2 x_{it}^2 + \beta_3 x_{it}^3 + \beta_4 z_{it} + \varepsilon_{it}$$

Dove y è la variabile dipendente di degrado ambientale che può essere rappresentata da diversi indicatori ambientali; x è il Reddito e z comprende tutte le altre variabili che influenzano il degrado ambientale. In questo caso il pedice i si riferisce al paese, città o regione, mentre t al tempo. A è la costante che dipende dalle caratteristiche del paese, β_k è il coefficiente della variabile esplicativa k ($x_{it}, x_{it}^2, x_{it}^3, z_{it}$). Infine, ε rappresenta l'errore standard.

In base all'analisi che si desidera portare avanti, il modello può variare. Per esempio, la variabile x al cubo è introdotta negli studi che cercano di esaminare l'esistenza di una curva a forma di N, piuttosto che di U rovesciata. Inoltre, alcuni autori lavorano con una trasformazione logaritmica (logaritmo naturale solitamente) per evitare valori negativi o pari a zero. Infatti, come afferma Stern (2004), l'attività economica implica necessariamente la produzione d'inquinamento: dunque se la variabile dipendente assumesse valori negativi o pari a zero non sarebbe intuitivamente corretto.

Il modello presentato permette di testare diverse forme dell'andamento della qualità ambientale in relazione al reddito o alla crescita economica (Dinda, 2004).

I casi possibili sono:

- (i) $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$. L'andamento risulta essere piatto oppure non vi è alcuna relazione tra la variabile dipendente e le variabili esplicative.
- (ii) $\beta_1 > 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$. La relazione è monotonamente crescente o lineare.
- (iii) $\beta_1 < 0$ e $\beta_2 = \beta_3 = 0$. La relazione è monotonamente decrescente.
- (iv) $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ e $\beta_3 = 0$. La relazione presenta la forma di U rovesciata, descritta dalle EKC.
- (v) $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ e $\beta_3 = 0$. La relazione presenta la forma a U.
- (vi) $\beta_1 > 0, \beta_2 < 0$ e $\beta > 0$. La relazione presenta la forma a N.
- (vii) $\beta_1 < 0, \beta_2 > 0$ e $\beta < 0$. La relazione presenta la forma a N rovesciata.

Possiamo quindi notare che il *pattern* della EKC si verifica solamente nel (iv) caso (Dinda, 2004). In tale situazione è possibile calcolare il valore del “*turning point*”, ovvero il valore di reddito corrispondente al massimo livello di deterioramento ambientale, con la seguente formula:

$$x^* = \tau = -\frac{\beta_1}{2\beta_2}, \text{ oppure nella versione logaritmica } x^* = \tau = \exp\left(\frac{\beta_1}{2\beta_2}\right)$$

La maggior parte delle analisi utilizza *time-series cross-sectional data* (TSCS, serie storiche e dati sezionali) ovvero dati raccolti da una popolazione che permettono di studiare le differenze tra i soggetti ed estrapolare le relazioni tra le variabili considerate. I dati relativi al degrado ambientale provengono da fonti differenti, generalmente da database come GEMS (*Global Environmental Monitoring System*), ORNL (*Oak Ridge National Laboratory*), *World Resources*, OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*), *World Health Organization's Health Database*, *International Energy Agency* (IEA), *Environmental Protection Agency for US data* e altre fonti per micro dati. Mentre quelli relativi al reddito e altre variabili economiche provengono da *Penn World Tables* o *World Bank*.

1.3.2 I PRIMI RISULTATI EMPIRICI

L'opera considerata il fondamento dell'ipotesi della EKC è imputabile a Grossman e Krueger (1991) i quali analizzarono gli impatti del NAFTA sulla qualità ambientale del Messico per le emissioni di SO₂, *dark matter* e particelle totali sospese (PTS) con dati presi dal *data set* GEMS. Ogni regressione è svolta attraverso una funzione cubica a livelli del PIL, aggiustato per la Parità del Potere d'Acquisto e altre variabili relative al luogo, tempo e una d'intensità di

commercio. Il *turning point* rilevato è \$4000-\$5000 per SO₂ e *dark matter*, mentre il PTS sembra decrescere anche per livelli di reddito bassi.

Particolarmente rilevante per la diffusione della EKC è l'indagine svolta da Shafik e Bandyopadhyay (1992), pubblicata nel *World Development Report 1992*. Gli autori prendono in considerazione 10 indicatori d'impatto ambientale. I risultati mostrano che l'andamento a U rovesciata non viene verificato per la maggior parte di questi: la mancanza di acqua e sanità urbana decrescono all'aumentare del reddito e anche rispetto al tempo; la relazione tra deforestazione e reddito/tempo non risulta significativa, mentre la qualità dei fiumi tende a peggiorare. I rifiuti urbani e le emissioni di carbonio *pro capite* crescono inequivocabilmente all'aumentare del reddito. La EKC viene verificata solamente per i due inquinanti d'aria locali, PTA e SO₂, con il punto di svolta corrispondente a un reddito *pro capite* di \$3000-\$4000 (Stern, 2017).

A partire da tali ricerche, si è sviluppata una vasta letteratura, con modelli più sofisticati e con l'introduzione di addizionali variabili esplicative. Tuttavia, rimane anche dal punto di vista empirico, un disaccordo sull'esistenza della EKC: alcuni hanno avuto un riscontro positivo e continuano a sostenerne l'esistenza, mentre altri, prendendo in considerazione campioni di paesi differenti o analizzando indicatori ambientali alternativi non sono arrivati alle medesime conclusioni e hanno messo seriamente in discussione il possibile impatto positivo della crescita economica sull'ambiente.

1.4 LE CRITICHE

L'*Environmental Kuznets Curve* ha generato non solo un grande seguito ma anche numerose critiche sia da un punto di vista concettuale sia metodologico, divenendo protagonista di un acceso dibattito.

Già dalla presentazione del modello nel *World Development Report 1992*, Arrow *et al.*, (1995) invitano a porre particolare attenzione alle conclusioni che possono essere tratte dall'ipotesi, soprattutto al fine di una gestione governativa. Innanzitutto, il fatto che la crescita possa portare miglioramenti per alcuni indicatori ambientali non significa che sia sufficiente come soluzione generale, che gli effetti sull'ecosistema possano essere ignorati e nemmeno che le risorse terrestri siano in grado di sopportare una crescita indefinita. Il modello, inoltre, non considera le conseguenze della riduzione degli agenti inquinanti, che invece potrebbe comportare un peggioramento della qualità ambientale in altri paesi o la crescita di altri tipi d'inquinamento. Infatti, nonostante sia dimostrata la riduzione delle emissioni di alcuni gas negli anni, grazie a

tecnologie innovative o norme più stringenti, la quantità totale dei rifiuti rimane ancora molto alta e probabilmente non è diminuita a livello *pro capite*.

Dal punto di vista concettuale la critica più comune che viene avanzata all'ipotesi è l'impossibilità di generalizzare l'andamento parabolico rispetto al reddito, per tutti i tipi di indicatori di degrado ambientale. La relazione della EKC, infatti, è confermata solamente per inquinanti d'aria locali con impatti nel breve periodo, come SO₂. Gli *Stock* di rifiuti e gli inquinanti che hanno un impatto globale e a lungo termine, come il CO₂, presentano generalmente una relazione crescente del reddito, non dando evidenza di alcun cambiamento di tendenza.

Dinda (2004) afferma che la EKC potrebbe non verificarsi nel lungo periodo. Indagini recenti, difatti, mostrano che, anche se inizialmente l'andamento segue la forma a U rovesciata, raggiunti elevati livelli di reddito, la relazione potrebbe tornare nuovamente positiva e presentare invece un profilo a N.

Per quanto riguarda il modello econometrico, nonostante sia valido per verificare l'evidenza empirica della EKC, rimane un modello a forma ridotta, ovvero è la soluzione di un sistema strutturale di equazioni (sconosciute) che danno forma ad una relazione finale tra degrado ambientale e reddito (Kaika e Zervas, 2013). Questo modello, nonostante ci permetta di misurare direttamente l'impatto del reddito *pro capite* nei mutamenti ambientali, presenta dei limiti. L'andamento proposto dalla EKC infatti potrebbe essere causato da diversi fattori della crescita economica, molti dei quali interdipendenti; risulta perciò difficile individuare quali sono quelli dominanti (Dinda, 2004). Inoltre, un modello a forma ridotta è in grado di riflettere la correlazione tra le variabili ma non il meccanismo causale sottostante e questo potrebbe avere ripercussioni a livello di Regolamentazione: Stern et al. (1996) sottolineano il fatto che nella EKC non viene considerato alcun *feedback* dallo stato ambientale per rallentare la crescita economica, perciò qualsiasi tipo di danno dell'ambiente non può avere effetti sulla produzione e questo risulta irrealistico.

Ulteriori critiche al modello econometrico utilizzato per l'analisi si focalizzano su quattro questioni fondamentali: l'eteroschedasticità, variabili omesse, simultaneità e cointegrazione. Come tutti i modelli presenta delle debolezze nel descrivere un fenomeno reale e questo ci suggerisce di prestare molta attenzione alle conclusioni che ne vengono tratte, soprattutto nella gestione a livello governativo e istituzionale del problema ambientale.

2. THE GREEN SOLOW MODEL

2.1 INTRODUZIONE

Brock e Taylor (2010) inseriscono all'interno di un tradizionale modello di Solow l'ambiente. Ottengono così un "*Green Solow Model*" (GSM), che teorizza una relazione stretta tra la *Environmental Kuznets Curve* e il modello di crescita di Solow. Apportando modifiche al modello di Solow classico, il progresso tecnologico di abbattimento delle emissioni viene integrato con l'obiettivo di proporre una spiegazione teorica ad alcune questioni irrisolte emerse nelle analisi empiriche legate alla EKC.

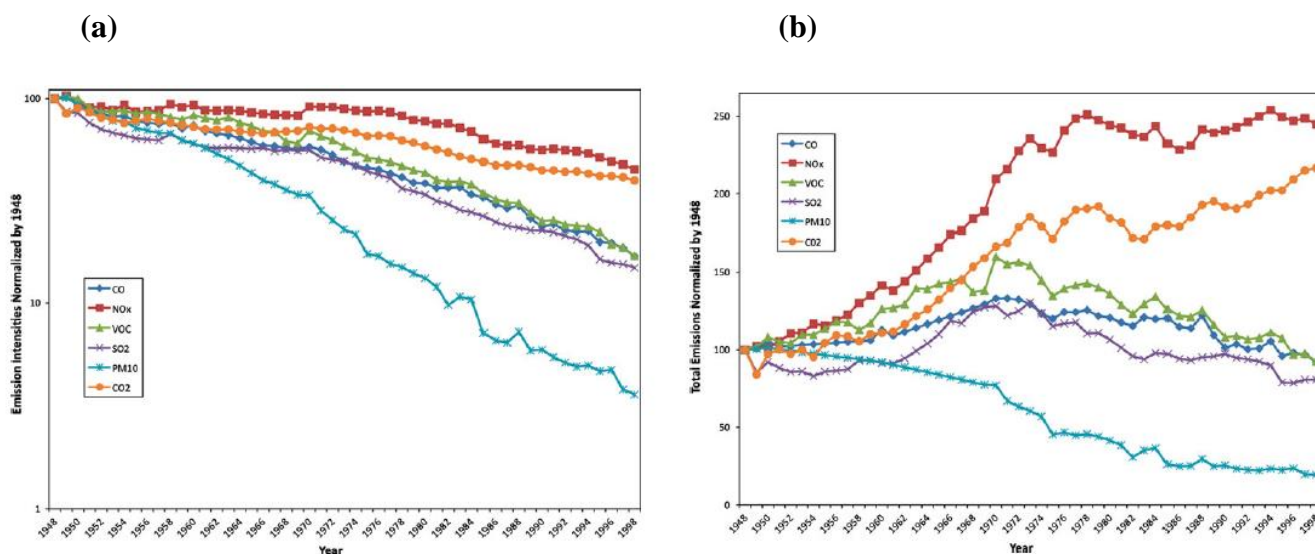
Secondo i due autori, le teorie precedenti, seppur in grado di dare una valida spiegazione teorica al fenomeno descritto dall'ipotesi della EKC, trovano delle difficoltà nel fornire una solida connessione tra le loro previsioni e alcune caratteristiche dei dati empirici.

Una prima questione riguarda il tempo di riduzione del degrado ambientale. Altri modelli⁴ prevedono la totale assenza di Regolamentazione fino ad una determinata soglia di reddito. Secondo tali teorie, l'inquinamento è inizialmente prodotto in proporzione all'*output*: dal momento in cui vengono emanate misure restrittive volte a migliorare la qualità ambientale, si dovrebbe verificare il declino del tasso di emissioni per *output* e l'istantanea decrescita delle emissioni totali. La forte correlazione temporale prevista non trova tuttavia riscontro nei dati empirici (Brock e Taylor, 2010).

A supporto di tale considerazione, gli autori propongono alcuni dati relativi agli Stati Uniti.

⁴ STOKEY, N. L. (1998). Are there limits to growth? *International Economic Review* (Vol. 39).

Figura 3: Intensità delle emissioni per output e emissioni totali per inquinante negli Stati Uniti



Fonte: Brock, W. A., & Taylor, M. S., 2010. The Green Solow model. *Journal of Economic Growth*, 15(2), 127–153. <https://doi.org/10.1007/s10887-010-9051-0>

La Figura 3 (a) mostra le emissioni per dollari di PIL (reale) nel periodo temporale tra 1948 e 1998. Gli agenti inquinanti presi in considerazione sono: CO, NO_x, VOC, SO₂, CO₂ e PM10. La Figura 3 (b), invece, riporta il livello corrispondente di emissioni per gli stessi inquinanti lungo il medesimo periodo.

È possibile osservare che le emissioni per unità di *output* tendono a decrescere già dall'inizio del periodo, con un tasso abbastanza costante nel tempo. D'altra parte, il livello di emissioni sembra seguire, per la maggior parte degli inquinanti, un profilo analogo a quello proposto dalla EKC, anche se in questo caso le emissioni sono messe in relazione al tempo, piuttosto che al reddito. Tuttavia, noto l'incremento sostanziale di reddito *pro capite* lungo tale periodo, è possibile sostituire la scala temporale della Figura 3 (b) con una scala di reddito, confermando quindi l'esistenza della EKC. Gli unici agenti inquinanti che non mostrano l'andamento a U rovesciata sono NO_x, che sembra aver raggiunto il livello di picco proprio negli ultimi anni della serie storica, e il CO₂ che invece continua a crescere per tutto il periodo.

Brock e Taylor (2010) utilizzano i risultati per evidenziare che la riduzione delle emissioni per *output*, riportate nella Fig. 3 (a) precede notevolmente il livello di picco che emerge dalla Fig. 3 (b). In generale, l'inversione di tendenza si verifica in prossimità degli anni '70, periodo ritenuto cruciale per l'attivazione della Regolamentazione sulle emissioni. Secondo le teorie

che enfatizzano il ruolo della Regolamentazione⁵, prima di tale periodo le emissioni sono rappresentate da una linea orizzontale, mentre in seguito decrescono drammaticamente: questo tuttavia non è quello che emerge dai dati.

Una seconda incongruenza tra parte della letteratura teorica e i dati empirici concerne i costi di abbattimento delle emissioni. Considerando l'introduzione di politiche più stringenti come fattore primario per la riduzione delle emissioni, si prevede una crescita continua dei costi di abbattimento, dato che le emissioni per unità di *output* devono decrescere più velocemente dell'*output* totale, per non superare determinati livelli di emissioni. In assenza di progresso tecnologico, infatti, il controllo richiede ingenti investimenti continui (Brock e Taylor, 2010). Contrariamente, i dati empirici ci mostrano che i costi di abbattimento hanno mantenuto un andamento costante rispetto all'*output* totale.

2.2 IL MODELLO

Il modello che viene sviluppato può essere considerato come un'evoluzione del modello di crescita neoclassico di Solow: il progresso tecnologico si riflette sia nella produzione che nell'abbattimento delle emissioni, portando ad una continua crescita, accompagnata da miglioramento ambientale.

Per semplicità vengono fatte due assunzioni: i tassi di risparmio e abbattimento sono variabili costanti ed esogene. Per quanto riguarda l'abbattimento, l'assunzione serve a evidenziare come i redditi decrescenti e il progresso tecnologico siano decisivi per verificare la EKC e inoltre come cambiamenti nell'intensità di abbattimento influenzino il livello di emissioni e il *timing* del loro punto di picco.

Il punto di partenza è il modello di Solow standard (caratterizzato da un solo settore e un solo bene) a cui viene aggiunto il progresso tecnologico alla funzione di produzione, la quale presenta rendimenti di scala costanti ed è strettamente concava:

$$Y = F(K, BL), \dot{K} = sY - \delta K \quad (1)$$

$$\dot{L} = nL, \dot{B} = g_B B \quad (2)$$

⁵ STOKEY, N. L., 1998. Are there limits to growth?. *International Economic Review* (Vol. 39).

Dove K rappresenta il capitale, L il lavoro e B lo stato della tecnologia. Il capitale si accumula attraverso il risparmio (che è costante) s e si deprezza al tasso di deprezzamento δ . Il tasso di crescita della produzione è dato dal tasso di crescita della popolazione n e il tasso di progresso tecnologico g_B , ed è indipendente dal tasso di risparmio.

Per introdurre l'impatto dell'inquinamento i due autori prendono a modello Copeland e Taylor (1994), assumendo che Ω unità vengano generate per ogni unità di attività economica F . Introducendo poi l'abbattimento degli agenti inquinanti la quantità emessa E differisce da quella prodotta, ovvero corrisponde alla differenza tra quest'ultima e la quantità abbattuta. Si assume che l'abbattimento sia un'attività a rendimenti di scala costanti. Il totale dell'inquinamento abbattuto viene rappresentato da una funzione crescente dell'attività produttiva F e dello sforzo impiegato nell'abbattimento F^A . La quantità di emissioni è dunque la seguente:

$$E = \Omega F - \Omega A(F, F^A) \quad (3)$$

Che diventa:

$$E = \Omega F \left[1 - A \left(1, \frac{F^A}{F} \right) \right] \quad (4)$$

$$E = \Omega F a(\theta) \quad (5)$$

$$(6)$$

Dove:

$$a(\theta) = \left[1 - A \left(1, \frac{F^A}{F} \right) \right], \theta = \frac{F^A}{F}$$

Come mostra l'equazione (6), θ rappresenta la frazione di attività economica dedicata all'abbattimento. Si assume che la funzione di abbattimento abbia un impatto marginale positivo ma decrescente ($a'(\theta) < 0$, $a''(\theta) > 0$) e che $a(0) = 1$.

Quindi, aggiungendo l'abbattimento, parte dell'*output* viene dedicata a questo e per il consumo o l'investimento rimane $Y = [1 - \theta]F$. Inoltre, per rimanere in linea con il modello di Solow, il progresso tecnologico esogeno, oltre ad aumentare il lavoro effettivo al tasso g_B , influenza anche l'abbattimento, abbassando Ω ad un tasso $g_A > 0$.

Date queste considerazioni otteniamo:

$$y = f(k)[1 - \theta] \quad (7)$$

$$\dot{k} = sf(k)[1 - \theta] - [\delta + n + g_B]k \quad (8)$$

$$e = f(k)\Omega a(\theta) \quad (9)$$

Dove $k = \frac{K}{BL}$, $y = \frac{Y}{BL}$, $e = \frac{E}{BL}$ e $f(k) = F(k, 1)$.

Nel modello di Solow, la relazione che rappresenta l'investimento per addetto è crescente all'aumentare del capitale per addetto ma a rendimenti decrescenti, mentre il deprezzamento è rappresentato da una linea retta crescente, in proporzione al capitale per addetto, con inclinazione pari al tasso di deprezzamento δ : la variazione di capitale è data dalla differenza tra investimento e deprezzamento ($s - \delta$). Prendendo in considerazione un'economia che presenta un basso livello di capitale per addetto, l'investimento eccede il deprezzamento e quindi il capitale tende a crescere. L'aumento del capitale comporta un aumento del prodotto per addetto, e tale crescita continua finché le due forze, dell'investimento e del deprezzamento, si eguagliano e quindi il risultato nella variazione di capitale per addetto sarà nullo. Tale valore del capitale per addetto rappresenta il punto di equilibrio, ovvero il punto di convergenza dell'economia.

Analogamente, dato un certo θ , partendo da un qualsiasi $k(0) > 0$ l'economia converge verso l'unico capitale per lavoro effettivo k^* , quando il livello di investimento è pari a quello di deprezzamento.

Tuttavia, avendo aggiunto il progresso tecnologico, la crescita dipende dall'avanzamento della tecnologia g_A e dall'incremento della popolazione n . Quando l'economia raggiunge il sentiero di crescita bilanciata, il tasso di crescita dell'output, del consumo e del capitale è pari a quello tecnologico più quello della popolazione ($g_B + n$). Dall'equazione (9) si può ottenere il tasso di crescita delle emissioni g_E , essenziale per derivare il loro andamento nel tempo.

$$g_E = g_B + n - g_A \quad (10)$$

I primi due termini rappresentano l'effetto scala della crescita nelle emissioni, che deriva dalla crescita della produzione, mentre il secondo l'effetto tecnico, che dipende dall'avanzamento nelle tecnologie di abbattimento. Viene definito "sentiero di crescita sostenibile" il sentiero di crescita bilanciata che genera sia un aumento del consumo, sia un miglioramento ambientale. Questo si verifica se c'è il progresso tecnologico, ($g_B > 0$) e quando il progresso nelle tecnologie di abbattimento supera la crescita della produzione, in modo da diminuire il tasso di crescita delle emissioni ($g_A > g_B + n$).

Per semplicità si assume che la funzione $F(K, L)$ sia una Cobb-Douglas con quota costante di capitale α , con $0 < \alpha < 1$, perciò il livello delle emissioni ad ogni tempo t diviene:

$$E = B(0)L(0)\Omega(0)a(\theta)e^{g_E t}k^\alpha \quad (11)$$

Dove $B(0)$, $L(0)$ e $Q(0)$ sono le condizioni iniziali. Differenziando tale equazione possiamo ottenere il tasso di crescita delle emissioni al tempo t :

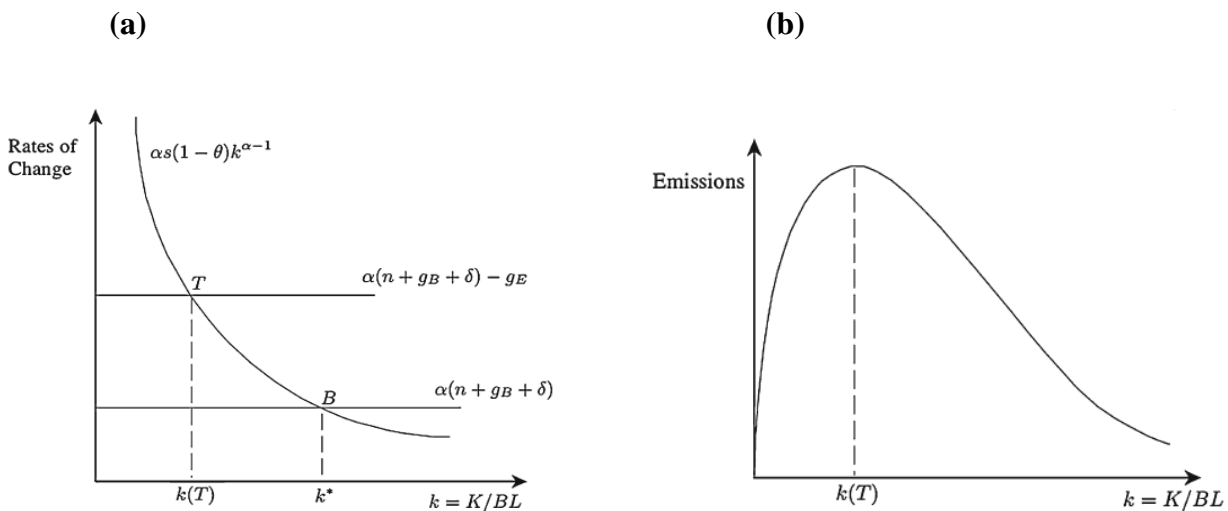
$$\frac{\dot{E}}{E} = g_E + \alpha \frac{\dot{k}}{k} \quad (12)$$

Mentre il tasso di variazione di capitale per lavoro effettivo è:

$$\frac{\dot{k}}{k} = sk^{\alpha-1}(1 - \theta) - (\delta + n + g_B) \quad (13)$$

Da queste due equazioni è possibile analizzare le dinamiche esistenti tra il capitale accumulato e l'andamento del degrado ambientale, rappresentandole graficamente. Assumiamo che l'economia sia sostenibile, perciò il tasso di crescita delle emissioni è considerato negativo, $g_E < 0$.

Figura 4: The Green Solow Model



Brock, W. A. and Taylor, M. S., 2010. The Green Solow model, *Journal of Economic Growth*, 15(2), pp. 127–153. doi: 10.1007/s10887-010-9051-0.

La Figura 4 (a) mostra nell'asse delle ascisse il tasso di variazione delle emissioni e del capitale, mentre su quello delle ordinate il capitale per lavoro effettivo. La curva con inclinazione negativa, rappresenta il capitale derivante da nuovi investimenti e quindi dipendente dal risparmio, $\alpha sk^{\alpha-1}[1 - \theta]$ e parte da più infinito e tende a zero, all'aumentare di k . La curva interseca la retta di deprezzamento nel punto B , che rappresenta il punto di convergenza: a sinistra di B il capitale per lavoro effettivo è crescente, mentre a destra

decescente. Nel sentiero di crescita bilanciata, la variazione di capitale è pari a zero e l'output totale cresce ad un tasso $g_B + n$.

Prendendo in considerazione la seconda retta, dato che g_E è costante, il tasso di crescita delle emissioni totali presenta le stesse proprietà del tasso di crescita del capitale effettivo *pro capite*. Perciò, come si può notare nella Figura 4 (a), nel punto T il tasso di variazione delle emissioni $\frac{\dot{E}}{E}$ è zero, a sinistra di T positivo mentre a destra negativo. T rappresenta il cosiddetto punto di svolta dove si verifica un'inversione nel *trend* delle emissioni. Data l'assunzione di sostenibilità dell'economia, T si trova a sinistra di B , in quanto la retta $\alpha(\delta + n + g_B) - g_E$ si trova sopra la retta $\alpha(\delta + n + g_B)$. Rappresentando quindi le emissioni totali rispetto alla variazione di capitale effettivo, come mostra la Figura 4 (b), si genera una curva analoga all'ipotesi di EKC, ossia a forma di U rovesciata. Nel caso in cui il capitale di partenza fosse maggiore di $k(T)$, allora le emissioni avrebbero un andamento monotono decrescente, poiché l'economia si muoverebbe verso il suo sentiero di crescita sostenibile.

2.3 CONSIDERAZIONI E STATICA COMPARATA

In primo luogo, è importante notare che, nel modello descritto, le emissioni totali possono seguire un andamento parabolico, ma anche solamente crescente o decrescente, dipendentemente dal livello iniziale di k , al contrario il tasso di crescita delle emissioni è sempre monotonamente decrescente rispetto al capitale per lavoro effettivo: il tasso di crescita delle emissioni è, infatti, molto elevato per paesi con livelli di capitale k distanti dal punto di equilibrio B , mentre risulta basso per quelli prossimi al valore di k in tale punto.

Una seconda considerazione riguarda il livello di emissioni e il reddito *pro capite* nel punto di svolta T . Nonostante il capitale per lavoro effettivo sia il medesimo per tutti paesi nel punto di picco delle emissioni, il reddito *pro capite* e il livello delle emissioni variano in dipendenza dalle condizioni iniziali del paese. Per tale ragione le ricerche empiriche sembrano proporre risultati discordanti rispetto al profilo della EKC tra paesi.

È possibile notare, inoltre, che la *Environmental Kuznets Curve* mette in relazione le emissioni con il reddito *pro capite*, e non con il tempo. Viene quindi introdotto il reddito y^C come una funzione del capitale $k(t)$, del tempo t , dell'intensità di abbattimento θ e delle condizioni iniziali $B(0)$. Viene poi sviluppata una relazione parametrica tra le emissioni E e il reddito y^C che spiegano la EKC.

In generale quando $k^* > k(T) > k(0)$, le emissioni prima crescono poi decrescono in relazione al reddito *pro capite*, mentre quando $k^* > k(0) > k(T)$, le emissioni decrescono all'aumentare del reddito *pro capite*.

Attraverso un'analisi di statica comparata, gli autori, espongono l'influenza che tre tipologie di determinanti hanno sui risultati:

- (i) le condizioni iniziali $B(0)$ e $\Omega(0)$ impattano sul percorso di transizione delle emissioni e sul reddito nel punto di picco, ma non su T né sui tassi di crescita di lungo periodo delle emissioni o degli *output*.
- (j) s e θ condizionano non solo il percorso, ma anche i valori del punto di equilibrio. Infatti, un incremento dei risparmi s sposta la curva $\alpha s k^{\alpha-1} [1 - \theta]$ (Figura 4 (a)) verso destra e aumenta il valore del capitale per lavoro effettivo sia in B che in T . Perciò maggiori tassi di risparmio implicano un maggior livello di reddito. L'aumento del tasso di abbattimento delle emissioni, invece, sposta la curva $\alpha s k^{\alpha-1} [1 - \theta]$ (Figura 4 (a)) verso sinistra e quindi provoca l'abbassamento di B e T . Conseguenza un minor valore del reddito in entrambi i punti.
- (k) Infine, le variazioni di g_A, g_B e n , provocano uno spostamento verticale delle rette $\alpha(\delta + n + g_B)$ e $\alpha(\delta + n + g_B) - g_E$, mostrate nella Figura 4 (a), influenzando il valore del capitale k nel punto T e nel punto B . La variazione del loro valore implica un mutamento del percorso di transizione delle emissioni e del reddito, influenza il loro valore nel punto di picco e il tasso di crescita delle emissioni e dell'*output* nel lungo periodo.

Brock e Taylor (2010) cercano di superare la letteratura esistente sulla EKC, anche utilizzando una metodologia empirica alternativa a quelle precedenti, dando prova che il loro modello non solo presenta delle evidenze teoriche per l'ipotesi EKC, ma riesce a darne una previsione attraverso dati empirici.

Vengono proposte due tipologie di previsione di convergenza delle emissioni: secondo la prima ipotesi, i paesi con gli stessi parametri (come i tassi di risparmio, intensità di abbattimento delle emissioni, ecc) pur presentando condizioni iniziali differenti, mostrano una convergenza assoluta nelle emissioni *pro capite*, definita 'Absolute Convergence in Emissions per capita' (ACE). Nel secondo caso, considerando l'eterogeneità dei paesi, vengono esplicitate alcune variabili in modo introdurre nel modello le diverse caratteristiche: si arriva a una convergenza di tipo Condizionale, ovvero 'Conditional Convergence in Emissions per capita' (CCE).

Viene analizzato il livello di emissioni di CO₂ su un campione di 173 paesi nel periodo che va dal 1960 al 1998.

I risultati mostrano chiaramente che le variabili considerate nel *Green Solow Model* hanno un impatto significativo nel determinare l'andamento delle emissioni: in particolare i risparmi incidono in maniera positiva sulle emissioni, mentre le emissioni iniziali, mostrano un coefficiente negativo. Inoltre, il tasso di crescita della popolazione ha un impatto notevole, soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

L'obiettivo della loro analisi empirica, è la dimostrazione che le forze alla base della convergenza del modello di Solow hanno un ruolo centrale anche nella convergenza della crescita o del livello delle emissioni tra paesi.

3. LIMITI DEL GREEN SOLOW MODEL

Nonostante il notevole contributo alla letteratura inerente alle EKC, Brock e Taylor (2010), al fine di dimostrare il ruolo centrale dei rendimenti decrescenti e del progresso tecnologico, hanno apportato alcune semplificazioni che possono rappresentare dei limiti all'efficacia del modello. È noto, infatti, che da un punto di vista teorico, il modello si basa su forti assunzioni, come l'esogeneità delle tecnologie o l'indipendenza spaziale delle emissioni, mentre dal punto di vista empirico l'analisi viene svolta per un campione limitato e per un solo indicatore d'impatto ambientale.

Di seguito verranno esposti due studi empirici che, focalizzandosi su aspetti scarsamente esaminati precedentemente, propongono delle alternative alle analisi tradizionali.

3.1 LA CONVERGENZA

Il diossido di carbonio viene considerato uno dei principali responsabili, tra i dei gas serra, dei cambiamenti climatici. Le analisi per stimare e capire le dinamiche delle emissioni di CO₂ sono di fondamentale importanza per i decisori politici, per valutare l'impatto che tale inquinante ha nell'ambiente e quindi proporre politiche correttive. A partire dagli anni '90, è stata posta grande attenzione nell'esaminare l'ipotesi di convergenza di CO₂ tra paesi, che ha portato all'implementazione di una grande varietà di metodologie per studiare tale fenomeno (Panopoulou e Pantelidis, 2009).

Brock e Taylor (2010) hanno proposto uno studio che prende a campione 173 paesi, fornendo una dimostrazione empirica di convergenza delle emissioni, elemento alla base del modello esposto. Tale fenomeno, infatti, risulta necessario per spiegare l'ipotesi della *Environmental Kuznets Curve*. Tuttavia, nella letteratura, sia precedente che successiva al *Green Solow Model*, sono stati riportati esiti differenti e risulta difficile trovare un accordo tra gli autori⁶.

Se si considera l'insieme generale dei risultati, è possibile notare che i paesi prossimi per caratteristiche o a livello geografico, come quelli Europei, mostrano più facilmente la convergenza nelle emissioni, mentre a livello globale questa risulta più rara e difficilmente viene rilevata (Pettersson et al., 2014).

⁶ Esempi che supportano l'ipotesi di convergenza delle emissioni tra paesi sono le analisi di Strazicich & List (2003) e T. Jobert et al. (2010), mentre studi come quello di Joseph Aldy (2006) e Barassi et al. (2008) riportano esiti contrari. (Pettersson et al., 2014)

Le notevoli differenze nei risultati empirici si devono in gran parte ai metodi applicati e ai campioni di dati utilizzati; ciononostante le diverse variabili in grado di influenzare il livello di emissioni di un paese, che vengono prese in considerazione nei modelli, possiedono un ruolo fondamentale nelle previsioni di convergenza.

Per tale ragione viene proposto di seguito lo studio di Rios e Gianmoena (2018), presentato nel paper “*Convergence in CO₂ emissions: A spatial economic analysis with cross-country interactions*”, che considera di primaria importanza non solo la correlazione temporale delle emissioni, ma anche quella spaziale.

3.1.1 THE SPATIAL GREEN SOLOW MODEL

Da un punto di vista teorico l’influenza spaziale delle emissioni tra i paesi può essere considerata la conseguenza dell’interdipendenza delle tecnologie utilizzate ed è stata recentemente enfatizzata da alcune ricerche di economia spaziale.⁷ Questa correlazione si riflette nel degrado ambientale, dal momento che l’inquinamento è il prodotto collaterale della produzione, e il trasferimento di tecnologie potrebbe avere conseguenze sia nella capacità produttiva sia nelle tecniche di abbattimento delle emissioni. (Rios e Gianmoena, 2018) Un ulteriore argomento a sostegno dell’interdipendenza spaziale è l’influenza strategica tra paesi confinanti nella Regolamentazione del fenomeno ambientale: un’ampia raccolta di letteratura afferma che i governi possono manipolare gli standard ambientali in modo da attirare capitali o per motivi commerciali. In aggiunta si tende spesso a proporre misure analoghe a quelle dei paesi limitrofi per evitare costi di *decision-making* o per la legittimazione delle proprie azioni (Maddison, 2006). Per tali ragioni è irrealistico pensare che non ci sia un condizionamento nell’inquinamento dei paesi confinanti.

Ciò nonostante, gran parte dell’antecedente letteratura ha trascurato tale fenomeno. Dal punto di vista metodologico, tipicamente, i modelli di regressione assumono che le osservazioni siano indipendenti tra loro.

Rios e Gianmoena (2018) si propongono di sviluppare un modello in grado di supplire alla mancanza di una misura d’interdipendenza, al fine di indagare empiricamente l’effetto di tale fenomeno. L’importanza della loro analisi empirica si deve inoltre all’integrazione nel modello

⁷ Un esempio è FISCHER, M. M. , 2011. A spatial Mankiw-Romer-Weil model: Theory and evidence, *Annals of Regional Science*, 47(2), pp. 419–436. doi: 10.1007/s00168-010-0384-6..

delle caratteristiche individuali dei paesi considerati, ulteriore elemento trascurato in precedenza.

3.1.2 LA STRUTTURA

Viene proposta un'integrazione al *Green Solow Model*, introducendo le esternalità nella produzione dei beni.

I paesi i , pur avendo le stesse possibilità produttive, presentano delle differenze rilevanti nei tassi di risparmio s , nei tassi di crescita della popolazione n , tassi di deprezzamento δ e altre caratteristiche che dipendono dalla posizione geografica.

Consideriamo la funzione di produzione una *Cobb-Douglas*:

$$Y_{it} = K_{it}^{\alpha} (B_{it} L_{it})^{1-\alpha}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (1)$$

Dove F è il livello di output, k il capitale, L il lavoro, B lo stato della tecnologia, α rappresenta l'elasticità dell'output a variazioni di capitale, infine i e t si riferiscono rispettivamente al paese e al tempo. La tasso crescita della popolazione rimane una variabile esogena n_{it} .

La correlazione spaziale viene introdotta attraverso gli interscambi di tecnologie tra paesi. Il livello di tecnologia della produzione viene quindi specificato come:

$$B_{it} = B_0 e^{g_B t} \prod_{j \neq i}^N B_{jt}^{\psi w_{ij}}, \quad 0 \leq w_{ij} \leq 1 \quad e \quad 0 \leq \psi < 1 \quad (2)$$

Il livello di tecnologia B_{it} del paese i al tempo t è determinato dal suo livello iniziale B_{i0} , il tasso di crescita g_B . In aggiunta, viene inserita la media geometrica ponderata del livello di della tecnologia dei paesi confinanti B_{ij} . Considerando che, l'influenza data dal progresso tecnologico diminuisce all'aumentare della distanza tra paesi, viene introdotto il cosiddetto termine di peso spaziale w_{it} che rappresenta l'interdipendenza spaziale tra le economie i e j . Si assume che tale termine sia non-negativo e finito, e per escludere l'influenza del paese stesso, se $i = j$ allora $w_{ij} = 0$. Inoltre, si assume che la somma di tutti i pesi sia 1, $\sum_{j \neq i}^N w_{ij} = 1$ per evitare una crescita esplosiva. Il parametro ψ misura la rilevanza che hanno le esternalità spaziali.

Dall'espressione precedente viene dimostrato che il tasso di crescita della tecnologia è dato da:

$$\left(\frac{\dot{B}}{B}\right)_{it} = \frac{g_B}{1 - \psi} \quad (3)$$

È possibile notare che il tasso di crescita della tecnologia dato dalla (3) è maggiore del tasso di crescita della tecnologia utilizzato nel *Green Solow Model*, per la presenza degli effetti dell'interdipendenza tecnologica. Infatti, se $0 \leq \psi < 1$, il denominatore della (3) è minore o uguale a 1, perciò $\frac{\dot{B}}{B} \geq g_B$.

Le caratteristiche del modello sono le stesse del *Green Solow Model*: Si assume che il capitale K si accumuli grazie agli investimenti e si deprezzi al tasso δ , quindi:

$$\dot{K}_{it} = s_i(1 - \theta)Y_{it} - \delta_i K_{it} \quad (4)$$

Dove s rappresenta il tasso di risparmio, θ è una variabile costante ed esogena e rappresenta la frazione di output destinata all'abbattimento dell'inquinamento ($\theta = \frac{F^A}{F}$, $0 \leq \theta \leq 1$). Inoltre, per considerare l'effetto dell'attività economica nell'evoluzione del degrado ambientale, si assume che ogni unità di output generi Ω unità di agenti inquinanti. La funzione di abbattimento è data dalla forma specifica $a(\theta) = (1 - \theta)^\epsilon$ con $\epsilon > 1$, che soddisfa le seguenti proprietà: $a(0) = 1$, $a'(\theta) < 0$, $a''(\theta) > 0$.⁸

Le emissioni sono date da $E = \Omega F a(\theta)$, il tasso di crescita dell'abbattimento è $g_A > 0$.

Tuttavia, considerando il progresso tecnologico come $\frac{g_B}{1-\psi}$, si avrà che:

$$\dot{k}_i = s_i(1 - \theta)f(k_{it}) - \left(\delta_i + n_i + \frac{g_B}{1 - \psi} \right) \quad (5)$$

$$g_{E,i} = \frac{g_B}{1 - \psi} + n_i - g_A \quad (6)$$

Dalla (6) è possibile dedurre che se $g_B > 0$ e $g_A > \frac{g_B}{1-\psi} + n_i$ allora l'economia raggiungerà il percorso di crescita sostenibile.

Quindi se l'economia è sostenibile, ovvero che $g_E < 0$ allora, partendo da un livello di capitale k minore rispetto al capitale nel punto di equilibrio k^* , esiste un tempo t^* tale per cui $t < t^*$, $g_E > 0$, per $t = t^*$, $g_E = 0$ e per $t > t^*$, $g_E < 0$. In tale situazione si verifica l'ipotesi della EKC, con il punto di picco al tempo t^* .

La velocità di convergenza delle emissioni è maggiore di quella prevista dal *Green Solow Model* se l'interdipendenza tecnologica tra paesi ha un peso maggiore di zero, $\psi > 0$.

⁸ BROCK, W. A. e TAYLOR, M. S., 2010. The Green Solow model, *Journal of Economic Growth*, 15(2), pp. 127–153. doi: 10.1007/s10887-010-9051-0.

3.2.3 METODOLOGIA E DATI

Per svolgere l'analisi empirica Rios e Gianmoena (2018) derivano un'equazione di stima del tasso di crescita delle emissioni *pro capite*.⁹ Utilizzando tale equazione, il loro obiettivo è quello di verificare tre tipologie di ipotesi di convergenza delle emissioni che sono state sviluppate dalla letteratura: l'ipotesi di convergenza assoluta, l'ipotesi convergenza condizionale e l'ipotesi di convergenza in *club*, la quale prevede che le emissioni *pro capite* convergano nel lungo periodo se le condizioni iniziali sono simili, permettendo perciò l'esistenza di diversi *club* di convergenza.

Per l'analisi empirica delle ipotesi, vengono applicate tre regressioni differenti come riporta la tabella 1:

- (i) Per l'ipotesi di Convergenza Assoluta vengono utilizzati due modelli A e B: il primo comprende come variabili esplicative solamente la costante e il logaritmo delle emissioni *pro capite* nel periodo $t-1$. Il secondo, include anche le emissioni al tempo $t-1$ dei paesi confinanti e le emissioni dei paesi confinanti nel periodo t .
- (ii) Per l'ipotesi di Convergenza Condizionale vengono riportati altri due modelli C e D che includono anche le variabili esplicative presenti nel *Green Solow Model*: livello d'investimento e il tasso di crescita della popolazione. Anche in questo caso solo il secondo modello comprende la componente spaziale, ovvero le emissioni dei paesi confinanti al tempo t e al tempo $t-1$.
- (iii) Per l'ipotesi di Convergenza in *Club*, vengono utilizzati tre ulteriori modelli E, F e G, identici a quelli dell'ipotesi di Convergenza Condizionale, con l'aggiunta degli effetti fissi, che consentono l'eterogeneità dell'intercetta.

Analogamente al *Green Solow Model*, vengono esaminate le emissioni di CO₂. Il campione studiato è rappresentato 141 paesi in un periodo compreso tra il 1970 e il 2014. I dati provengono dai dataset della *World Bank*, *Penn World Table*, *United Nations* e *Polity*. Oltre alle variabili presenti nel *Green Solow Model*, vengono aggiunte altre variabili di controllo che incorporano le caratteristiche dei paesi analizzati, che possono influire sul livello di emissioni: il livello di democrazia, il livello di capitale umano, il grado di apertura commerciale,

⁹ Per approfondire il metodo di derivazione dell'equazione si veda: RIOS, V. e GIANMOENA, L., 2018. Convergence in CO₂ emissions: A spatial economic analysis with cross-country interactions, *Energy Economics*. Elsevier B.V., 75, pp. 222–238. doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.009.

l'impatto dell'attività industriale sul PIL e una *dummy* che ha valore 1 se il paese in esame ha firmato il *Kyoto Protocol* e 0 altrimenti.

3.2.4 RISULTATI

Dai risultati, riportati nella tabella 1, emerge chiaramente che oltre alla rilevanza delle emissioni al tempo $t-1$ e degli investimenti (i coefficienti di tali variabili risultano in tutte le stime significativi), la posizione geografica incide in maniera non trascurabile nelle previsioni delle emissioni di CO₂ dei paesi: tale fenomeno si riflette nel fatto che i coefficienti delle emissioni dei paesi confinanti, sia al tempo t che al tempo $t-1$, risultano significativi al 99%.

È possibile inoltre affermare che le condizioni iniziali dei paesi influenzano la variazione delle emissioni: tutte le variabili relative alle caratteristiche dei paesi presentano coefficienti significativi, ad eccezione della variabile *Kyoto Protocol*.

Attraverso il *Likelihoodratio test* (LR) viene testata la significatività statistica degli effetti fissi nel modello E, rispetto al modello D, che considera l'intercetta omogenea per tutti i paesi: risulta la necessità di includere l'eterogeneità spaziale.

Interessante, è anche che la velocità di convergenza trovata, considerando gli effetti fissi e le dinamiche spaziali, è di 8,12% come riporta l'ultima colonna della tabella 1, notevolmente maggiore rispetto di quella del *Green Solow Model* di 1,6%. Tale fenomeno è in parte dovuto al ruolo degli *spillover* spaziali indotti dalle economie confinanti.

Al fine di esaminare accuratamente i dati, risulta quindi necessario inserire gli effetti fissi derivanti dalle caratteristiche iniziali dei paesi. La convergenza in *Club* implica la presenza di differenti punti di equilibrio delle emissioni *pro capite* di CO₂ e che i parametri del modello di regressione possono differire tra i paesi.

Tabella 1: Risultati dei modelli di stima della convergenza di CO₂

Models	Absolute convergence		Conditional convergence		Club convergence		
	Model (A) No Spatial	Model (B) Spatial [DSLM]	Model (C) No Spatial	Model (D) Spatial [DSDM]	Model (E) Spatial [DSDM]	Model (F) No Spatial	Model (G) Spatial [DSDM]
Constant	0.292*** (9.39)	0.118** (2.57)	0.243*** (6.66)	-0.013 (0.16)			
<i>Convergence variables</i>							
Ln Emissions pc (t - 1) (γ)	0.970*** (236.11)	0.965*** (176.32)	0.95*** (202.13)	0.945*** (167.20)	0.862*** (43.44)	0.724*** (44.71)	0.821*** (40.77)
Investment (t)			0.009*** (10.76)	0.008*** (9.64)	0.007*** (7.45)	0.010*** (9.58)	0.007*** (7.14)
Population Growth (t)			0.005 (0.89)	0.002 (0.33)	0.006 (0.96)	0.004 (0.50)	0.003 (0.71)
<i>Other variables</i>							
Democracy (t)						-0.002*** (-1.35)	-0.134*** (2.58)
Human Capital (t)						0.031 (1.04)	0.000 (0.95)
Trade Openness (t)						0.000 (-0.24)	0.000 (1.09)
Industry Share (t)						0.007*** (5.85)	0.006*** (6.72)
Kyoto Protocol (t)						0.014 (0.81)	0.008 (0.72)
<i>Spatial interaction variables</i>							
Neighbor's Ln Emissions pc (t) (ρ)		0.518*** (10.60)		0.468*** (8.99)	0.348*** (5.73)		0.311*** (5.02)
Neighbor's Ln Emissions pc (t-1) (η)		-0.495*** (10.23)		-0.438*** (8.63)	-0.378*** (4.74)		-0.360*** (4.34)
Neighbor's Investment (t)				0.002 (0.93)	0.010*** (4.10)		0.014*** (5.14)
Neighbor's Population Growth (t)				0.015 (1.14)	-0.014* (1.50)		-0.043** (2.42)
Neighbor's Democracy (t)							0.269*** (3.63)
Neighbor's Human Capital (t)							-0.013*** (2.87)
Neighbor's Trade Openness (t)							-0.001 (1.06)
Neighbor's Industry Share (t)							-0.011*** (3.24)
Neighbor's Kyoto Protocol (t)							-0.031 (0.73)
<i>Implied convergence speed φ</i>	0.0062	0.0048	0.0102	0.0096	0.0599	0.0647	0.0812
Fixed effects	No	No	No	No	Yes	Yes	Yes
R-squared	0.978	0.980	0.980	0.982	0.986	0.985	0.986
Sige	0.067	0.060	0.061	0.056	0.047	0.0440	0.044
Log-likelihood	-84.340	-28.080	-27.840	21.620	205.530	181.06	245.200

Note: la variabile dipendente è in tutti i casi il logaritmo del livello delle emissioni pro capite per i vari paesi. DSDM, Dynamic Spatial Durbin Model e DSLM, Dynamic Spatial Lag Model, rappresentano modelli di analisi spaziale. * livello di significatività al 10%, **livello di significatività al 5%,***livello di significatività al 1%

Fonte: RIOS, V. e GIANMOENA, L., 2018. Convergence in CO₂ emissions: A spatial economic analysis with cross-country interactions, *Energy Economics*. Elsevier B.V., 75, pp. 222–238. doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.009.

Vengono individuati tre *club*, in quanto risulta essere la divisione più adatta per descrivere i dati: il primo club (C1) comprende i paesi che presentano un livello di emissioni relativamente basso, il secondo (C2) un livello medio, infine il terzo (C3) è caratterizzato dal maggior livello di emissioni. Vengono osservate le dinamiche di convergenza interne dei *club* verso il loro punto di equilibrio e successivamente la convergenza tra i tre *club*.

Rispettivamente ai singoli *club*, dall'analisi emerge che in C1 e C3 i paesi presentano una velocità di convergenza notevole e significativa mentre in C2 la velocità di convergenza è inferiore e l'effetto della convergenza non è sufficientemente significativo: una possibile interpretazione è che nel primo e secondo club le emissioni tendono a convergere verso il punto di equilibrio, mentre ciò non accade nel secondo *club*.

Studiando invece le dinamiche storiche di convergenza tra i tre *club*, si evince che, mentre il punto di equilibrio del secondo e terzo *club* tende a convergere, C1 rimane abbastanza stabile nel tempo. Questo implica che il *gap* tra le emissioni di CO₂ in C2 e C3 si sta riducendo nel tempo.

Questi ultimi esiti, la debole significatività della velocità di convergenza in C2 e l'avvicinamento del valore delle emissioni di C2 e C3, implicano la possibile instabilità del punto di equilibrio del *club* 2. Da tale indagine possiamo quindi prevedere che, se non venisse applicata nessuna restrizione delle emissioni nel *club* 2, gli effetti negativi del CO₂ non diminuiranno, ma al contrario le emissioni potrebbero aumentare nel tempo e raggiungere i livelli di C3 (Rios e Gianmoena, 2018).

Lo studio presentato vuole dimostrare la rilevanza della posizione geografica dei paesi nella previsione delle emissioni di CO₂ e che l'omissione di un termine d'interazione spaziale nelle analisi econometriche potrebbe portare a stime inconsistenti e inefficienti. Come indicato precedentemente, l'ipotesi di convergenza è supportata solamente in parte e i risultati sembrano dipendere dall'approccio adottato e dai campioni. Nonostante i risultati siano disomogenei, in generale è condivisa l'idea di una possibile convergenza tra gruppi di paesi che presentano caratteristiche analoghe ma non a livello globale.

3.2 INDICATORI DI IMPATTO AMBIENTALE

Come visto, una delle critiche ampiamente condivise a cui l'analisi empirica dell'ipotesi EKC è stata sottoposta, concerne la variabile dipendente utilizzata per il rilevamento del degrado ambientale. Data la rilevanza degli studi sulle conseguenze dell'economia e dell'attività produttiva sull'ambiente e sulla vita dei cittadini, si è generato un grande dibattito sulla necessità di introdurre misure d'inquinamento più complesse e in grado di catturare più idoneamente gli effettivi mutamenti dell'ecosistema. Gli indicatori ecologici divengono rilevanti dal momento in cui riescono a spiegare l'evoluzione del sistema ambientale, risulta

perciò necessario implementare la conoscenza dei reali impatti che ha il progresso economico sull'ambiente e sulla salute umana, per un supporto sia a livello locale che globale ai processi decisionali (García-Sánchez et al., 2015).

Il metodo tradizionale d'indagine empirica dell'esistenza della EKC prevede l'utilizzo di modelli econometrici basati su un indice singolo. Nonostante l'analisi risulti più semplice, viene esaminato solamente uno dei tanti aspetti della realtà ambientale.

Come riportato in precedenza, Brock e Taylor (2010), per validare il loro modello teorico, svolgono un'analisi di convergenza sulle emissioni di CO₂. Nonostante i risultati siano coerenti con le loro previsioni, aver preso in considerazione solamente le emissioni di inquinanti d'aria, rappresenta un limite nella descrizione della relazione tra ambiente e crescita economica.

È noto che una sola variabile non può essere in grado di catturare tutti gli effetti delle molteplici dimensioni ambientali (Almeida et al., 2017), perciò sono stati introdotti degli indicatori compositi che fanno riferimento a plurime caratteristiche.

3.2.1 IL MODELLO CIEP

Visti i suddetti limiti nell'utilizzo di una singola variabile d'impatto ambientale, Almeida et al. (2017) propongono un indice composito avente il potenziale di considerare un ampio spettro di dimensioni dell'ambiente. Tale indice, chiamato *Composite Index of Environmental Performance* (CIEP), è stato sviluppato attraverso l'approccio del *driving force-pressure-state-exposure-effect-action* (DPSEEA), ovvero una metodologia proposta dal *World Health Organization* (WHO) che unisce le sfere della salute, dell'ambiente e dello sviluppo economico.¹⁰

Il CIEP è costruito utilizzando 19 indicatori, raggruppati nelle 5 delle dimensioni del DPSEEA¹¹, riportati nella tabella 2:

¹⁰ Per approfondire la metodologia utilizzata per la creazione dell'indice si veda: GARCÍA-SÁNCHEZ, I. M., et al., 2015, A proposal for a Composite Index of Environmental Performance (CIEP) for countries, *Ecological Indicators*. Elsevier, 48, pp. 171–188. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.004.

¹¹ L'indicatore del fenomeno dell'*exposure* non viene considerato tra le variabili per mancanza di dati sufficienti.

Tabella 2: Le variabili del CIEP

N	Abbrev.	Variables	DPSEEA
1	AW	Access to drinking water	A
2	AS	Access to sanitation	A
3	EPfRS	Renewable electricity	A
4	WaTMProt	Territorial marine area waters protected	A
5	PopDen	Population density	DF
6	GDP	Per capita income	DF
7	UrPopGr	Urban population growth	DF
8	ChMor	Child mortality	Ef
9	DeaR	General mortality	Ef
10	LiEB	Life expectancy at birth	Ef
11	AP	Agricultural production	P
12	CerPd	Cereal production	P
13	EmCO2	CO ₂ emissions	P
14	EnUse	Energy intensity (energy use)	P
15	EnProd	Energy production	P
16	MCAP	Marine capture and aquaculture production	P
17	FertUse	Use of fertilizers per unit of agricultural land area	P
18	AL	Agricultural land	S
19	HydDis	Hydrological disasters	S

Fonte: GARCÍA-SÁNCHEZ, I. M. et al. ,2015. A proposal for a Composite Index of Environmental Performance (CIEP) for countries, *Ecological Indicators*. Elsevier, 48, pp. 171–188. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.004.

- (i) *DF-Driving forces*: rappresentano i fattori che intensificano l'attività umana e l'utilizzo delle risorse naturali.
- (ii) *P-Pressure*: sono *driving forces* che causano pressioni nell'ambiente come attività a grande consumo di energia.
- (iii) *S-Status*: riportano i cambiamenti derivanti dai *pressures*.
- (iv) *Ef-Effects*: sono le conseguenze sulla salute umana causate da problemi ambientali.
- (v) *A-Action*: le misure volte a mitigare il problema ambientale.

L'utilizzo di tale modello consente di condurre un'analisi causale (causa-effetto) tra la salute umana e l'ecosistema e le altre variabili utilizzate, e di prendere in esame dimensioni ambientali differenti, quali acqua, aria, terreno, flora e fauna. Inoltre, è possibile fare un confronto tra periodi temporali e paesi.

3.2.2 METODOLOGIA E DATI

I dati utilizzati, presi dal dataset della *World Bank* (WB), si riferiscono a 152 paesi in un periodo di 6 anni. Per testare l'ipotesi dell'EKC vengono riportate due modifiche al modello: la prima

è la rimozione del PIL dal CIEP originale, per evitare problemi di collinearità, mentre la seconda è la normalizzazione dell'indice, cambiando cioè i valori in modo che quelli elevati si riferiscano a un elevato livello di degrado ambientale. L'indice modificato viene quindi denominato *mCIEP*.

Per testare l'ipotesi della EKC viene utilizzata la seguente specificazione:

$$mCIEP_{it} = \alpha + \beta_1(PIL_{it}) + \beta_2(PIL_{it})^2 + \beta_3(PIL_{it})^3 + \varphi_i + \varphi_t + \varepsilon_{it}$$

Dove *i* si riferisce al paese, *t* al tempo e α è la costante, ϕ_i e ϕ_t sono due dummy utilizzate per misurare gli effetti individuali e di tempo, ε_{it} rappresenta il termine di errore. Inizialmente il modello viene stimato per l'intero campione di paesi, in secondo luogo invece vengono separati i paesi sviluppati (46 paesi), in via di sviluppo (45 paesi) e sottosviluppati (61 paesi). Infine, le dimensioni del CIEP vengono decomposte e analizzate individualmente.

3.2.3 RISULTATI

La Tabella 3 mostra la regressione stimata con il metodo dei minimi quadrati generalizzati (*Generalized-Least Square*, GLS), considerato il più adatto, vista la possibile autocorrelazione dei residui e la varianza dell'errore, che risulta differente tra i paesi.

Tabella 3: Risultati della regressione del modello con lo stimatore GSL

Variable	gls
gdp	-0.41589519*
gdp2	0.33444079
gdp3	-0.11206986
dt1	0.01318817***
dt2	0.01523149***
dt3	0.00998601***
dt4	0.01013752***
dt5	0.00819414***
dt6	(omitted)
_cons	0.54374853***
N	906
r2	
r2_a	
EKC Hypothesis	↘

Note: *p<0.05 ; **p<0.01; ***p<0.001 ; gdp- Prodotto Interno Lordo (PIL); dt- dummy relative al tempo t

Fonte: ALMEIDA, T. A. DAS N. *et al.* 2017. Economic growth and environmental impacts: An analysis based on a composite index of environmental damage, *Ecological Indicators*. Elsevier B.V., 76, pp. 119–130. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.028.

Dalla Tabella 3 possiamo osservare che il coefficiente del PIL è negativo e significativo al 95%, quindi il degrado ambientale (*mCIEP*) diminuisce nelle prime fasi di crescita economica, mentre le altre due variabili del PIL non presentano valori significativi. Questa prima analisi non conferma l'ipotesi della EKC.

Successivamente vengono suddivisi i paesi in tre categorie rispetto al livello di sviluppo, in base a una classificazione fatta dalla *World Bank*. È possibile notare dalla Tabella 4 che il progresso economico risulta avere una notevole influenza sul danno ecologico, dato che le costanti sono significative al 99%. L'esito della regressione mostra che il coefficiente del PIL risulta significativo al 95% solamente nel gruppo dei paesi sottosviluppati (*und_gls*), quando è elevato al cubo (β_3): questo suggerisce che il livello di degrado ambientale tende a ridursi nelle fasi finali della crescita economica in tali paesi. Tuttavia, considerando che anche in questo caso i coefficienti delle altre variabili PIL non sono significativi, non possiamo concludere l'evidenza empirica della EKC nemmeno dividendo i paesi per livello di sviluppo.

Tabella 4: Risultati della regressione del modello con lo stimatore GSL

Variable	dev_gls	din_gls	und_gls
gdp	-0.22113415	-1.2197163	-5.1693472
gdp2	-0.19873845	2.2366716	329.17258
gdp3	0.21751	-1.2522125	-5381.0933*
dt1	0.01853169***	0.00795307*	0.00870397**
dt2	0.02679096***	0.00297975	0.00697985*
dt3	0.01673598***	-0.00063787	0.00724364**
dt4	0.01987363***	0.0064356*	0.002999
dt5	0.01332677***	0.00440857	0.00621096*
dt6	(omitted)	(omitted)	(omitted)
_cons	0.43724888***	0.63995907***	0.55969362***
Statistics			
N	276	270	360
r2			
r2_a			
_cons			
EKC Hypothesis	0	0	↘

Legenda: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; gdp- Prodotto Interno Lordo (PIL); dt- dummy relative al tempo t

Fonte: ALMEIDA, T. A. DAS N. *et al.* 2017. Economic growth and environmental impacts: An analysis based on a composite index of environmental damage, *Ecological Indicators*. Elsevier B.V., 76, pp. 119–130. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.028.

Il modello CIEP, come precedentemente spiegato, è composto da variabili che, descrivendo diversi aspetti che influiscono sull'ambiente, presentano vettori aventi direzioni differenti. È importante notare che una parte di essi contribuisce al miglioramento qualità ambientale: un esempio è rappresentato dalle *actions*, ovvero le azioni governative finalizzate proprio alla mitigazione dell'inquinamento. Perciò, per dare una rappresentazione più corretta della relazione tra crescita economica e degrado dell'ecosistema, è giusto escludere le variabili che incidono in maniera positiva sull'ambiente e considerare solamente quelle ad impatto negativo. Vengono quindi presi in esame *driving-forces (DF)*, *pressures (P)* e *effects (Ef)*, poiché correlati positivamente con il *mCIEP* e quindi responsabili del deterioramento ambientale. Una prima analisi viene svolta sulle singole variabili, mentre, secondariamente, vengono aggregati in due fattori: il fattore 1 (*f1*) costruito dal contrasto tra *P* e *Ef*, mentre il fattore 2 (*f2*) comprende in maniera preponderante la variabile *driving-force*. Nella tabella 4, sono riportate le stime di ogni singola variabile e dei due fattori *f1* e *f2*:

Tabella 5: Risultati della regressione di *driving-forces*, *pressures*, *effects*, fattore 1 e fattore 2, con lo stimatore GSL

Variable	gls.mdf	gls.mp	gls.mef	gls.f1	gls.f2
gdp	-0.20531419*	-0.44493392***	.69103811***	5.9825739***	-0.09107531
gdp2	0.34754004	0.44687701	-1.231369***	-9.352259***	-0.16597976
gdp3	-0.09645445	-0.19644274	0.6805624***	5.0266098***	1.104665
dt1	-0.00829147***	0.00183985*	0.03370217***	0.13461609***	-0.07731068***
dt2	-0.00709922***	0.00099002	0.02665847***	0.11072112***	-0.06672043***
dt3	-0.00272399***	0.00108944	0.0195824***	0.07418961***	-0.03589041***
dt4	-0.00147751**	0.00190331*	0.0128035***	0.04734447***	-0.02554456***
dt5	-0.00034725	0.00175835*	0.00623461***	0.01596003***	-0.01024131*
dt6	(omitted)	(omitted)	(omitted)	(omitted)	(omitted)
_cons	0.24033779***	0.69370337***	0.43843657***	-1.1912677*	-0.9887705***
N	906	906	906	906	906
EKC Hypothesis	↘	↘	N	N	∅

Legenda: *p<0.05 ; **p<0.01; ***p<0.001 ; gdp- Prodotto Interno Lordo (PIL); dt- dummy relative al tempo t

Fonte: ALMEIDA, T. A. DAS N. *et al.* 2017. Economic growth and environmental impacts: An analysis based on a composite index of environmental damage, *Ecological Indicators*. Elsevier B.V., 76, pp. 119–130. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.028.

I risultati mostrano che nelle prime due regressioni, *DF* e *P*, il coefficiente stimato del PIL è significativo solamente quando è di primo grado (al 95% e al 99%, rispettivamente) e presenta un valore negativo: questo significa che nelle prime fasi, la crescita economica provoca una diminuzione di attività altamente intensive e conseguentemente la pressione sull'ambiente. Si può notare invece che per gli *effects* gli esiti sono differenti: tutti i coefficienti delle variabili considerate sono significativi al 99%. β_1 e β_3 (i coefficienti del PIL e PIL³) sono positivi mentre

β_2 negativo. Tale risultato suggerisce che nei primi stadi del progresso l'impatto sulla salute umana tende ad aumentare, in un secondo momento a diminuire e infine cresce nuovamente. Risultati analoghi sono trovati per il fattore 1 e quindi anch'esso mostra un andamento a forma di N. Infine, nessuno dei coefficienti relativi al PIL del fattore 2 è significativo, perciò non si può concludere nulla a riguardo. In generale è possibile osservare che nessuna delle variabili che hanno un impatto sull'ambiente presenta la forma a U rovesciata: le prime due mostrano un andamento lineare decrescente mentre la terza e la quarta un profilo a N.

Lo studio riportato vuole dimostrare che l'ipotesi della EKC non è supportata dal modello *mCIEP* e dalle variabili che lo compongono. Tale esito contribuisce alla vasta letteratura in contrasto con la teoria che sostiene l'impatto positivo della crescita economica sull'ambiente nel lungo periodo. L'utilizzo di un indice composito permette di descrivere in maniera più approfondita le conseguenze dell'attività umana sull'ambiente e sulla salute della popolazione, ragion per cui le future ricerche empiriche dovrebbero esaminare una maggiore varietà di inquinanti e cercare di catturare gli effetti nelle diverse sfere ambientali, piuttosto che concentrarsi solamente sulle emissioni di inquinanti d'aria.

CONCLUSIONE

Nella molteplicità di teorie proposte negli anni - per spiegare l'ipotesi della EKC, emergente risulta il *Green Solow Model*, proposto da Brock e Taylor (2010), nel quale l'interazione tra il progresso tecnologico nell'abbattimento delle emissioni e i rendimenti decrescenti di capitale - diviene responsabile del profilo delle emissioni nel tempo. Il contributo dei due autori è notevole sotto vari punti di vista: non solo viene presentata una convincente spiegazione teorica all'andamento parabolico, ma viene anche proposto un metodo empirico alternativo, basato sulla convergenza delle emissioni.

Nonostante il successo del lavoro presentato, è chiaro che vi siano alcuni aspetti che andrebbero analizzati in maniera più approfondita. È doveroso infatti notare che alcune assunzioni che il modello riporta per semplicità analitica, possano risultare una minaccia per la sua validità.

In aggiunta, l'analisi empirica si limita all'indagine di un solo indice - per un campione di paesi, senza considerarne le caratteristiche individuali.

Come sopra esposto, alcuni ricercatori, nell'analizzare la relazione tra sistema economico e ambientale, hanno cercato di trascendere la letteratura tradizionale, includendo nei modelli o nelle analisi empiriche fattori aggiuntivi e riportando esiti talvolta in contrasto con l'ipotesi EKC.

Le problematiche che possono essere rilevate nel modello di Brock e Taylor (2010), non vogliono metterne in dubbio l'importanza o l'utilità, ma evidenziare che vi sono elementi che andrebbero ulteriormente esaminati e approfonditi. Sono gli stessi autori a invitare ricerche future ad andare oltre il mondo semplificato del *Green Solow Model*, cercando sempre di mantenere una stretta connessione con gli studi empirici.

La necessità di modelli che riescano a riflettere in maniera adeguata le conseguenze ambientali dell'attività economica, è di estrema importanza, soprattutto per esigenze politiche. La EKC potrebbe risultare una visione valida per spiegare il rapporto tra crescita e ambiente, tuttavia è essenziale capire quando e se l'ipotesi sia effettivamente verificata, al fine di adottare le misure adatte per ogni paese, in riferimento alle diverse forme d'inquinamento.

BIBLIOGRAFIA

1. ALMEIDA, T. A. DAS N. *et al.*, 2017. Economic growth and environmental impacts: An analysis based on a composite index of environmental damage', *Ecological Indicators*. Elsevier B.V., 76, pp. 119–130. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.12.028.
2. ANDREONI, J. e LEVINSON, A. ,2001. The simple analytics of the environmental Kuznets curve', *Journal of Public Economics*, 80(2), pp. 269–286. doi: 10.1016/S0047-2727(00)00110-9.
3. ARROW, K. *et al.* 1995. Economic growth, carrying capacity, and the environment 1. *Ecological Economics* 15 (1995) 91-95 [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(95\)00059-3](https://doi.org/10.1016/0921-8009(95)00059-3)
4. BECKERMAN W. ,1992. Economic growth and the environment: Whose growth? whose environment? *World Development*, 20(4), pp. 481-496 doi: [https://doi.org/10.1016/0305-750X\(92\)90038-W](https://doi.org/10.1016/0305-750X(92)90038-W)
5. BROCK, W. A. e TAYLOR, M. S., 2010. The Green Solow model, *Journal of Economic Growth*, 15(2), pp. 127–153. doi: 10.1007/s10887-010-9051-0.
6. DINDA, S., 2004. Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey, *Ecological Economics*. Elsevier, 49(4), pp. 431–455. doi: 10.1016/j.ecolecon.2004.02.011.
7. GARCÍA-SÁNCHEZ I. M., *et al.*, 2015. A proposal for a Composite Index of Environmental Performance (CIEP) for countries, *Ecological Indicators*. Elsevier, 48, pp. 171–188. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.08.004.
8. GROSSMAN G. M. e KRUEGER , A.B., 1991. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement, Papers 158, Princeton, Woodrow Wilson School - Public and International Affairs.
9. KAIKA, D. e ZERVAS, E., 2013. The Environmental Kuznets Curve (EKC) theory-Part A: Concept, causes and the CO 2 emissions case, *Energy Policy*, 62, pp. 1392–1402. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.131.
10. KAIKA, D. e ZERVAS, E., 2013. The environmental Kuznets curve (EKC) theory. Part B: Critical issues, *Energy Policy*, 62, pp. 1403–1411. doi: 10.1016/j.enpol.2013.07.130.
11. KIJIMA, M., *et al.* 2010. Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 34(7), pp. 1187–1201. doi: 10.1016/j.jedc.2010.03.010.
12. MADDISON, D., 2006. Environmental Kuznets curves: A spatial econometric approach, *Journal of Environmental Economics and Management*, 51(2), pp. 218–230. doi: 10.1016/j.jeem.2005.07.002.

13. McCONNELL, K. E. (1997) 'Income and the demand for environmental quality', *Environment and Development Economics*. Cambridge University Press (CUP), 2(4), pp. 383–399. doi: 10.1017/s1355770x9700020x.
14. PANAYOTOU, T. ,1997. Demystifying the Environmental Kuznets Curve: Turning a Black Box into a Policy Tool. *Environment and Development Economics*, vol.. 2, pp. 465–484.
15. PANOPOULOU, E. e PANTELIDIS, T., 2009. Club convergence in carbon dioxide emissions, *Environmental and Resource Economics*. Springer Netherlands, 44(1), pp. 47–70. doi: 10.1007/s10640-008-9260-6.
16. PEARCE, D., 2003. Conceptual framework for analysing the distributive impacts of environmental policies.
17. PETTERSSON, F. *et al.* 2014. Convergence of Carbon Dioxide Emissions: A Review of the Literature, *International Review of Environmental and Resource Economics*. Now Publishers, 7(2), pp. 141–178. doi: 10.1561/101.00000059.
18. RIOS, V. e GIANMOENA, L., 2018. Convergence in CO2 emissions: A spatial economic analysis with cross-country interactions, *Energy Economics*. Elsevier B.V., 75, pp. 222–238. doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.009.
19. STERN *et al.*, 1996. Economic Growth and Environmental Degradation: The Environmental Kuznets Curve and Sustainable Development, *World Development*, 24, pp. 1151–1160.
20. STERN, D. I. 2004. The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve, *World Development*. doi: 10.1016/j.worlddev.2004.03.004.
21. STERN, D. I. 2017. The environmental Kuznets curve after 25 years, *Journal of Bioeconomics*. Springer US, 19(1), pp. 7–28. doi: 10.1007/s10818-017-9243-1.
22. STOKEY, N. L., 1998. Are there limits to growth?, *International Economic Review*, 39, pp. 1-31