



Universidad de Valladolid

**Facultad de Ciencias Económicas y
Empresariales**

Trabajo Fin de Grado

Grado en Economía

**Crecimiento óptimo y
medioambiente**

Presentado por:

Isabel Hernández Negueruela

Tutelado por:

Julio López Díaz

Valladolid, 11 de julio de 2024

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado titulado “Crecimiento óptimo y medio ambiente” realiza un estudio teórico acerca de la compleja relación entre el crecimiento económico y la sostenibilidad medioambiental, el impacto que tienen las regulaciones políticas en la competitividad empresarial y el desarrollo de los países y como la desigualdad puede influir en la contaminación ambiental. Examinaremos la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental, postulando que el crecimiento puede llevar a mejoras medioambientales tras superar un punto de inflexión, especialmente en contaminantes locales. Evaluaremos la Hipótesis de Porter, la cual argumenta que las regulaciones medioambientales pueden estimular la innovación sin necesidad de perjudicar la competitividad. Además, analizaremos diferentes adaptaciones de modelos de crecimiento económico comunes para integrar variables medioambientales, como el modelo "verde" de Solow. También defenderemos la importancia que tiene abordar la desigualdad y fortalecer las instituciones de los países para lograr un crecimiento sostenible. Concluimos a través de este análisis que la sostenibilidad y el crecimiento económico se pueden lograr simultáneamente mediante inversiones en innovación, eficiencia y regulaciones efectivas que fomenten prácticas sostenibles que no pongan en riesgo la competitividad.

PALABRAS CLAVE: Crecimiento económico, medio ambiente, sostenibilidad y contaminación.

Clasificación JEL: B22, E13, O41, P28, Q01, Q32, Q50

ABSTRACT

This thesis entitled ‘Optimal Growth and the Environment’ conducts a theoretical study of the complex relationship between economic growth and environmental sustainability, the impact of political regulations on business competitiveness and the development of countries, and how inequality can influence environmental pollution. We will examine the Environmental Kuznets Curve hypothesis, postulating that growth can lead to environmental improvements after passing a tipping point, especially in local pollutants. We will evaluate the Porter Hypothesis, which argues that environmental regulations can stimulate innovation without harming competitiveness. In addition, we will analyze different adaptations of common economic growth models to integrate environmental variables, such as Solow's ‘green’ model. We will also argue the importance of tackling inequality and strengthening countries' institutions to achieve sustainable growth. We conclude through this analysis that sustainability and economic growth can be achieved simultaneously through investments in innovation, efficiency and effective regulations that encourage sustainable practices that do not put in danger competitiveness.

KEY WORDS: Economic growth, environment, sustainability and pollution.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	5
2. CRECIMIENTO ECONOMICO	7
2.1. Importancia	7
2.2. Datos de crecimiento económico.....	7
2.3. Introducción a los modelos de crecimiento	9
2.4. Modelos con tasa de ahorro constante vs. Crecimiento óptimo	11
2.4.1. Modelo de Solow de crecimiento exógeno:.....	13
2.4.2. Modelo de Romer de crecimiento endógeno con externalidades del capital	15
2.4.3. Crecimiento óptimo y exógeno. Modelo de Ramsey	17
2.4.4. Crecimiento óptimo y endógeno. Modelo de Lucas con capital humano (1988)	19
3. MEDIO AMBIENTE.....	21
3.1. Importancia	21
3.2. Datos emisiones CO₂	21
3.3. Causas y consecuencias de la acción humana	23
3.4. Políticas frente al cambio climático.....	23
4. MEDIO AMBIENTE Y ECONOMÍA.....	26
4.1. Curva Kuznets medioambiental	26
4.2. Regulación medioambiental y competitividad: la hipótesis de Porter	28
5. MODELOS DE CRECIMIENTO ECONOMICO Y MEDIOAMBIENTE.....	29
5.1. Modelo verde de Solow. Versión 1	29
5.2. Modelo verde de Solow. Versión 2	33
5.3. Modelo de Ramsey con contaminación.....	34
5.4. Otras modelizaciones	38
6. CONCLUSIONES.....	40
BIBLIOGRAFÍA:	43

ÍNDICE DE GRÁFICOS Y CUADROS

- Figura 2.2.1. Crecimiento del PIB Mundial (% anual) 8
- Figura 2.2.2. Índice de Gini 2023 9
- Figura 2.4.1.1. Diagrama de Solow 14
- Figura 2.4.1.2. Dinámica de transición 15
- Figura 2.4.2.1. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta < 1$ 16
- Figura 2.4.2.2. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta = 1$ 17
- Figura 2.4.2.3. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta > 1$ 17
- Figure 3.2.1. Global fossil CO₂ emissions¹⁹ by sector (left axis) and per capita (right axis), 1970-2021 (in Gt) 22
- Figura 4.1.1. Curva de Kuznets ambiental 26
- Figura 5.1.1. Dinámica de la MP 30
- Figura 5.1.2. Dinámica de la contaminación 32
- Figura 5.1.3. EE de la contaminación y el capital 32
- Figura 5.3.1. Dinámica de transición del modelo de Ramsey-Cass-Koopmans 35
- Figura 5.3.2. Dinámica de transición del modelo de Ramsey-Cass-Koopmans 37

1. INTRODUCCIÓN

La humanidad se enfrenta a nuevos desafíos. Tenemos ante nosotros un clima cambiante y eventos extremos cada vez más intensos y frecuentes generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas. La emisión continuada de gases de efecto invernadero va a provocar un mayor calentamiento, así como cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático. Gracias a la inversión en campos como la ciencia, la tecnología, la medicina... Se ha producido un cambio en los patrones de consumo de la población y un aumento de su bienestar general en los países desarrollados como consecuencia del aumento del PIB_{pc} debido al crecimiento económico desencadenado tras la IRI (Primera Revolución Industrial).

Sin embargo, a pesar de las positivas consecuencias, no podemos olvidar que en muchas ocasiones este crecimiento se ha producido de forma descontrolada, afectando tanto al planeta como a sus habitantes. Se ha producido sobreexplotación de recursos naturales, extinción por exterminio o accidente de especies, tasas muy elevadas de contaminación y efectos psicológicos negativos sobre la población.

Esta es la razón por la que elegí este tema para realizar mi Trabajo de Fin de Grado, porque creo que debería prestarse mayor atención a esta ambigua relación entre crecimiento económico y medio ambiente, tema del que muchos se han despreocupado durante años debido a la visión cortoplacista que tiende a presentar la población provocando escasos progresos en la lucha contra el cambio climático.

La estructura del trabajo es la que sigue: empezaremos en el apartado 2 con una introducción al concepto de crecimiento económico para pasar a desarrollar los cuatro modelos que he considerado como principales o más icónicos acerca del crecimiento económico, distinguiendo entre modelos de crecimiento exógeno o endógeno y modelos de tasa de ahorro constante u óptimos:

- Modelo de crecimiento con tasa de ahorro constante y progreso tecnológico exógeno: Modelo de Solow (1956).
- Modelo de crecimiento con tasa de ahorro constante y progreso tecnológico endógeno: Modelo de Romer de externalidades del capital (1986).

- Modelo de crecimiento óptimo y progreso tecnológico exógeno: Modelo de Ramsey (1965).
- Modelo de crecimiento óptimo y progreso tecnológico endógeno: Modelo de Lucas óptimo con capital humano de dos sectores (1988).

En el tercer apartado nos centramos en el concepto de medio ambiente, estudiando las causas de su variación, la responsabilidad que tiene la acción humana en sus cambios y las distintas políticas que se han ido tomando a lo largo de los años con el fin de promover la sostenibilidad y los efectos de estas sobre el medioambiente.

Entramos en materia en el apartado 4, poniendo en relación los conceptos “crecimiento y medio ambiente” mediante el estudio de la Curva de Kuznets Ambiental y la Hipótesis de Porter. Y en el 5 estudiamos modelos económicos verdes basados en los modelos de Solow y Ramsey y sintetizamos otros modelos que han sido desarrollados por diversos autores y expertos en materia. Para acabar presentamos las conclusiones extraídas del trabajo y del estudio realizado a lo largo de este Trabajo de Fin de Grado.

Para su elaboración he recurrido a distintas fuentes bibliográficas especializadas en el ámbito económico y medioambiental. Al ser un trabajo de naturaleza teórica no he precisado acudir a bases de datos, y me he basado en libros o artículos escritos sobre la materia.

2. CRECIMIENTO ECONOMICO

2.1. Importancia

El concepto de crecimiento económico se define como “el cambio cuantitativo o expansión de la economía de un país” y es medido como el aumento porcentual del producto interno bruto (PIB) o el producto nacional bruto (PNB) en un año.

Se trata de un fenómeno que puede desarrollarse de dos formas distintas. Por un lado, tenemos el crecimiento extensivo y por otro, el intensivo. Cuando una economía crece de manera extensiva, se debe a que está utilizando un mayor número de recursos, como pueden ser el capital físico, humano o natural. Cuando crece de manera intensiva, se debe a que está usando la misma cantidad de recursos, pero con mayor eficiencia, es decir, aumentando la productividad.

Un crecimiento económico de tipo extensivo no desemboca en un aumento del ingreso por habitante. Sin embargo, cuando el crecimiento se logra mediante un uso más productivo de todos los recursos, viene acompañado de un incremento del ingreso por habitante y por tanto de la mejora del nivel de vida, como promedio, de la población. Esto convierte al crecimiento económico intensivo en condición necesaria para el desarrollo económico de los países industrializados, permitiendo una mejora en los servicios que prestan a sus respectivas poblaciones.

Sin embargo, la importancia del crecimiento trasciende lo económico, ya que un estancamiento económico puede desencadenar en revoluciones sociales, como las recientemente ocurridas en los países del este o la URSS.

Por otro lado, aunque el crecimiento económico tiende a mejorar las condiciones sociales, también puede llevar a problemas como la desigualdad, el desempleo y el agotamiento de recursos. Es por esto que un crecimiento sostenible debe venir acompañado de un desarrollo humano, como pueden ser mejoras en la educación, empleo de mayor calidad y democracia.

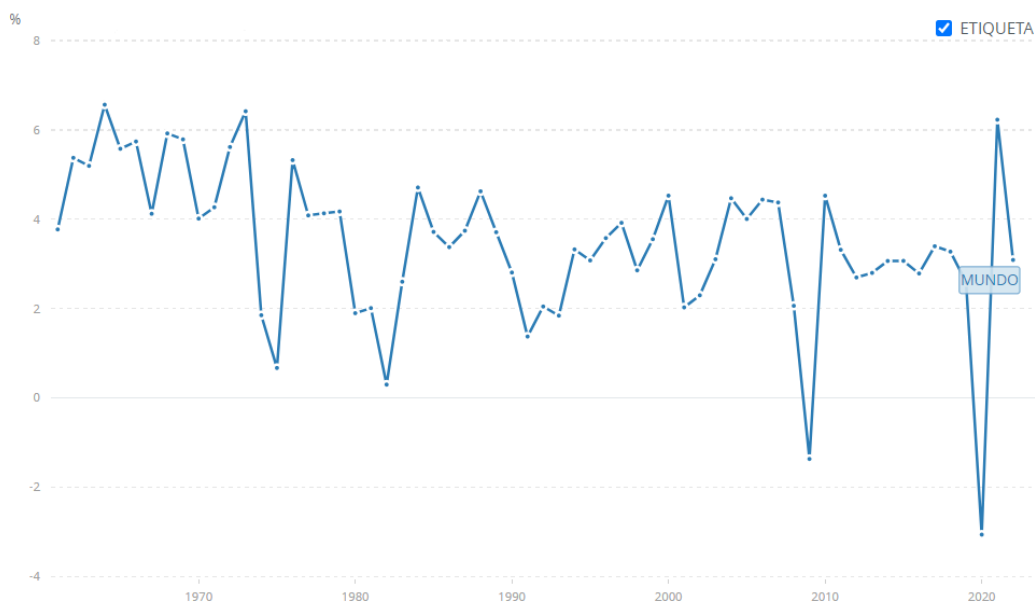
2.2. Datos de crecimiento económico

El fenómeno crecimiento económico, entendido como el aumento en los niveles de producción, es bastante reciente. Lo que actualmente es considerado crecimiento económico, es decir, incrementos anuales de la producción alrededor del 2%, se trata

de una tendencia observada desde la primera Revolución Industrial, al principio en un número reducido de países y de forma moderada. No fue hasta la segunda mitad del S.XX que este fenómeno se intensificó.

Podemos hacer un análisis de la historia económica basándonos en el Maddison Project Database 2020. De él extraemos que se ha producido un crecimiento global sostenido en el tiempo (observamos el PIB mundial), claro está incluyendo periodos de desaceleración y recesión, así como de auge.

Figura 2.2.1. Crecimiento del PIB Mundial (% anual)

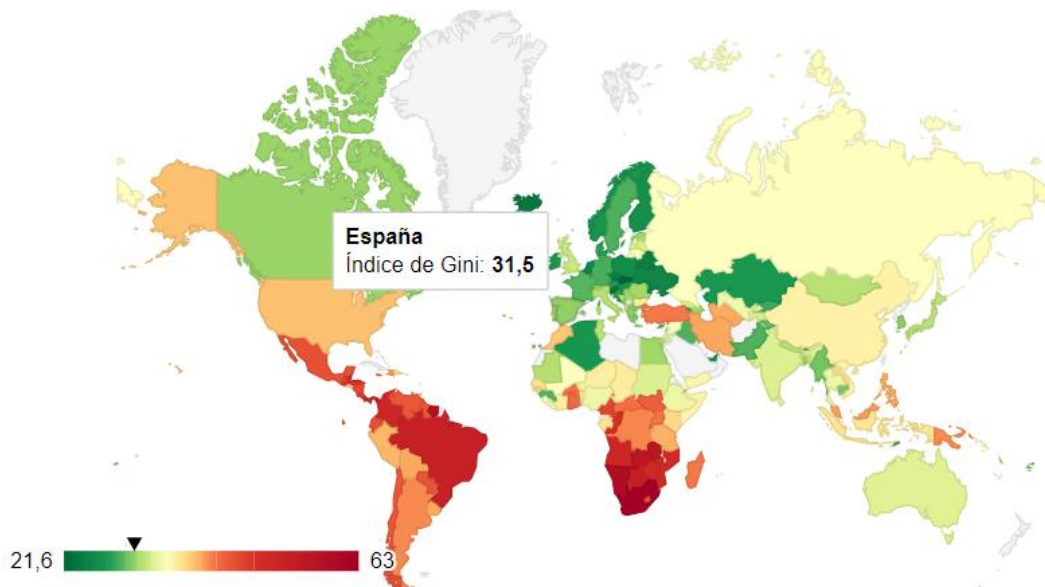


Fuente: Datos sobre las cuentas nacionales del Banco Mundial y archivos de datos sobre cuentas nacionales de la OCDE.

Estas fases de expansión y contracción se deben a los conocidos como “ciclos económicos” y se encuentran influenciados por una gran variedad de factores, como pueden ser los cambios en la demanda agregada, fluctuaciones en los mercados financieros, políticas gubernamentales y eventos geopolíticos. En cuanto a las desigualdades económicas que se han ido observando a lo largo de los años, podemos concluir que se han dado grandes diferencias en la distribución del ingreso y la riqueza tanto entre países como dentro de cada sociedad. Aunque ha mejorado las condiciones de vida en muchos lugares, el crecimiento económico también es responsable del aumento de las desigualdades en algunos casos.

Uno de los medidores de desigualdad social entre los habitantes de una región por excelencia es el Índice de Gini, también conocido como Coeficiente de Gini. A mayor desigualdad, mayor coeficiente. En la Figura 2.2.2. podemos observar el Índice de Gini por países en una escala de colores, identificando que en España tiene un valor de 31,5.

Figura 2.2.2. Índice de Gini 2023



Fuente: Datosmacro.com

Aún queda un largo camino por recorrer para acabar con las desigualdades en todos los países, siendo Eslovaquia el que mejor está con un valor de 21,6 y Sudáfrica el que peor con un valor de 63.

Sin embargo, la economía está sometida a constantes shocks que provocan grandes crisis, como la Gran Depresión tras el crack del 1929, la Gran Crisis o crisis financiera de 2008 o la muy reciente crisis del COVID19. Estos acontecimientos llevan a cambios en las políticas económicas, reformas institucionales y transformaciones sociales. A mayores, a lo largo de los siglos se han producido guerras y revoluciones que han desviado a los países de su crecimiento y desarrollo económico y social.

2.3. Introducción a los modelos de crecimiento

Siguiendo a Borondo (2018), vamos a empezar con una introducción de las ideas sobre crecimiento económico, con una distinción de cuatro periodos.

a) Los inicios.

Adam Smith., en su libro “La riqueza de las naciones” publicado en 1776, desarrolló las primeras ideas sobre el crecimiento en un intento de encontrar una explicación al auge de la economía del Reino Unido en comparación con sus economías rivales del momento, como España o Francia. A. Smith no solo daba importancia a la acumulación de factores, también a la mejora en su calidad gracias a la educación. Introdujo temas como la división del trabajo para el aumento de la eficiencia, la importancia del comercio internacional para el aprovechamiento de economías de escala, así como de la importancia de las instituciones.

Sus seguidores como A. Marshall o J.A. Schumpeter se mantuvieron dentro del esquema de sus ideas, aunque estos no las formalizaron.

b) El modelo neoclásico:

En el 1956 R. Solow y T. Swan publicaron por separado un modelo de crecimiento que más adelante sería conocido como modelo neoclásico. En este modelo el motor de crecimiento de una economía es la acumulación de capital productivo a través de la inversión, lo que nos lleva a dar importancia al ahorro. Sin embargo, este crecimiento tiene un límite si no se introduce progreso técnico, pero Solow no explicó cómo se podría introducir este progreso técnico.

Durante la siguiente década se llevaron a cabo muchas ampliaciones sobre estos modelos, sin embargo, se produjo un estancamiento en la década de los 70, entre otras cosas debido a la crisis económica internacional que hizo poner el foco en el corto plazo. En estos años predominaron modelos macroeconómicos caracterizados por su gran complejidad matemática e irrelevancia explicativa.

c) El crecimiento endógeno:

Se estaba buscando dar una explicación al concepto de progreso técnico y como conseguirlo. P. Romer hizo un primer intento en el año 1986, con su idea del “learning by doing” desarrollando el modelo de externalidades de capital o modelo AK. Se trata de un modelo de crecimiento endógeno, ya que fue capaz de explicar el crecimiento positivo a largo plazo sin necesidad de introducir ninguna variable que creciese de forma exógena. Se empezó a considerar a la tecnología como algo intrínseco al sistema justificando que cuando se acumula capital, el aprendizaje por la práctica genera un progreso tecnológico que tiende a elevar el producto marginal

del capital, compensando así la tendencia a que el producto marginal disminuya cuando la tecnología no cambia.

Se siguió tratando de explicar el progreso técnico y surgieron ideas como la de Lucas (1988) de combinar el capital productivo con capital humano o la de Barro (1990) sobre el efecto positivo que tiene el gasto público. Pero no es hasta que surge el modelo que hoy se conoce como modelo endógeno elaborado por Romer en el 1990, que introdujo el sector de I+D con patentes.

d) Nuevas preocupaciones:

En los últimos años ha vuelto a surgir la preocupación acerca del crecimiento a largo plazo. Un claro ejemplo lo encontramos en la elaboración de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como Agenda 2030, elaborados por la Naciones Unidas en colaboración de expertos como Jeffrey Sachs que tratan de entender si es posible el crecimiento sin conducirnos al agotamiento de recursos y la generación de contaminación.

A este respecto, en este Trabajo de fin de Grado vamos a explicar los cuatro modelos principales sobre crecimiento, representativos de las dos consideraciones de fondo (exógenos vs. endógenos) y de forma (tasa de ahorro constante vs. óptima):

- Modelo de crecimiento con tasa de ahorro constante y progreso tecnológico exógeno: Modelo de Solow (1956).
- Modelo de crecimiento con tasa de ahorro constante y progreso tecnológico endógeno: Modelo de Romer de externalidades del capital (1986).
- Modelo de crecimiento óptimo y progreso tecnológico exógeno: Modelo de Ramsey (1965).
- Modelo de crecimiento óptimo y progreso tecnológico endógeno: Modelo de Lucas óptimo con capital humano de dos sectores (1988).

2.4. Modelos con tasa de ahorro constante vs. Crecimiento óptimo

Los modelos con tasa de ahorro constante simplifican mucho la realidad ya que asumen el supuesto de que los individuos ahorran una proporción fija de su renta de su renta $s = sy_t$, y lo que no ahorran lo consumen $c_t = (1 - s)y_t$. El primero y más importante de este tipo de modelos es el modelo de crecimiento exógeno desarrollado por Solow

(1956), caracterizado por considerar una función de producción neoclásica y gracias al cual recibió el premio Nobel de Economía en el año 1987. Entre los modelos alternativos de crecimiento endógeno se encuentra el modelo de Romer (1986) de externalidades del capital, quien introdujo cambios en la función de producción neoclásica para eliminar los rendimientos decrecientes del capital y poder explicar crecimiento en estado estacionario.

Como alternativa a los modelos con tasa de ahorro constante, Cass (1965) y Koopmans (1965) partiendo del trabajo de Ramsey (1928), elaboraron un modelo de crecimiento en el que los agentes económicos (familias y empresas) se comportan de forma óptima maximizando funciones de utilidad o de beneficios. Este modelo (en adelante modelo de Ramsey) también es un modelo de crecimiento exógeno porque, como el de Solow, considera funciones de producción tipo neoclásico, que les impide explicar crecimiento a largo plazo salvo que éste sea generado mediante mejoras externas en la tecnología.

En 1988 Robert Lucas propuso un modelo de crecimiento endógeno con capital humano, el cual defiende que son factores internos, como el capital humano y la innovación tecnológica, los que determinan el crecimiento económico a largo plazo, en contraste con el modelo de crecimiento exógeno de Solow, que depende principalmente de factores externos.

Antes de empezar a desarrollar los modelos económicos de crecimiento, vamos a estudiar la función de producción neoclásica.

$$Y_t = F(A, K_t, L_t)$$

Esta función depende de tres factores: trabajo (L_t), capital (K_t) y tecnología (A_t). Consideramos $A_t = A$, ya que estamos suponiendo que el progreso tecnológico es constante. Además, cumple tres propiedades:

1. Rendimientos constantes a escala: cuando aumentamos en la misma cantidad los factores capital y trabajo, el valor final crece en la misma proporción. Esto se conoce como homogeneidad de grado 1

$$F(A, \lambda K_t, \lambda L_t) = \lambda F(A, K_t, L_t) = \lambda Y_t$$

Como podemos observar, A no está multiplicado. Esto se debe a que la tecnología es replicable, es decir, es un factor productivo no rival.

2. Rendimiento decreciente de los factores de producción: la productividad marginal de los factores de producción (K_t y L_t) es positiva, pero decreciente.

$$\frac{\delta F}{\delta K} > 0, \frac{\delta F}{\delta L} > 0; \frac{\delta^2 F}{\delta^2 K} < 0, \frac{\delta^2 F}{\delta^2 L} < 0$$

3. Satisface las condiciones de Inada: esto significa que la productividad marginal del capital se aproxima a cero cuando éste tiende a infinito, y viceversa.

$$\lim_{K \rightarrow \infty} \frac{\delta F}{\delta K} = 0; \lim_{K \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta K} = \infty \text{ \& } \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\delta F}{\delta L} = 0; \lim_{L \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta L} = \infty$$

2.4.1. Modelo de Solow de crecimiento exógeno:

Para obtener la ecuación fundamental de crecimiento genérica, sea cual sea el modelo, tenemos que seguir tres pasos:

- I. Definir unos supuestos.

- a. Economía cerrada y sin sector público. No existen importaciones, exportaciones, gasto público, ni impuestos. El crecimiento económico está fundamentado en la inversión en capital físico.
- b. Función de producción de tipo neoclásico, concretamente Cobb-Douglas:

$$Y_t = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha}; A > 0, 0 < \alpha < 1 \quad [2.4.1.1]$$

- c. Tasa de ahorro constante y exógena:

$$s \text{ cte. } S_t = sY_t \quad [2.4.1.2]$$

- d. δ es la tasa de depreciación del capital y es constante:

$$\delta \text{ cte } \rightarrow I_t = \dot{K}_t + \delta K_t \quad [2.4.1.3]$$

- e. $Pob = L_t$

$$\hat{L} = \frac{\dot{L}_t}{L_t} = n \text{ (cte.)} \quad [2.4.1.4]$$

- II. Operar para obtener la ley de acumulación de capital agregado (K):

$$S_t = I_t \Rightarrow sI_t = \dot{K}_t + \delta K_t \Rightarrow \dot{K}_t = sY_t - \delta K_t \quad [2.4.1.5]$$

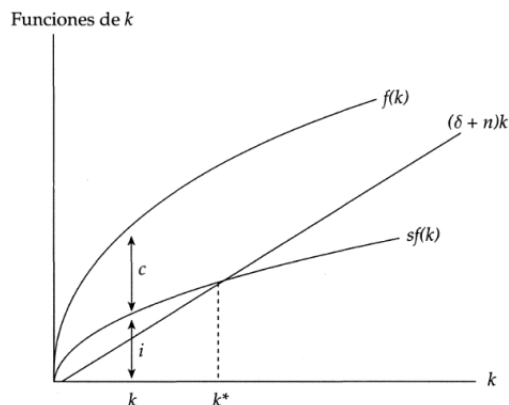
- III. Dividir por la población para obtener la Ecuación Fundamental de Crecimiento:

$$\frac{\dot{K}_t}{L_t} = s \frac{Y_t}{L_t} - \delta \frac{K_t}{L_t} \Rightarrow \dot{k}_t + nk_t = sy_t - \delta k_t \Rightarrow \dot{k}_t = sy_t - (n + \delta)k_t \quad [2.4.1.6]$$

A partir de esta expresión, considerando la función de producción Cobb Douglas se obtiene la expresión de la Fundamental de Crecimiento del Modelo de Solow:

$$\dot{k}_t = sAk_t^\alpha - (n + \delta)k_t \quad [2.4.1.7]$$

Figura 2.4.1.1. Diagrama de Solow



Fuente: Apuntes de crecimiento económico, Sala-i-Martin (2000).

En el Gráfico 2.4.1.1. observamos 3 curvas. La CD y CA se cruzan en dos puntos, el punto de origen y un segundo que representa el Estado Estacionario (EE), representado por k_t^* , cantidad de capital en el estado estacionario en donde el crecimiento de la economía es constante. Como la CA es decreciente, llegará un momento en el que la depreciación sea igual a la inversión, por lo que se acabará el incremento de capital haciendo que su tasa de acumulación se anule ($\dot{k}_t = 0$) y por tanto el k_t sea constante. Esta ecuación representa el capital de equilibrio de la economía:

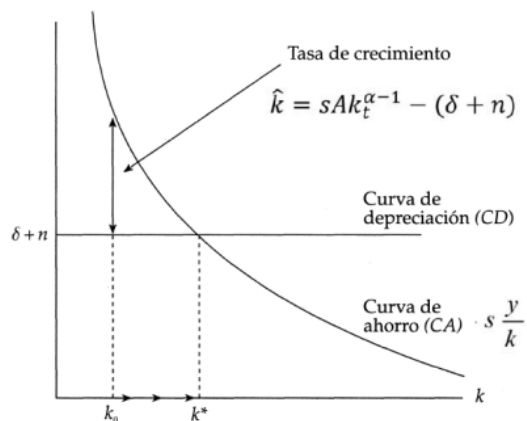
$$k_t^* = \left(\frac{sA}{\delta+n} \right)^{\frac{1}{1-\alpha}} \quad [2.4.1.8]$$

Llegamos al estado estacionario debido a los rendimientos decrecientes del capital, ya que cada unidad más va a generar menor crecimiento que la anterior hasta alcanzar el estado estacionario. El stock de capital en estado estacionario se mantiene constante luego el crecimiento de la economía es cero ya que el nivel del PIB también es constante. Por lo que, todas las variables per cápita en estado estacionario permanecen constantes, es decir, sus tasas de crecimiento son cero ($\dot{y}_t = \dot{k}_t = \dot{c}_t = 0$).

Podemos concluir que debido a que la función de producción es neoclásica, la economía se acerca de forma inevitable al punto donde deja de crecer. Es por esto por lo que el

modelo de Solow de crecimiento exógeno solo explica el crecimiento de la economía en el corto plazo, y a largo plazo (EE) sólo se produciría si se producen mejoras exógenas en la tecnología.

Figura 2.4.1.2. Dinámica de transición



Fuente: Apuntes de Crecimiento Económico, Sala-i-Martín (2000)

2.4.2. Modelo de Romer de crecimiento endógeno con externalidades del capital

Paul Romer introdujo la idea de que cuando una empresa invierte y aumenta su stock de capital, también adquiere conocimientos (aprendizaje por la práctica), los cuáles son utilizados por todas las empresas, haciendo que la producción de estas también aumente (efecto desbordamiento). Ello lo modelizó en una función de producción que incorporaba externalidad del capital susceptible de generar crecimiento endógeno a largo plazo. La función de producción es la siguiente:

$$Y_t = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha} k_t^\eta \quad [2.4.2.1]$$

Como podemos observar, la diferencia de esta función con la Cobb-Douglas es k_t^η , término que representa la externalidad. A mayor η , mayor importancia tiene la externalidad.

Romer defiende que el último término de la ecuación representa el capital agregado de la economía, sin embargo, nosotros trabajaremos con la idea de Lucas (1988), que defiende que es el capital per cápita. Operando:

$$Y_t = AK_t^{\alpha+\eta} L_t^{1-\alpha-\eta} \quad [2.4.2.2]$$

$$y_t = Ak_t^{\alpha+\eta} \quad [2.4.2.3]$$

Sustituyendo en la ecuación fundamental de crecimiento genérica [2.4.1.6]

$$\dot{k}_t = sAk_t^{\alpha+\eta} - (n + \delta)k_t \quad [2.4.2.4]$$

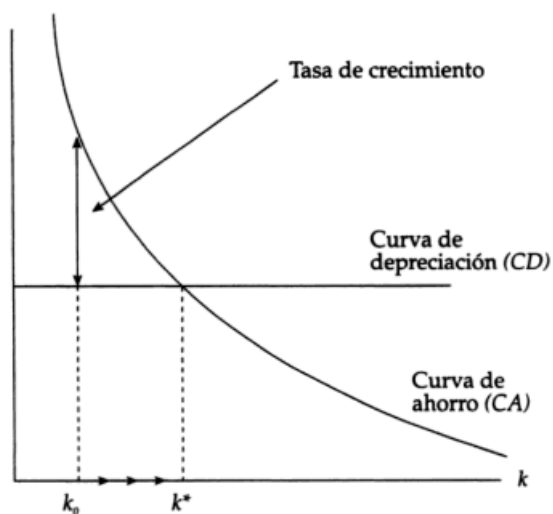
Y ahora, calculamos la tasa de crecimiento del capital per cápita:

$$\gamma_k = sAk_t^{\alpha+\eta-1} - (n + \delta) \quad [2.4.2.5]$$

Lo que marca la diferencia con respecto al modelo de Solow es la suma de $\alpha + \eta$. Esto nos presenta tres casos a estudiar:

- Caso 1: $\alpha + \eta < 1$; En este caso el exponente del capital en la función de ahorro es negativo. La CA (decreciente) y la CD (cte.) se van a cruzar en un único punto, el cual nos da un stock de capital en el estado estacionario, y además es estable (la economía tiende a este punto tanto por la izquierda como por la derecha). Por tanto, la economía se va a comportar como en el caso de Solow a pesar de que haya externalidades.

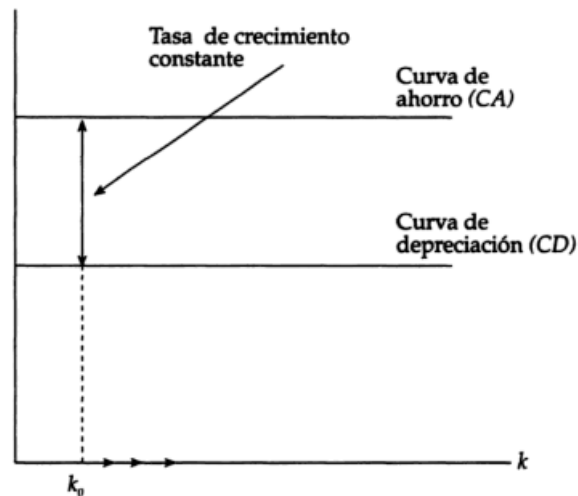
Figura 2.4.2.1. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta < 1$



Fuente: Apuntes de crecimiento económico, Sala-i-Martin (2000)

- Caso 2: $\alpha + \eta = 1$; Si lo sustituimos en la ecuación de crecimiento se observa que el exponente del capital pasa a ser cero, por lo que el capital desaparece de la ecuación, pasando a obtener la misma tasa de crecimiento que la obtenida en el modelo AK. De hecho, la función de producción también pasa a ser $Y = AK$.

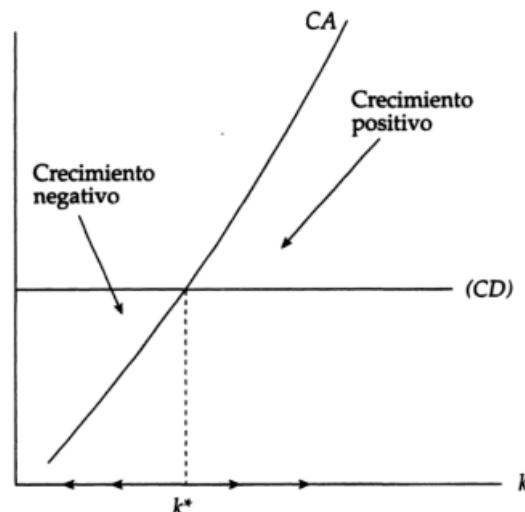
Figura 2.4.2.2. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta = 1$



Fuente: Apuntes de crecimiento económico, Sala-i-Martin (2000)

- Caso 3 $\alpha + \eta > 1$; Aquí el exponente es positivo. LA CA es creciente y va hacia infinito cuando k va hacia infinito. Sigue habiendo un único punto de corte entre la CA y CD, sin embargo, este estado estacionario es inestable. Si el $k < k^*$, la economía tiende a desaparecer y si $k > k^*$, la economía crece infinitamente, resultados no relevantes empíricamente ya que no se observan en la realidad.

Figura 2.4.2.3. Dinámica de transición Caso 1 $\alpha + \eta > 1$



Fuente: Apuntes de crecimiento económico, Sala-i-Martin (2000)

2.4.3. Crecimiento óptimo y exógeno. Modelo de Ramsey

Tiene su origen en el modelo de Solow, considera funciones de producción neoclásicas, predice que a largo plazo no hay crecimiento salvo que se genere de forma exógena y

habrá convergencia económica entre países. Presenta tres escenarios: el de Mercado, el de Familias Productoras y el del Planificador. Nosotros estudiaremos el escenario de Mercado, donde por un lado están las familias y por otro las empresas, y es en el mercado donde se encuentran. Aquí, las decisiones y equilibrios generan unos precios siguiendo unas sendas de comportamiento. Por tanto, tenemos tres conductas y de cada cual extraemos una ecuación:

- Familias: el problema de maximización de su función de utilidad intertemporal sujeto a la restricción presupuestaria intertemporal se concreta en:

$$\text{Maximizar } u(0) = \int_0^{\infty} e^{-(\rho-n)t} \frac{c_t^{1-\theta}-1}{1-\theta} dt \quad [2.4.3.1]$$

$$s. a. \dot{b}_t = w_t + r_t b_t - c_t - n b_t \quad [2.4.3.2]$$

Donde ρ es una constante que representa la tasa de descuento subjetiva, c_t es el consumo pc en el momento t , w_t es el salario en el momento t , r_t es el tipo de interés en t , b_t es la cantidad de activos pc, n es la tasa de crecimiento de la población y θ es un indicador de lo que valoramos consumir en el presente (cuanto más bajo es, más lineal es la función luego más me da igual consumir mucho o poco, mientras que cuanto más alto es, más valoro consumir todos los días por igual y por tanto la tasa de crecimiento del consumo será menor).

Se trata de un problema de optimización dinámico, el cual se resuelve mediante el método del Hamiltoniano, siendo la variable de control c_t , la variable estado b_t y el precio sombra o multiplicador de Lagrange λ_t . Cada una de estas variables presenta unas condiciones de primer orden (COP) distintas.

$$H = e^{-(\rho-n)t} \frac{c_t^{1-\theta}-1}{1-\theta} + \lambda_t (w_t + r_t b_t - c_t - n b_t) \quad [2.4.3.3]$$

Tras plantear las CPO, se obtiene la tasa de crecimiento:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\theta} [r_t - \rho] \quad [2.4.3.4]$$

Se trata de la tasa de crecimiento del consumo de las familias, conocida como ecuación de Euler y lo que nos dice es que el consumo crecerá o no en función de esta expresión diferencial $[r_t - \rho]$, siendo r_t el premio por no consumir hoy y ρ la tasa de egoísmo paterno (una tasa de descuento subjetiva), es decir, el coste de no consumir. También va a depender del valor de θ , cuanto mayor es, más valor consumir todos los días, luego la tasa de crecimiento es menor.

Las tres ecuaciones que definen el comportamiento de las familias a lo largo de la dinámica de transición hacia el estado estacionario son:

- $\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\theta} [r_t - \rho]$ [2.4.3.5]
- $\dot{b}_t = w_t + r_t b_t - c_t - n b_t$ [2.4.3.6]
- $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t b_t = 0$ [2.4.3.7]

- Empresas. Las empresas van a maximizar en un contexto de LP una función de beneficios teniendo en cuenta el carácter neoclásico de la función de producción.

$$\text{Maximizar } \pi = AK_t^\alpha L_t^{1-\alpha} - (r_t + \delta)K_t - w_t L_t \quad [2.4.3.8]$$

$$\alpha Ak_t^{1-\alpha} = r_t + \delta \quad [2.4.3.9]$$

Es decir, la productividad marginal del k_t debe coincidir con el precio del k_t

$$r_t = \alpha Ak_t^{1-\alpha} - \delta \quad [2.4.3.10]$$

Podemos obtener el salario sustituyendo en la función de beneficios ($\pi = 0$):

$$w_t = (1 - \alpha) Ak_t^\alpha \quad [2.4.3.11]$$

Esto indica que el comportamiento óptimo de las empresas es producir, demandar capital y trabajo hasta que el coste del factor coincida con su productividad marginal.

- Mercados. A nivel agregado la suma de todos los activos financieros es cero, luego $b_t = k_t$. Operando y sustituyendo llegamos a las tres ecuaciones que definen la dinámica de transición (crecimiento) de la economía hacia el estado estacionario:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\theta} [\alpha Ak_t^{\alpha-1} - \delta - \rho] \quad [2.4.3.12]$$

$$\dot{k}_t = Ak_t^\alpha - c_t - (\delta + n)k_t \quad [2.4.3.13]$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t k_t = 0 \quad [2.4.3.14]$$

Conclusiones similares a las del modelo de Solow-Swan, hay un crecimiento positivo hacia el estado estacionario pero transitorio ya que a largo plazo se agota debido a los rendimientos decrecientes del capital.

2.4.4. Crecimiento óptimo y endógeno con capital humano. Lucas (1988)

Se trata de un modelo basado en la acumulación de capital humano (H) y compuesto por dos sectores.

- Sector 1: la producción de bienes finales se obtiene de la combinación de capital físico y humano, pudiendo ser consumidos o transformados en capital físico.

$$\dot{K}_t = AK_Y^\alpha H_Y^{1-\alpha} - C_t - \delta_K K_t \quad [2.4.4.1]$$

- Sector 2: la acumulación de capital humano se genera a partir de capital físico y humano, con una tecnología diferente de la que se emplea para la obtención de la producción final.

$$\dot{H}_t = BK_H^\eta H_H^{1-\eta} - \delta_H H_t \quad [2.4.4.2]$$

Definamos unos supuestos para simplificar el modelo:

- $H = H_Y + H_H$ [2.4.4.3]
- u = fracción de capital humano utilizado en la producción de bienes finales.

$$H_Y = uH \quad [2.4.4.4]$$

$$H_H = (1 - u)H \quad [2.4.4.5]$$

- $\alpha > \eta = 0$ [2.4.4.6]

En este caso el escenario es el de familias productoras, que proporciona el mismo resultado que el escenario de mercados, pero con menos desarrollos matemáticos.

$$U(0) = \int_0^\infty e^{-(\rho-n)t} \left(\frac{c_t^{1-\theta}}{1-\theta} \right) dt \quad [2.4.4.7]$$

$$\text{s.a. } \dot{k}_t = Ak_t^\alpha u h_t^{1-\alpha} - c_t - (\delta_K + n)k_t \quad \& \quad \dot{h}_t = B(1-u)h_t - (\delta_H + n)h_t$$

[2.4.4.8] [2.4.4.9]

Construyendo el hamiltoniano, obteniendo las condiciones de primer orden, y operando en ellas, se obtiene la tasa de crecimiento del consumo

$$\gamma_C = \frac{\dot{c}_t}{c_t} = \alpha Ak_t^{\alpha-1} (u h_t)^{1-\alpha} - (\delta + \rho) \quad [2.4.4.10]$$

El motor de crecimiento vuelve a ser el capital, tanto humano como físico, ya que el crecimiento del consumo depende de la productividad marginal del capital físico y del capital humano. En el estado estacionario todas las variables van a crecer a un ritmo constante y a través de operaciones llegamos a la conclusión de que todas las tasas de crecimiento de las variables en el estado estacionario son iguales. Además, podemos obtener la expresión de crecimiento del consumo en el estado estacionario, que depende del parámetro tecnológico de la función de acumulación del capital humano:

$$\gamma_C^* = \gamma_h^* = \gamma_k^* = \gamma_y^* = \frac{1}{\theta} (B - \delta - \rho) \quad [2.4.4.11]$$

3. MEDIO AMBIENTE

3.1. Importancia

Comenzaremos explicando la diferencia entre tres conceptos que tienen distinto significado e implicaciones, pero que frecuentemente son usados indistintamente a causa del desconocimiento y la generalización a la que son dados los medios de comunicación o las conversaciones cotidianas. Estos tres términos son efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático.

El Efecto Invernadero es un mecanismo que ha existido desde que se formó la atmósfera en la Tierra y que, sin el cual, la atmósfera terrestre no se calentaría. Este sistema permite que la luz solar la caliente gracias a un pequeño porcentaje de CO₂ sin el cual tendríamos una temperatura media global cercana a -15°C en lugar de los 15 °C que componen la temperatura media del planeta. Por lo tanto, a mayor porcentaje de gases de invernadero como el CO₂, mayor será la temperatura global del planeta.

El Calentamiento Global consiste en el incremento de la temperatura global del planeta durante los últimos 150 años a causa de la intensificación del efecto invernadero. Este fenómeno se produce por causas naturales y humanas, pudiendo atribuirse una mayor proporción al ser humano, en particular a causa de la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo y la tala de bosques.

Por último, el término Cambio Climático engloba al fenómeno anterior e incluye a todas las variaciones del clima que se han ido produciendo a lo largo de la historia del planeta (4,000 millones de años) y que están asociadas a factores como cambios en la actividad solar, en la circulación oceánica, en la actividad volcánica o geológica, en la composición de la atmósfera, etc.

El clima terrestre ha oscilado entre momentos extremadamente fríos (conocidos como glaciaciones) y momentos calurosos, como es el actual (conocidos como interglaciares) y cuyo estudio nos abre las puertas al entendimiento del Calentamiento Global.

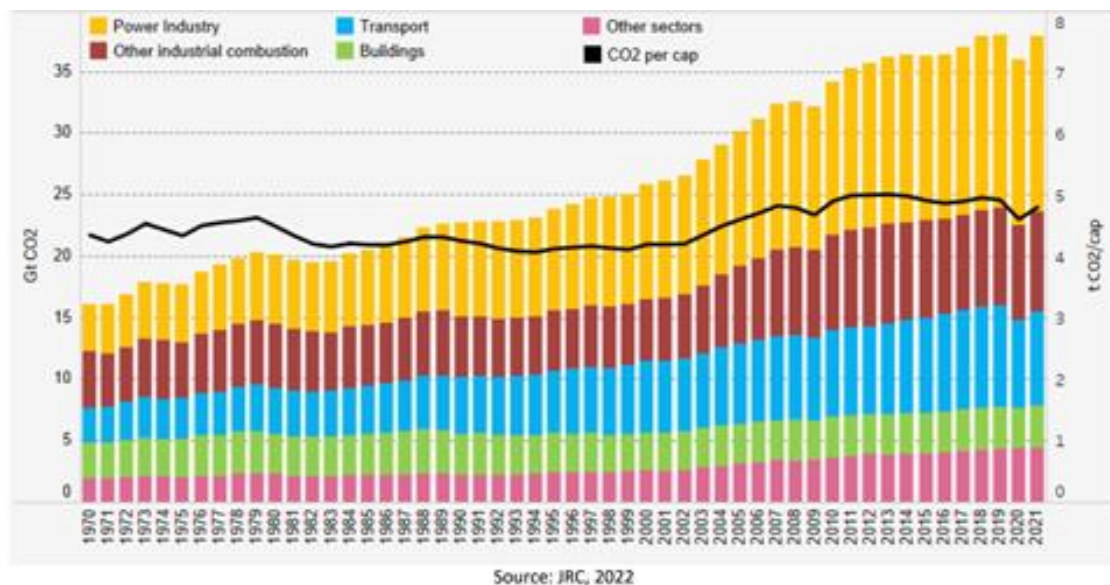
3.2. Datos emisiones CO₂

Las emisiones de gases de efecto invernadero alcanzan nuevos máximos mientras que los impactos climáticos se intensifican. El Informe sobre la Brecha de Emisiones 2023 sostiene que el aumento de la temperatura terrestre estará muy por encima de los

objetivos del acuerdo de París a no ser que los países cumplan con objetivos más ambiciosos de los prometidos.

En la Figura 3.2.1. podemos observar la evolución experimentada por parte de las emisiones mundiales de CO₂ fósil durante el periodo 1970-2021, según las estimaciones de AIE-EDGAR CO₂, así como las tendencias de las emisiones de los principales sectores de actividad.

Figure 3.2.1. Global fossil CO₂ emissions by sector (left axis) and per capita (right axis), 1970-2021 (in Gt)



En el año 2020 se produjo una disminución de un 5,3% en las emisiones mundiales de CO₂ fósil respecto al año 2019. Sin embargo, en 2021 estas emisiones repuntaron prácticamente alcanzando el nivel del año 2019 (año anterior a la pandemia de COVID), alcanzando 37,9 Gigatoneladas (un 0,36% menos que en 2019).

Esta gran caída producida en el año 2020 como consecuencia de la pandemia trajo a posteriori un aumento en las emisiones mundiales de CO₂ fósil procedentes del sector del transporte, aumentando a 7,6 Gigatoneladas en 2021.

Las emisiones mundiales de CO₂ fósil per cápita del año 2021 volvieron al mismo nivel que tenían en el año 2008 (4,81 t CO₂/cap), con un aumento global de alrededor del 13% entre los años 1990 y 2021.

3.3. Causas y consecuencias de la acción humana

La relación existente entre crecimiento económico y presiones ambientales se analiza en el estudio realizado por Kuznets que dio origen a la conocida como hipótesis de la "Curva de Kuznets Ambiental" o relación en "forma de U invertida" entre presión ambiental y renta per cápita. Esta hipótesis sostiene que, a partir de un determinado nivel de renta, un mayor crecimiento económico iría acompañado de mejoras en la calidad ambiental. Sin embargo, los resultados empíricos muestran que esta hipótesis no es correcta. Al menos es así para la mayor parte de los contaminantes. Es posible que sea correcta para aquellos contaminantes con efectos locales y a corto plazo, (como puede ser el SO₂). Sin embargo, en el caso de contaminantes con efectos más globales, a largo plazo y cuya reducción es más complicada (como el CO₂), la presión ambiental aumentaría con el nivel de renta.

Lo que es indiscutible es que la especie humana genera un gran impacto negativo sobre el medio ambiente, el cual lleva años experimentando un crecimiento exponencial, iniciado con la Primera Revolución Industrial.

Las formas en las que la acción humana puede alterar el medio ambiente son muy diversas, encontrándose entre ellas el uso que le da como vertedero de residuos o la extracción de materia primas para la fabricación de productos para el consumo.

Este crecimiento exponencial presenta una correlación con el concepto de "Consumismo"¹, ya que en cada una de las fases del ciclo de consumo se producen desechos que van al ambiente o se altera la estructura de los ecosistemas naturales.

Cuando el ser humano realiza un consumo de subsistencia, el impacto es mínimo. Sin embargo, en la sociedad en la que vivimos predomina la cultura de la inmediatez o McDonalización² que nos lleva a la adquisición de bienes y servicios que no necesitamos.

3.4. Políticas frente al cambio climático

La Unión Europea ha fijado unos ambiciosos objetivos con relación al cambio climático a través del European Green Deal y la Ley Europea del Clima. El objetivo es la reducción

¹ Consumismo: tendencia inmoderada a adquirir, gastar o consumir bienes, no siempre necesarios.

² McDonalización: G. Ritzer define el concepto de "McDonalización" en su libro "The McDonalization of Society" como el proceso mediante el cual las características de la cadena de restaurantes de comida rápida McDonald's se extienden a otros aspectos de la sociedad y la cultura.

de sus emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55% para el año 2030 y lograr la neutralidad climática para el 2050. Para ello se han llevado a cabo propuestas legislativas, como el "Paquete Fit for 55".

Además, los países integrantes del Acuerdo de París se encuentran obligados a preparar contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) para reducir las emisiones. Se requiere que todos informen sobre sus niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y el progreso hacia el cumplimiento de sus NDCs en informes de transparencia bianuales (BTRs).

La Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR) de la Comisión Europea elabora estimaciones comparables de emisiones ayudando a completar los inventarios nacionales.

A pesar de que las emisiones de CO₂ de la UE27 según EDGAR puedan diferir de los inventarios nacionales oficiales a causa de diferencias en fuentes de datos y metodologías, ambas están basadas en las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Aunque haya algunas discrepancias, la tendencia general de reducción de emisiones de CO₂ de la UE27 es similar a la informada a la UNFCCC.

Dentro del marco español tenemos "El Sistema Español de Inventario y Proyecciones de Emisiones a la Atmósfera", elaborado anualmente. Se trata de una herramienta fundamental en nuestra estrategia para combatir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes atmosféricos.

A través de este sistema se elabora el Inventario Nacional de emisiones y absorciones de GEI y contaminantes atmosféricos, así como las Proyecciones de emisiones, que son necesarios para la evaluación del cumplimiento de los compromisos internacionales y europeos de España en materia de emisiones, así como base para el desarrollo de políticas de mitigación y evaluación de su efectividad.

El marco normativo del Sistema Español de Inventario se establece en la Ley 34/2007 de calidad del aire y protección de la atmósfera, y su funcionamiento está detallado en el Real Decreto 818/2018.

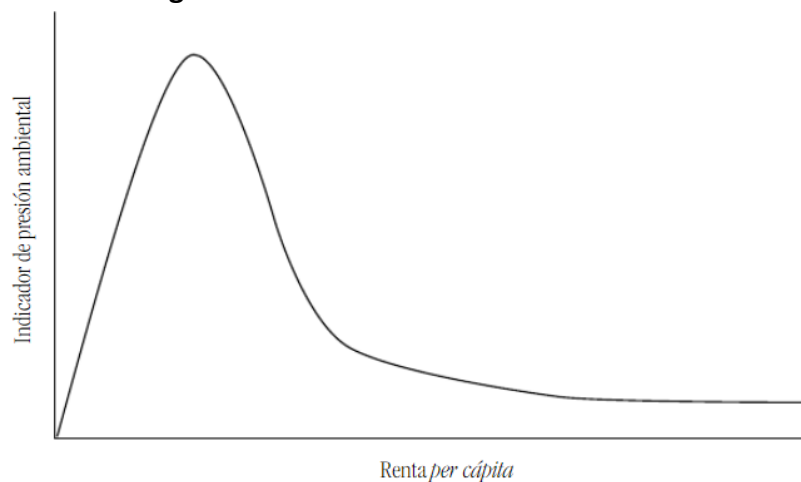
España es uno de los países que se ha comprometido a informar sobre las emisiones de GEI según lo establecido en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Acuerdo de París, así como en regulaciones europeas como el Reglamento (UE) 2018/1999.

4. MEDIO AMBIENTE Y ECONOMÍA

4.1. Curva Kuznets medioambiental

En la década de los 90, basándose en los trabajos de Grossman y Krueger (1991), Shafik y Bandyopadhyay (1992) y Panayotou (1993), la relación entre crecimiento económico y medio ambiente llevó al análisis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA), uno de los temas más estudiado en el campo de la economía ambiental. Los estudios empíricos tratan de defender la hipótesis, a través de modelos econométricos, de que, entre la renta y el indicador de degradación medioambiental elegido, hay una relación funcional con forma de U invertida en el largo plazo, como podemos apreciar en la figura 4.1.1.

Figura 4.1.1. Curva de Kuznets ambiental



Fuente: Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España

Esto significa que el deterioro ambiental es una función creciente del nivel de actividad económica hasta un determinado nivel crítico de renta o “*turning point*” a partir del cual un mayor nivel de renta se asocia a niveles progresivamente mayores de calidad ambiental. Una vez encontrada la relación en forma de U invertida, hay que calcular ese punto crítico, es decir, el nivel de renta per cápita en el que la curva alcanza su máximo (y donde un cambio marginal en el indicador medioambiental es cero).

El modelo básico que relaciona el crecimiento económico y la contaminación utiliza datos agrupados entre países y de series temporales. Se trata de un modelo econométrico que presenta la siguiente ecuación, recogida por Ekins (1997):

$$f(E_{it}) = \alpha_0 + \alpha_1 g_1(Y_{it}) + \alpha_2 g_2(Y_{it}^2) + \alpha_3 g_3(Y_{it}^3) + \alpha_4 g_4(Y_{it-a}^n) - \beta B + \gamma t + \varepsilon_{it}$$

E_{it} es un indicador medioambiental para el país i en el momento t ; α , β , γ son los parámetros por estimar; Y_{it} es la renta per cápita del país i en el momento t , con Y_{it-a}^n un polinomio de la renta retardada, B es un vector de otras variables explicativas que posiblemente incluya variables ficticias para capturar la influencia específica de la demografía, la geografía o años concretos; y por último ε es la perturbación aleatoria.

Hay diferentes argumentos sobre los que se apoya esta idea. Para empezar, consideran la elasticidad ingreso de la demanda de calidad ambiental como un factor determinante para cambiar la pendiente de la relación entre degradación ambiental y producto. Esto se cumple debido a que en los países más desarrollados donde las necesidades básicas están cubiertas, las sociedades demandan mejoras ambientales (donde la calidad ambiental pasa a considerarse un bien de lujo) que suponen cambios en el marco institucional a través de políticas de concienciación y cuidado del medioambiente y que son más fáciles de conseguir gracias a las mejores tecnologías que tiene estas economías. Mientras que, en aquellos países menos desarrollados, el nivel de renta no es lo suficientemente alto y el nivel de contaminación es creciente. Además, en las economías desarrolladas se producen cambios a nivel estructural, pasando de economías industriales a economías más intensivas en el sector servicios, que ejercen menos presión medioambiental. También existen otros factores como el comercio entre naciones y la celebración de acuerdos internacionales sobre medio ambiente que contribuyen a que se produzca ese punto de inflexión que invierte la curva.

La conclusión a la que nos lleva la hipótesis sobre la CKA es que la producción es tanto causa como solución del problema ambiental, es decir, son las economías las que, a través de su crecimiento y desarrollo, alcanzan el punto crítico.

Esto es a nivel teórico ya que, en la realidad las economías desarrolladas se enfrentan a situaciones en las que parte de la población no tiene cubiertas las necesidades básicas, hay una elevada desigualdad en la distribución de la renta y una clara debilidad institucional. Esto lleva a que estas economías no sean capaces de alcanzar el "turning point" y persistan en sus problemas medioambientales.

Muchos autores han tratado de demostrar la forma de la curva, como la obtenida por Cole et al (1997) en forma de U para los residuos urbanos, que resulta ser una relación

creciente entre el indicador medioambiental y el PIB per cápita en la muestra; o la curva con forma de N invertida obtenida por Panayotou (1997) para las concentraciones de SO₂ o la de Moomaw y Unruh (1997) para las emisiones de CO₂.

La hipótesis inicial sobre la CKA se cumple en la mayoría de los contaminantes atmosféricos estudiados excepto para el CO₂ y el CH₄, y para el DBO y DQO en los casos de contaminantes del agua. Aunque hay que tener en cuenta que hay autores que desechan la forma de N sin ofrecer ningún tipo de explicación.

Una principal conclusión es que para los contaminantes con efectos locales o directos la hipótesis se cumple ya que suelen ser más rápidamente intervenidos políticamente. Y para los contaminantes con impacto medioambiental global o indirecto, o aumentan con la renta o presentan elevados PC con grandes errores estándar debido a que no suelen formularse políticas que los controlen de manera efectiva.

4.2. Regulación medioambiental y competitividad: la hipótesis de Porter

Según Porter y Van der Linde (1995), basándose en un estudio sobre ingreso-coste de empresas en EEUU, la reducción de la contaminación lleva a un aumento de la productividad en el largo plazo ya que la contaminación suele ir de la mano de usos inadecuados de recursos y formas productivas ineficientes. Por lo tanto, la ejecución de políticas medioambientales fomenta la innovación, de forma que quedan compensados el incremento en los costes a costa de unas políticas más estrictas con la disminución de los mismos gracias a mejoras tecnológicas. Esto se conoce como la Hipótesis de Porter.

El impacto que tienen las regulaciones medioambientales en la política de innovación de las empresas se calcula mediante la inversión en I + D, en capital y nuevas tecnologías, y en las aplicaciones con éxito de patentes. Siguiendo esta teoría, tanto Jaffe y Palmer (1997) (demostraron que un aumento de un 0,15% en gastos de I + D se correspondía con un 1% del aumento en el coste derivado de la reducción de la contaminación), como Brunnermeier y Cohen (2003) hallaron una relación positiva pero débil. Sin embargo, autores como el de Gollop y Robert (1983) (calcularon que las regulaciones relativas a los índices de SO₂ aminoraron el crecimiento de la productividad en los Estados Unidos en un 43% durante la década de los setenta) subrayan un impacto negativo. Aunque en general se rechace la hipótesis de Porter, no se ha llegado a una conclusión clara.

5. MODELOS DE CRECIMIENTO ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTE

Los recursos naturales tienden a ser olvidados a la hora de estudiar el crecimiento económico. Su análisis se basa en la explotación de estos y en conseguir una economía sostenible, bajo la premisa de la existencia de capital natural suficiente para producir. Los dos elementos más importantes son la presencia de contaminación y el papel del reciclaje en la reversión de la contaminación.

5.1. Modelo verde de Solow. Versión 1

El modelo de Solow-Swan plantea que el crecimiento económico no solo es función del trabajo y el capital, sino también de la materia prima (MP) que será transformada por medio del proceso productivo hasta obtener el bien final, el cual puede ser consumido o invertido, es decir, el modelo asume la preexistencia de la contaminación.

Para poder llevar el modelo de Solow hacia un modelo “verde”, planteamos la siguiente función de producción:

$$Y = F(L, K, MP) \quad [5.1.1]$$

La Materia Prima se compone de Materia virgen y Materia reciclada:

$$MP = MV + MR \quad [5.1.2]$$

Pudiendo expresarse en términos per cápita: $mp = mv + mr$ [5.1.3]

Para el caso de un función de producción Cobb-Douglas, la función es la siguiente:

$$y = Ak^\beta \quad [5.1.4]$$

$$\text{Con } A = mp^\gamma \quad [5.1.5]$$

La MP podría considerarse una constante, pero a nosotros nos interesa estudiar su dinámica. Vamos hacerlo en primer lugar considerando que no se recicla nada, es decir, $MR = 0$ y $MP = MV$. En este modelo se considera que la MV crece de manera natural en la economía, pero decrece a medida que se usa en los procesos productivos, luego:

$$\dot{M}V = (m - d)MV \quad [5.1.6]$$

Siendo m la tasa de crecimiento de los recursos naturales y d la tasa de decrecimiento consecuencia del uso de los mismos en los procesos productivos. En términos per cápita:

$$mv = \frac{MV}{L} = \frac{Ae^{(m-d)t}}{L_0 e^{nt}} = \frac{A}{L_0} e^{(m-d-n)t} \quad [5.1.7]$$

Tomando logaritmos y derivando respecto al tiempo:

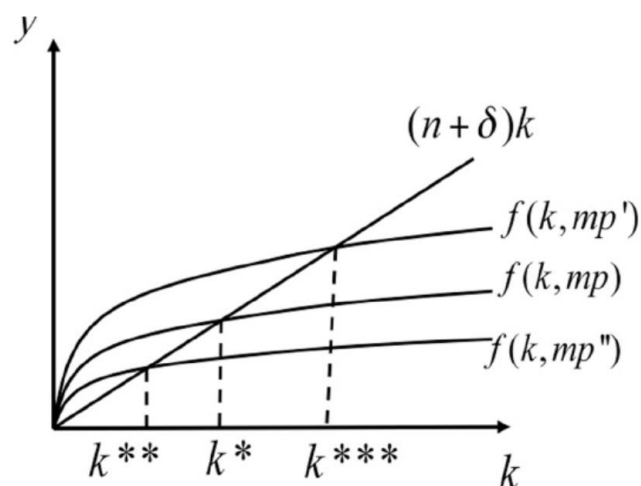
$$miv = (m - d - n)mv \quad [5.1.8]$$

Conclusiones:

- $m = d + n$; la tasa de reposición de la naturaleza debe ser igual a la tasa que se utiliza más la tasa de crecimiento poblacional para estar en equilibrio y obtener el modelo de Solow ya estudiado.
- $m > d + n$; en este caso la materia prima per cápita crece de forma indefinida.
- $m < d + n$; la materia prima per cápita decrece exponencialmente.

Como podemos observar en la Figura 5.1.1., a mayor mp , mayor producción se puede obtener para un mismo nivel de capital (el capital de equilibrio también aumenta con mp). De hecho si $mp = 0$, el producto total también sería cero lo que demuestra la importancia de producir con una tasa de explotación que permita a la naturaleza regenerarse para seguir obteniendo producto a largo plazo.

Figura 5.1.1. Dinámica de la MP



Fuente: ensayo Darío Ibarra Zavala

Como la MR es un porcentaje de la contaminación recuperada e incorporada en el proceso productivo, podemos deducir que su incorporación al modelo deriva en un mayor capital y producto en el EE. Vamos a estudiar su dinámica.

Asumimos que la contaminación (P) es resultado de la producción y por tanto un porcentaje del producto final:

$$P = G(Y) = uF(L, K, MP) \quad [5.1.9]$$

Caracterizada la contaminación, se define la MR como la parte de la materia contaminante rescatada e incorporada en el proceso productivo. De este modo:

$$MR = aP = aG(Y) = auF(L, K, MP) \quad [5.1.10]$$

Con a siendo la tasa a la que la naturaleza absorbe la contaminación. Ahora lo transformamos a términos per cápita y lo incorporamos a la ecuación 5.1.3, para realizar la inferencia correspondiente obteniendo:

$$mp = \frac{Ae^{(m-d-n)t}}{L_0} + mr \quad [5.1.11]$$

De forma que hay una mayor cantidad de materia en la economía disponible para la producción, y por tanto, un mayor nivel de capital en el EE.

Ahora vamos a estudiar el comportamiento de la contaminación³. Como ya sabemos la naturaleza es capaz de absorber parte de la contaminación. Además la MR deja de ser contaminación, luego su tasa de variación es la siguiente:

$$\dot{P} = uF(L, K, MP) - aP - MP = uF(L, K, MP) - aP - auF(L, K, MP) \quad [5.1.13]$$

$$\dot{P} = u(1 - a)F(L, K, MP) - aP \quad [5.1.14]$$

Operando, en términos per capita:

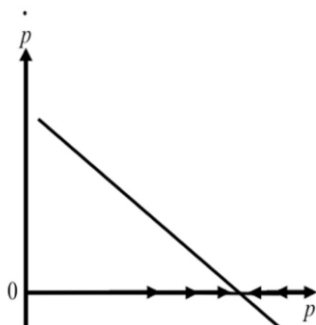
³ Analizando la dinámica de la contaminación, en mi opinión podría ser que haya un error en el planteamiento de las ecuaciones: en la figura 5.1.13 está restando dos veces la MR ya que $aP = auF(L, K, MP) = MR$, además tampoco tendría sentido restarle la MP.

$$\dot{p} = \frac{uF(L,K,MP)-aP}{L} - nP = u(1-a)f(k,mp) - (a+n)p \quad [5.1.15]$$

A partir de esta ecuación podemos extraer la conclusión de que en el largo plazo el nivel de contaminación será estable, suponiendo que $a > 0$ y $n > 0$, ya que:

$$\frac{\delta \dot{p}}{\delta p} = -(a+n) < 0 \quad [5.1.16]$$

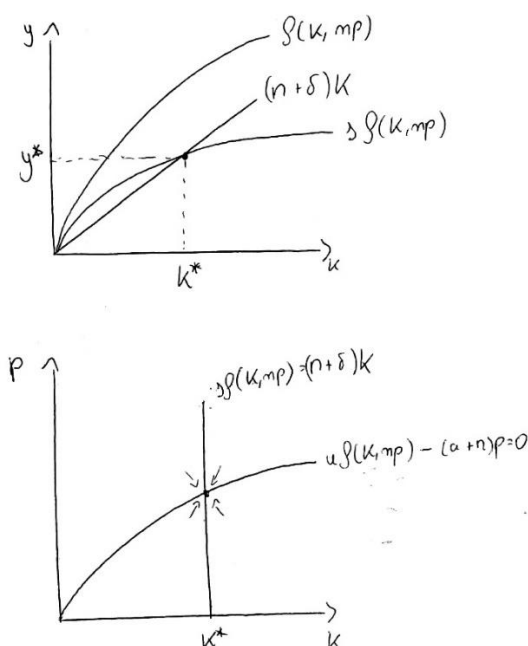
Figura 5.1.2. Dinámica de la contaminación



Fuente: ensayo Darío Ibarra Zavala

Se llegará al EE cuando ambas tasas de variación (\dot{k} y \dot{p}) sean cero a la vez como podemos observar en la Figura 5.1.3., y además se trata de un equilibrio estable.

Figura 5.1.3. EE de la contaminación y el capital



Fuente: ensayo Darío Ibarra Zavala

5.2. Modelo verde de Solow. Versión 2

La relación básica entre la contaminación ambiental y el crecimiento económico se puede establecer por la siguiente relación:

$$E_t = T_t Y_t^\gamma N_t^{1-\gamma} \quad [5.2.1]$$

Donde E_t representa la emisión contaminación ambiental, T_t es la contaminación media (cte.), Y_t es la producción de la economía y N_t es la población. Tras unas simples operaciones podemos obtener esta ecuación en términos per cápita:

$$e_t = T_t y_t^\gamma \quad [5.2.2]$$

Aplicando logaritmos y diferenciando con respecto al tiempo obtenemos la elasticidad de la contaminación ambiental-crecimiento económico:

$$\frac{\delta e}{e} = \frac{1}{T} \delta T + \gamma \delta y \quad [5.2.3]$$

A partir de esta ecuación podemos definir la relación cuadrática entre el crecimiento económico y la contaminación ambiental, llamada ecuación de Kuznets:

$$\frac{\delta e}{e} = \frac{1}{T} \delta T + \gamma_1 \frac{\delta y}{y} + \gamma_2 \left(\frac{\delta y}{y} \right)^2 \quad [5.2.4]$$

Esta ecuación nos permite distinguir dos efectos:

- $\gamma_1 > 0$: el crecimiento económico en su término lineal afecta positivamente a la contaminación ambiental.
- $\gamma_2 < 0$: cuando se alcanza un cierto nivel de crecimiento económico, la relación se vuelve negativa.

Las expresiones anteriores se pueden vincular con el modelo Solow-Swan sustituyendo la tasa de crecimiento estacionario del producto per cápita:

$$\left[\frac{\dot{y}_t}{y_t} = \frac{1}{1-\alpha} \frac{\dot{A}_t}{A_t} + \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{\dot{s}_t}{s_t} - \frac{\alpha}{1-\alpha} \left(\frac{n_t + \delta_t}{n_t + \delta_t} \right) \right] \quad [5.2.5]$$

en la primera ecuación y combinándola con el crecimiento natural de la contaminación per cápita (g_e) como una constante dado el cambio tecnológico

$$\left[g_e = \gamma \left(\frac{1}{1-\alpha} \right) \frac{\delta A}{A} + \gamma \frac{\delta q}{q} \right] \quad [5.2.6],$$

acabaríamos obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{\dot{e}_t}{e_t} = g_e + \varphi_1 \frac{\dot{s}_t}{s_t} + \varphi_2 \left(\frac{n_t + \dot{\delta}_t}{n_t + \delta_t} \right) \quad [5.2.7]$$

Podemos observar que el cambio en la contaminación ambiental está en función del cambio porcentual en el nivel de ahorro en la economía y en función del cambio porcentual en la depreciación y el crecimiento en la población.

Se entiende que $\varphi_1 > 0$ ya que el nivel de ahorro se canaliza hacia la inversión y tiene un efecto positivo sobre el crecimiento económico. Mientras que $\varphi_2 < 0$ ya que un aumento en la tasa de depreciación o crecimiento en la población disminuye el crecimiento económico por tanto la relación es inversa con la contaminación ambiental.

5.3. Modelo de Ramsey con contaminación

En el modelo de Ramsey con contaminación, al igual que en el original, existen agentes maximizadores que toman sus decisiones de inversión y consumo de forma óptima.

Esto significa que los hogares van a maximizar su función de utilidad intertemporal y las empresas sus beneficios.

Vamos a definir una serie de supuestos:

- La función de utilidad del consumo de los hogares es creciente y cóncava $\left[\lim_{c \rightarrow \infty} U_c(c, P) = 0 \right]$. Además, es decreciente y convexa respecto al stock de contaminación
- $n = g = 0$; esto significa que no existe crecimiento de la población ni cambio tecnológico.
- Los consumidores van a considerar el nivel de contaminación constante cuando tengan que elegir su nivel de consumo al maximizar su función de utilidad.

$$\max \int_0^{\infty} e^{-\rho t} U(c, P) dt \quad [5.3.1]$$

Nuestra restricción presupuestaria intertemporal es la siguiente:

$$\int_0^{\infty} e^{-R(t)} c(t) dt = k(0) + \int_0^{\infty} e^{-R(t)} w(t) dt \quad [5.3.2]$$

Donde $k(0)$ es el capital inicial, el factor de descuento es $e^{-R(t)}$, $R(t) = \int_{\tau=0}^t r(\tau) d\tau$, siendo $r(\tau)$ la tasa de interés real en τ .

Ahora que tenemos la función a maximizar y la restricción presupuestaria, podemos plantear el Hamiltoniano, obteniendo las CPO $e^{-\rho t} U_c(c, P) = \lambda e^{-R(t)}$, donde λ es el multiplicador de Lagrange asociado a la restricción.

Si aplicamos logaritmos y derivamos esta ecuación, obtenemos la tasa de crecimiento del consumo de las familias:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\eta} \left[r - \rho + \frac{U_{cP}}{U_c} \dot{P} \right], \eta = -\frac{U_{cc}}{U_c} c \quad [5.3.3]$$

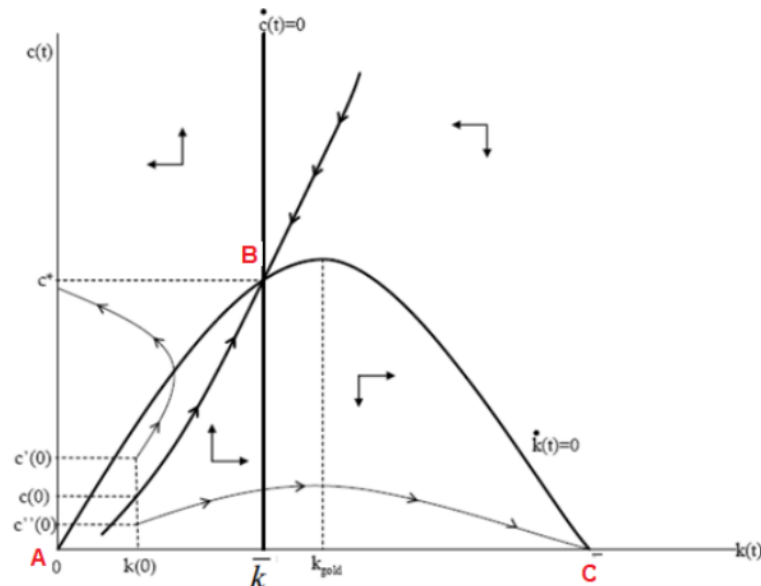
Como queremos obtener la solución de mercado, sustituimos en esta ecuación la hipótesis de maximización de beneficios en situación de competencia perfecta $y'(k) = r + \delta$, obteniendo la siguiente solución de mercado:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\eta} \left[y'(k) - \rho - \delta + \frac{U_{cP}}{U_c} \dot{P} \right] [5.3.4]$$

$$\dot{k} = y(k) - c - \delta k \quad [5.3.5]$$

Tras este análisis podemos observar que la solución de mercado y de familias productoras es la misma, al igual que ocurría en el modelo original de Ramsey-Cass-Koopmans (sin contaminación), como se aprecia en la Figura 5.3.1.

Figura 5.3.1. Dinámica de transición del modelo de Ramsey-Cass-Koopmans



Fuente: Apuntes de crecimiento económico, Sala-i-Martin (2000).

Si analizamos la ecuación que hemos obtenido [5.3.4], podemos observar que $U_{cP} < 0$, luego un incremento de la contaminación hará que la tasa de crecimiento del consumo disminuya. Sin embargo, si consideramos que la función de utilidad es separable en consumo y contaminación, $U_{cP} = 0$, la tasa de crecimiento del consumo no se verá afectada por cambios en el nivel de contaminación.

Además, en el EE $\dot{c} = \dot{k} = \dot{P} = 0$, luego presenta las mismas características que en el modelo sin contaminación.

Sin embargo, en el caso del planificador, el resultado que se obtiene en el modelo con contaminación no coincide con el modelo original. El planificador social va a tratar de elegir una trayectoria óptima para el consumo con el objetivo de maximizar la utilidad de la sociedad, estando sujeto a las restricciones físicas, representadas por las ecuaciones [5.3.5] y [5.3.3]. Cuando introducimos contaminación en el modelo, llegamos a soluciones diferentes:

Al introducirse el problema medioambiental, las soluciones a las que se llegan son diferentes. Este es el Hamiltoniano que se forma:

$$H = U(c, P) + q(y(k) - c - \delta k) + \lambda(\phi y(k) - mP) \quad [5.3.6]$$

Obtenemos ahora las CPO:

$$U_c(c, P) = q \quad [5.3.7]$$

$$\dot{q} = (\rho + \delta - y'(k))q - \lambda\phi y'(k) \quad [5.3.8]$$

$$\dot{\lambda} = (\rho + m)\lambda - U_P(c, P) \quad [5.3.9]$$

Tomando logaritmos, derivando con respecto al tiempo e introduciendo [5.3.9] en [5.3.8] podemos obtener la tasa de crecimiento del consumo del planificador social:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\eta} \left[y'(k) \left(1 + \frac{\lambda\phi}{U_c(c,P)} \right) - \rho - \delta + \frac{U_{cP}}{U_c} \dot{P} \right] \quad [5.3.10]$$

Para comparar entre el problema del planificador y el de mercados, hay que suponer que la función de utilidad del consumidor es separable en consumo y contaminación ($U_{cP} = 0$), lo cual nos simplifica el análisis reduciendo la expresión a:

$$\frac{\dot{c}_t}{c_t} = \frac{1}{\eta} \left[y'(k) \left(1 + \frac{\lambda\phi}{U_c(c,P)} \right) - \rho - \delta \right] \quad [5.3.11]$$

Si comparamos [5.3.4] y [5.3.11] vemos que son diferentes como ya esperábamos.

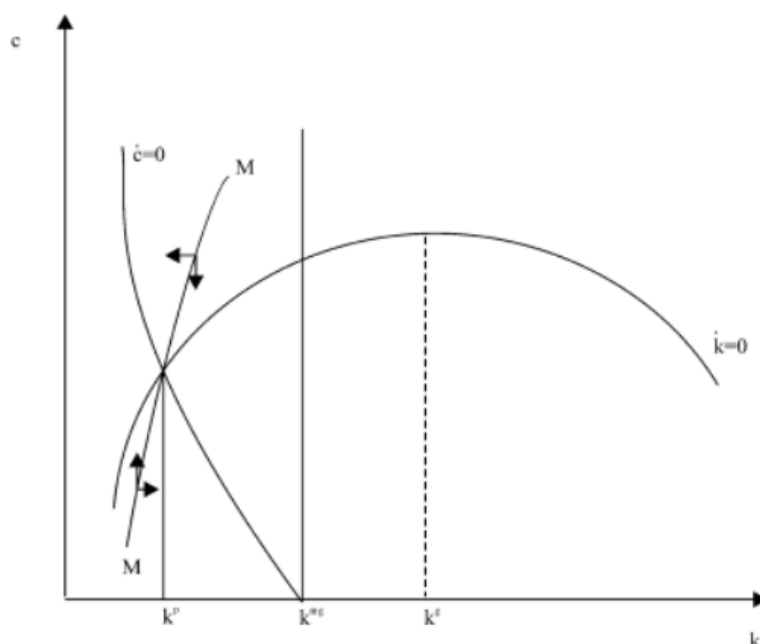
En la Figura 5.3.1. perteneciente a la solución de mercados, el capital óptimo $k^{mg} = k^*$ se alcanza en $\dot{c} = 0$, cuando este es una línea vertical, al igual que ocurre en el modelo original. Sin embargo, en el escenario del planificador el capital de equilibrio (k^p) se encuentra más a la izquierda, también con $\dot{c} = 0$, adoptando ahora una forma de curva con pendiente negativa.

Obtenemos una nueva senda de equilibrio marcada por M, donde el punto de equilibrio estable viene dado por la intersección entre $\dot{c} = 0$ y $\dot{k} = 0$, con un stock de capital k^p .

Esto significa que el stock de capital en EE y el stock de contaminación en equilibrio, son menores en el óptimo social (escenario del planificador) que en el modelo de mercado. Esto está justificado principalmente por razones ambientales, ya que con el fin de reducir los niveles de contaminación se reduce el capital, y por tanto se reduce el consumo.

Por tanto, podemos concluir que en el modelo de Ramsey con contaminación los daños ambientales afectan a los niveles de EE de las variables.

Figura 5.3.2. Dinámica de transición del modelo de Ramsey-Cass-Koopmans con contaminación



Fuente: *Economic growth and the environment*, Xepapadeas, A. (2005)

5.4. Otras modelizaciones

En la mayoría de modelos de crecimiento económico se asume que los recursos naturales son abundantes y no se agotan. Ejemplo de ello son autores como Sala-i-Barro y Sala-i-Martin (1995) que dejan de lado los recursos naturales y el medio ambiente.

Foley y Michl (1999) se puede considerar una aproximación a modelos de crecimiento económico con medio ambiente. En ellos utilizan el enfoque clásico partiendo de las premisas de Smith y Ricardo (1967) elaborando modelos con resultados similares a los de Solow (1956) y Ramsey (1928). En particular, el modelo ricardiano plantea el tema de la tierra como un factor productivo escaso, lo cual es un caso general del crecimiento con recursos agotables. En este modelo se propone que según se agotan los recursos, el precio de los mismos irá aumentando hasta que sea rentable el uso de otras tecnologías.

Solow (1986) es otro autor que critica los modelos de crecimiento económico por no tomar en cuenta los recursos naturales y defiende que los modelos de generaciones solapadas son la mejor opción para estudiarlo, estableciendo que las utilidades de las generaciones futuras deben ser, al menos, iguales a las de la generación actual y que el capital natural debería mantenerse constante. Jouvét et al. (2000) afirma a Solow e introduce el altruismo intergeneracional, que se manifiesta cuando la contaminación alcanza niveles críticos, de forma que si se olvida a las generaciones futuras habrá un mayor consumo actual en detrimento del capital natural del futuro. Siguiendo con el tema del traspaso generacional, Howarth y Nogaard (1990) crearon un modelo de tres generaciones, enfatizando la necesidad de que los derechos de propiedad sobre los recursos naturales corresponden a la generación joven con el objetivo de que las generaciones de más edad no los agoten.

John y Pecchenino (1997) introducen que el problema de las externalidades ambientales no solo es intergeneracional, sino internacional, sugiriendo la creación de un organismo que integre ambos aspectos, el cual va a ser responsable de regular el uso de los recursos naturales y la emisión de contaminantes.

Otros modelos de crecimiento económico ecológico se centran en la equidad intergeneracional, los mercados incompletos y el altruismo (Doeleman y Sandler, 1998;

Krautkraemer y Batina, 1999); basándose en el modelo de generaciones traslapadas con diferentes variantes y supuestos.

Brock y Taylor (2004) desarrollaron el Modelo Ecológico de Solow (Green Solow Model) que incorpora los elementos contaminación, tecnología y costo de abatimiento de la contaminación, concluyendo que en el largo plazo el cambio tecnológico ayuda a erradicar la contaminación. Su aportación más importante es la integración de la contaminación al modelo de Solow, dando lugar a la Curva Ecológica de Kuznets. Dicha curva tiene forma de "U" invertida y muestra que para bajos niveles de producción, un país tiende a contaminar más hasta que llegue un punto en el que la tasa de contaminación disminuya.

Cada vez es más complicado realizar estudios acerca del crecimiento económico debido a la incorporación de nuevos elementos. Esto hace que muchos autores se centren en un factor dejando de lado el resto ya que cuantas más variables tiene el modelo, más complicado es de entender y desarrollar.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo hemos llevado a cabo un análisis exhaustivo para comprender la relación entre el crecimiento económico y la sostenibilidad medioambiental, así como para determinar cómo pueden influir las regulaciones políticas en materia medioambiental sobre la competitividad de las empresas y el crecimiento de los países. A continuación, presentamos las principales conclusiones extraídas de este análisis.

- Crecimiento Económico y Medioambiente:

La relación entre crecimiento económico y medioambiente ha sido objeto de muchos estudios, entre los que cabe destacar la hipótesis de la Curva de Kuznets Ambiental (CKA). Lo que sostiene esta hipótesis es que, a medida que las economías crecen, se produce un aumento inicial en la degradación medioambiental hasta alcanzar un punto de inflexión. A partir de este punto, el crecimiento económico viene acompañado de mejoras medioambientales. Esto ocurriría gracias a que las sociedades más ricas pueden permitirse invertir en tecnologías más limpias y en la implementación de políticas medioambientales efectivas, así como el hecho de que la no contaminación pasa a ser un bien de lujo demandado por sus ciudadanos.

Sin embargo, su validez no se puede generalizar para todos los contaminantes. Se ha comprobado empíricamente que, sí se cumple para contaminantes locales y directos, como son las emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y la contaminación del agua, debido a que pueden ser rápidamente abordados mediante políticas medioambientales de forma efectiva. No puede decirse lo mismo para aquellos contaminantes globales y más complejos, como son los gases de efecto invernadero, que requieren un enfoque a nivel internacional que complica abordarlos rápidamente.

- Regulación Medioambiental y Competitividad:

Para abordar este aspecto clave hemos examinado la Hipótesis de Porter, la cual sostiene que la regulación medioambiental no solo no perjudica la competitividad, sino que puede ser clave para el aumento de la productividad en el largo plazo. Esto ocurriría porque las empresas se van a ver incentivadas para el desarrollo de nuevas tecnologías

y procesos de producción más limpios y eficiente a través de la innovación y un uso más eficiente de los recursos disponibles.

Sin embargo, no se ha llegado a un resultado concluyente y esta hipótesis no ha sido universalmente aceptada. A pesar de ello, se ha evidenciado que mediante políticas medioambientales cuidadosamente diseñadas y correctamente implementadas se puede lograr estimular la innovación sin un detrimento de la competitividad empresarial. Algunos ejemplos podrían ser impuestos sobre la contaminación que incentiven la reducción de emisiones, subsidios para la investigación y desarrollo de tecnologías limpias y normativas que fomenten la eficiencia energética.

- Modelos de Crecimiento Económico y Medioambiente:

En este campo hemos comprobado que para la modelización del medio ambiente se pueden adaptar los modelos de crecimiento económico tradicional. Entre otros, tenemos el caso de uno de los modelos “verde” de Solow, en el que la introducción de la materia prima reciclada pone en evidencia la necesidad de aplicar políticas que promuevan el reciclaje y la sostenibilidad, ya que la sobreexplotación de los recursos naturales puede llevar a su agotamiento y por tanto a una caída en la producción.

No obstante, ha evidenciado también que no solo los recursos naturales pueden ser limitantes del crecimiento económico, sino que la Tierra como sumidero de desechos también cumple un papel muy importante, y se está viendo desbordada. Es por ello que la contaminación, los residuos liberados, la presión de la población y la disponibilidad de recursos naturales son limitantes para un crecimiento sostenible.

- Desigualdad y Desarrollo Sostenible:

Como es sabido, el crecimiento económico se basa en el ahorro (inversión) y el progreso tecnológico. Gracias al progreso y a los avances tecnológicos, se han logrado impresionantes mejoras en productividad y eficiencia, así como nuevas formas de crear capital. Sin embargo, a causa de los rápidos cambios sociales impulsados por el progreso

tecnológico, es posible que este no avance lo suficientemente rápido, se vea sobrepasado y acabe con la destrucción de las sociedades y economías de los países.

Se ha evidenciado que uno de los desafíos más significativos en el camino hacia el desarrollo sostenible es la desigualdad. Las economías en desarrollo presentan mayores dificultades para alcanzar el punto de inflexión de la CKA como consecuencia de su debilidad institucional y a la desigual distribución de la renta. Estas economías a menudo carecen de los recursos necesarios para implementar políticas medioambientales efectivas y para invertir en tecnologías limpias. Es por ello por lo que hay que poner el foco en solucionar estos desafíos y desigualdades para poder enfocarnos en un crecimiento sostenible en el tiempo.

En conclusión, es posible lograr sostenibilidad medioambiental y crecimiento económico ya que no son mutuamente excluyentes. Para lograrlo debemos invertir en innovación y eficiencia para prevenir la contaminación, antes de que se dé, mejorando el capital humano (educación) o a través de nuevas e innovadoras tecnologías. También se requieren regulaciones como impuestos verdes, subsidios, campañas de concienciación o cupos de contaminación.

BIBLIOGRAFÍA:

- Alfranca, O. (2009). Regulación ambiental e innovación. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Benegas, R. A., & Salas, J. (2015). Inversión, industrialización y crecimiento sustentable: un modelo de Solow y Swan "Verde" para Bolivia. Revista/Libro, 1-14. (El nombre de la revista o el libro debe ser especificado si está disponible)
- Bongers, A., & Torres, J. L. (2020). Factores determinantes del crecimiento económico: Una comparativa a nivel mundial. Universidad de Málaga.
- Borondo, C. (2018). Macroeconomía intermedia. Universidad de Valladolid.
- 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>
- Brunnermeier, S. B., & Cohen, M. A. (2003). Determinants of environmental innovation in US manufacturing industries. *Journal of Environmental Economics and Management*, 45(2), 278-293. [https://doi.org/10.1016/S0095-0696\(02\)00058-X](https://doi.org/10.1016/S0095-0696(02)00058-X)
- Caballero, M., et al. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la Tierra. *Revista Digital Universitaria*.
- Cass, D. (1965). Optimum growth in an aggregative model of capital accumulation. *Review of Economic Studies*, 32(3), 233-240. <https://doi.org/10.2307/2295827>
- Castillo, P. (2011). Política económica: Crecimiento económico, desarrollo económico, desarrollo sostenible. *Revista Internacional del Mundo Económico y del Derecho*, 3.
- CIIFEN. (2012). Efecto invernadero. http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=99&Itemid=342&lang=es
- DatosMacro. (s.f.). Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/>
- Doeleman, J. A., & Sandler, T. (1998). The intergenerational case of missing markets and missing voters. *Land Economics*, 74(1), 1-15. <https://doi.org/10.2307/3147209>
- Ekins, P. (1997). The Kuznets curve for the environment and economic growth: Examining the evidence. *Environment and Planning A*, 29(5), 805-830. <https://doi.org/10.1068/a290805>
- Foley, D. K., & Michl, T. (1999). Growth and distribution. Harvard University Press. <http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA43068735>
- Gollop, F. M., & Roberts, M. J. (1983). Environmental regulations and productivity growth: The case of fossil-fueled electric power generation. *Journal of Political Economy*, 91(4), 654-674. <https://doi.org/10.1086/261170>
- Grossman, G. M., & Krueger, A. B. (1995). Economic growth and the environment. *The Quarterly Journal of Economics*, 110(2), 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>
- Howarth, R. B., & Norgaard, R. B. (1990). Intergenerational resource rights, efficiency, and social optimality. *Land Economics*, 66(1), 1-11. <https://doi.org/10.2307/3146678>
- Jaffe, A. B., & Palmer, K. (1997). Environmental regulation and innovation: a panel data study. *The Review of Economics and Statistics*, 79(4), 610-619. <https://doi.org/10.1162/003465397557196>

- John, A., & Pecchenino, R. A. (1997). International and intergenerational environmental externalities. *The Scandinavian Journal of Economics*, 99(3), 371-387. <https://doi.org/10.1111/1467-9442.00069>
- Jouvét, P., et al. (2000). Intergenerational altruism and the environment. *The Scandinavian Journal of Economics*, 102(1), 135-150.
- Koopmans, T. C. (1965). On the concept of optimal economic growth. En J. Johansen (Ed.), *The econometric approach to development planning* (pp. 225-287). North Holland.
- Krautkraemer, J. A., & Batina, R. G. (1999). On sustainability and intergenerational transfers with a renewable resource. *Land Economics*, 75(2), 167-184. <https://doi.org/10.2307/3147004>
- Kuznets, S. (1955). Economic growth and income inequality. *The American Economic Review*, 45(1), 1-28.
- Lucas, R. E. (1988). On the mechanics of economic development. *Journal of Monetary Economics*, 22(1), 3-42. [https://doi.org/10.1016/0304-3932\(88\)90168-7](https://doi.org/10.1016/0304-3932(88)90168-7)
- Maddison Project Database 2020. (2022, 23 mayo). University of Groningen. <https://www.rug.nl/ggdc/historicaldevelopment/maddison/releases/maddison-project>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es.html>
- Muntean, M., et al. (2022). Fossil CO2 emissions of all world countries. JRC Science for Policy Report.
- Naciones Unidas. (2015). Acuerdos de París. <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/que-es-el-acuerdo-de-paris>
- Panayotou, T. (1993). Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development. ILO Working Papers. International Labour Organization.
- Panayotou, T., & Vincent, J. R. (1997). Regulación del medio ambiente y competitividad. <http://jefas.esan.edu.pe/index.php/jefas/article/view/101/92>
- Ramsey, F. P. (1928). A mathematical theory of saving. *The Economic Journal*, 38(152), 543-559. <https://doi.org/10.2307/2224098>
- Roca, J., & Padilla, R. (2003). Emisiones atmosféricas y crecimiento económico en España. *La Curva de Kuznets Ambiental y el Protocolo de Kyoto*. *Economía Industrial*.
- Romer, P. M. (1986). Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 94(5), 1002-1037. <https://doi.org/10.1086/261420>
- Shafik, N., & Bandyopadhyay, S. (1992). Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence.
- Solow, R. M. (1956). A contribution to the theory of economic growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 70(1), 65-94. <https://doi.org/10.2307/1884513>
- Solow, R. M. (1986). On the intergenerational allocation of natural resources. *The Scandinavian Journal of Economics*, 88(1), 141-149. <https://doi.org/10.2307/3440280>
- Suri, V., & Chapman, D. (1998). Economic growth, trade and energy: implications for the environmental Kuznets curve. *Ecological Economics*, 25(2), 195-208.

- United Nations Environment Programme. (2023). Emissions gap report 2023: Broken record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again). <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>
- Zavala, D. I. (2013). The Solow-Swan model of economic growth applied to pollution and its recycling. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 8-24. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322013000100002&lng=en
- Zilio, M. (2010). Curva de Kuznets ambiental: la validez de sus fundamentos en países en desarrollo. *Cuadernos de Economía*.