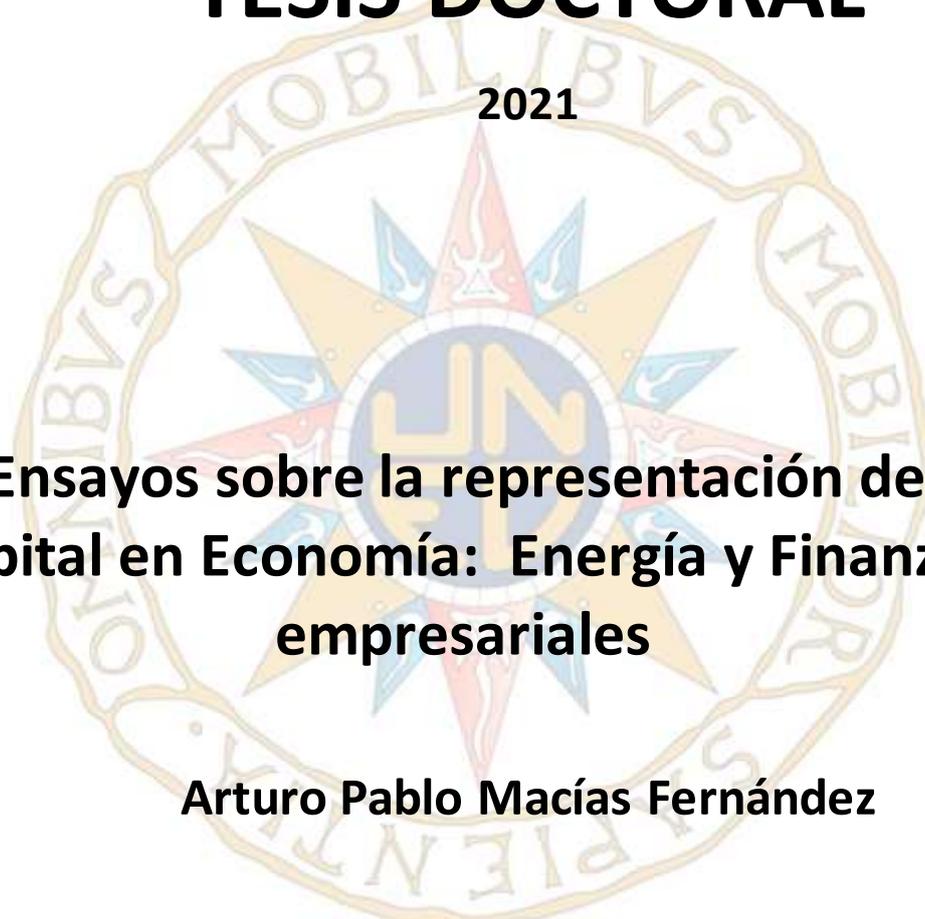


TESIS DOCTORAL

2021



Ensayos sobre la representación del capital en Economía: Energía y Finanzas empresariales

Arturo Pablo Macías Fernández

**PROGRAMA DE DOCTORADO
INTERUNIVERSITARIO EN ECONOMÍA (DECIDE)**

Directores

Mariano Matilla-García, Catedrático de Economía (UNED).

Marc Vorsatz, Catedrático de Economía (UNED).

Agradecimientos

Mi primer agradecimiento es para los directores de esta Tesis Doctoral, Mariano Matilla-García y Marc Vorsatz por el muchísimo tiempo, esfuerzo y talento que me han dedicado. El proceso ha sido largo e intermitente, y aun así siempre me he sentido acompañado.

Este trabajo es un producto de la UNED y del Programa de Doctorado Interuniversitario en Economía (DECIDE), dos instituciones que demuestran que la investigación puede trascender las distancias.

Al Banco de España le agradezco un ambiente laboral intelectualmente estimulante y lleno de compañerismo. En estos quince años de profesión he tenido el privilegio de afrontar muchos problemas interesantes en compañía de personas aún más interesantes.

En el ámbito personal, mi máximo agradecimiento es para mi esposa (Meritxell Pérez) y mis hijos (Joel, Sofía y Cloe), no solo por el tiempo material que inevitablemente les he dedicado de menos, sino también por las veces en que mi atención no estaba con ellos.

También quiero mencionar aquí a mis padres, Manuela y Arturo, y a mi familia extensa (especial mención merecen mi tía Inmaculada y su familia). Ellos me dieron una infancia feliz, despreocupada y abundante en libros.

Ensayos sobre la representación del capital en
Economía: Energía y Finanzas empresariales

Arturo Pablo Macías Fernández

e-mail: arturo.macias@bde.es

Índice general

1. Introducción: modelización económica y representación del capital	8
2. Análisis de rentabilidad energética en un modelo de crecimiento Ramsey-Hotelling	20
2.1. Introducción	20
2.2. Métodos	29
2.2.1. La calidad de los recursos, el agotamiento y la curva de auto-consumo de energía como una representación integral de los recursos energéticos.	36
2.2.2. Capital instalado en el sector energético: el vínculo entre el stock de reservas y la producción corriente	43
2.3. Resultados	45
2.4. Discusión	50
2.5. Conclusiones	59
3. Irrelevancia de la estructura de capital en el laboratorio	63

3.1. Introducción	63
3.2. Modelo	71
3.3. Diseño experimental y análisis de equilibrio	73
3.4. Resultados	78
3.5. Tratamiento Privado	87
3.6. Conclusiones	99
4. Conclusiones	103
A. Instrucciones para los participantes	111
A.1. Instrucciones generales	111
A.2. Descripción de la situación	112
A.3. Beneficios	113
A.4. Funcionamiento del Mercado	115

Índice de figuras

2.1. <i>Ley de la mena de los yacimientos de cobre en Australia y en el mundo. Fuente: Mudd, 2009</i>	37
2.2. <i>Precios reales (dólares de 1998) y producción primaria (excluido reciclaje) del cobre desde 1900. Fuente: US Geological Survey</i>	38
2.3. <i>Reservas probadas, producción anual y precio de los principales combustibles fósiles. Fuente: BP Statistical Review of World Energy</i>	40
2.4. <i>TRE del petróleo y el gas en los Estados Unidos. Fuente: Cleveland (2001).</i>	41
2.5. <i>Esquema de dos curvas de auto-consumo energético</i>	42
2.6. <i>Porcentaje de la fuerza de trabajo en el sector no energético, según auto-consumo energético para diferentes niveles del parámetro de sustitución (β)</i>	55
2.7. <i>Nivel de consumo del agente representativo, según auto-consumo energético para diferentes niveles del parámetro de sustitución (β)</i>	56
3.1. <i>Pantalla de operaciones vista por un participante.</i>	74
3.2. <i>Gráfico de dispersión del tiempo (eje x, en segundos) y precio (eje y) de cada transacción registrada para las acciones en el tratamiento Público.</i>	80

3.3.	<i>Gráfico de dispersión del tiempo (eje x) y precio (eje y) de cada transacción registrada para los bonos en el tratamiento Público.</i>	81
3.4.	<i>Gráfico de dispersión del tiempo (eje x) y precio (eje y) de cada transacción registrada para las acciones en el tratamiento Privado.</i>	91
3.5.	<i>Gráfico de dispersión del tiempo (eje x, en segundos) y precio (eje y) de cada transacción registrada para los bonos en el tratamiento Privado.</i>	93
A.1.	<i>Pantalla del mercado electrónico.</i>	115

Índice de cuadros

2.1. <i>TRE (corregida por calidad) de diversas fuentes de energía y referencia de la estimación</i>	34
2.2. <i>Parámetros del modelo y rango de sus estimaciones empíricas.</i>	54
2.3. <i>Porcentaje de disminución del consumo en estado estacionario como resultado de un cambio en el auto-consumo energético.</i>	58
3.1. <i>Valor de la empresa y nivel de deuda en cada ronda del experimento. . . .</i>	77
3.2. <i>Valoración neutral al riesgo con información completa sobre la señal s_t. . . .</i>	78
3.3. <i>Regresión de la diferencia entre el precio de mercado de las acciones y los bonos y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda.</i>	83
3.4. <i>Regresión de la diferencia entre el precio de mercado de las acciones y los bonos y su valor teórico contra una variable ficticia que indica que el valor de la acción es menor que 10 ECU, y la variable Ronda.</i>	84
3.5. <i>Regresión de la diferencia entre el valor de mercado de la empresa y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda. . . .</i>	86

3.6.	<i>Valoración neutral al riesgo en el tratamiento Privado bajo la hipótesis IP.</i>	89
3.7.	<i>Desviación media en valor absoluto entre el último precio de cada mercado (bonos y acciones) y los precios de equilibrio ER y IP</i>	94
3.8.	<i>Valor medio de las ganancias según el nivel de información y p-valor de la prueba U de Mann-Whitney</i>	97
3.9.	<i>Valor medio de las tenencias de acciones y bonos y p-valor de la prueba U de Mann-Whitney.</i>	97
3.10.	<i>Regresión de la diferencia entre el valor de mercado de la empresa y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda. . . .</i>	100

Lista de Abreviaturas

TRE: Tasa de Retorno Energético (véase Sección 2.2).

CES: Elasticidad de Substitución Constante, por sus siglas en inglés, siempre referida a la especificación funcional que lleva ese nombre (véase Sección 2.3).

ECUS: Unidades Monetarias Experimentales, por sus siglas en inglés. Cada 300 ECU se cambian por un euro en el experimento.

ER: Expectativas Racionales, especialmente refiriéndose al equilibrio bajo esta hipótesis sobre aprendizaje (véase Sección 3.5).

IP: Información Previa (bayesiana), especialmente refiriéndose al equilibrio bajo esta hipótesis sobre aprendizaje (véase Sección 3.5)

Capítulo 1

Introducción: modelización económica y representación del capital

Esta Tesis Doctoral está formada por dos trabajos independientes con un tema común: la representación del capital en los modelos económicos cuantitativos. En las siguientes páginas realizaremos una revisión de lo que entendemos que son los mayores desafíos de la modelización económica cuantitativa después de la Gran Recesión. Como consecuencia de esa revisión argumentaremos que los grandes avances realizados en la última década en modelización macro-financiera y de la conducta del consumidor necesitan complementarse con una descripción más realista y detallada de los procesos productivos reales, y de la distribución de las rentas del capital. Para abordar ambas cuestiones es necesario avanzar en la representación del capital en los modelos económicos cuantitativos. A continuación se presentarán los trabajos que forman esta Tesis Doctoral dentro del marco de esta agenda investigadora.

La reciente crisis financiera ha revelado algunas deficiencias significativas en la teoría

económica, y más en concreto en los modelos macroeconómicos y financieros que son utilizados por los gestores públicos en bancos centrales, ministerios de Economía e instituciones internacionales (Muellbauer, 2016; Gurkaynak y Tille, 2017). Entre estas deficiencias se pueden destacar las siguientes:

1. Economías pobladas por agentes idénticos (agentes representativos), que facilitan el cálculo de los equilibrios competitivos al reducirlos a una condición de “no intercambio”, al coste de estudiar un caso altamente simétrico (todos los agentes son iguales) que puede resultar poco representativo de las economías reales.
2. La hipótesis de Expectativas Racionales, que supone que los agentes conocen el “modelo verdadero” de la economía y saben utilizarlo para prever su evolución.
3. La exogeneidad de las preferencias de los agentes, que excluye situaciones donde las preferencias de los agentes cambian en el proceso económico.
4. La hipótesis de la renta permanente en las decisiones ahorro-consumo, que no es compatible con la evidencia empírica, frente al modelo de ahorro “buffer-stock” (Carroll, 2016).
5. La hipótesis de la irrelevancia de la estructura del capital (Teorema de Modigliani-Miller, ver Modigliani y Miller (1958); Stiglitz (1969)) implica en particular la del endeudamiento. Sin embargo se observa una vinculación entre el sobre-endeudamiento y las recesiones más severas (Borio, Disyatat y Juselius, 2013).
6. En línea con lo anterior, la mayor parte de los modelos macroeconómicos con una perspectiva de medio plazo antes de 2007 eran de equilibrio general con ajustes nominales imperfectos, y por tanto no consideraban la inestabilidad relacionada con las dinámicas del sector financiero.

Todas estas deficiencias se han abordado (con mayor o menor éxito) en varios modelos desarrollados en la década de 2010-2020. Por ejemplo, se han incorporado a modelos ma-

croeconómicos complejos algunas regularidades conductuales: un reciente artículo (Gabaix, 2020) consigue abordar varias paradojas macroeconómicas mediante una mera modificación en la conducta del agente representativo de su economía (que en este modelo tiene una actitud miope hacia la evolución de varias variables). En esta línea Andrei Shleifer y Nicola Gennaioli describen la Gran Recesión como “A crisis of beliefs” (Gennaioli y Shleifer, 2018), al considerar que la formación de expectativas en las economías reales está basada en la mera extrapolación de las tendencias recientes, sin la clase de racionalidad de equilibrio que suponen los modelos económicos estándar, lo que explica la conducta de los agentes en la Gran Recesión sin recurrir a explicaciones basadas en el riesgo moral. Entre los estudiosos de la economía macro-financiera, la hipótesis de exogeneidad de las preferencias es en general rechazada, y los modelos con “formación de un stock de hábitos” (donde la utilidad de los agentes depende de su historial de consumo) se consideran parte del instrumental modelizador estándar (Cochrane, 2017).

Además de estas vías conductuales y vinculadas a la formación de expectativas, también se ha propuesto enriquecer la modelización de la conducta del consumidor abandonando la hipótesis de la renta permanente e introduciendo consumidores que toman decisiones de consumo “buffer-stock”, que tienen en cuenta la existencia de potentes shocks idiosincráticos no asegurables a la renta personal (por ejemplo, vinculados al desempleo). Entre estos modelos destaca, por estar orientado al análisis de políticas, el modelo HANK (Heterogeneous Agent No Keynesian, see Kaplan, Moll y Violante 2018), que estudia la transmisión de la política monetaria con decisiones de ahorro “buffer-stock” y con activos de distinta liquidez.

Desde comienzos de la pasada década se han desarrollado modelos muy sofisticados con fricciones financieras, que llevan más cerca del terreno de la aplicación práctica los trabajos sobre el acelerador financiero (Bernanke, Gertler, Gilchrist, 1999) y los ciclos derivados del colateral que ya eran conocidos desde finales del siglo pasado (Kiyotaki y Moore , 1997). Entre ellos destaca Brunnermeier y Sannikov (2014) donde los shocks de productividad

exógenos son amplificadas por las diferencias de liquidez entre los distintos activos y la acción del sistema financiero. El reciente modelo desarrollado por el BCE (Karadi, Schmidt y Warne, 2018) para el análisis de la zona euro también incluye una detallada descripción del sector financiero.

En general la comunidad económica ha reaccionado a los acontecimientos de la pasada década profundizando exitosamente en las cuestiones de comportamiento individual, demanda agregada e intermediación financiera en las cuales su grado de conocimiento es más profundo.

Por otra parte la representación de la producción en los modelos económicos, y de las decisiones de las empresas han avanzado durante la última década, pero sin incorporarse a las herramientas de modelización estándar para la comprensión del ciclo económico y el diseño de las políticas fiscales y monetarias. En ese sentido ha habido un reciente interés en la revisión de la literatura de modelos de “ciclo económico real multi-sector” (Long y Plosser, 1987). Varios trabajos han analizado la propagación de shocks sectoriales hasta el nivel macroeconómico (Acemoglu, Akcigit y Kerr, 2016; Baqaee y Farhi, 2017), y uno de ellos (Atalay, 2017) encuentra que los shocks de productividad sectoriales son la primera causa de la volatilidad del PIB.

La recuperación de la economía sectorial en los últimos años no ha venido acompañada de un mayor interés de la modelización a nivel de empresa. La prometedora línea de investigación de microsimulación de la conducta empresarial (Tongeren, 1995) ha tenido un escaso número de seguidores, y en la mayor parte de los estudios posteriores se han desarrollado con el único objetivo de analizar las consecuencias de diversas reformas de los impuestos de sociedades.

Una reciente revisión de la literatura de microsimulación empresarial (Buslei, Bach y Simmler, 2014) encuentra varios tipos de modelos centrados en la conducta de la empresa: el primero y más completo sigue siendo el de van Tongeren, donde basándose en información

de las cuentas anuales de las empresas se calibra un modelo de la evolución de las principales magnitudes contables que sin ser estrictamente optimizador intenta describir la conducta de una empresa realista orientada al beneficio. Este estudio además describió la formación de precios y los vínculos intersectoriales de las principales empresas holandesas, siendo un ejercicio simultáneo de micro-simulación y equilibrio general computable.

Posteriormente, dentro de esta literatura de microsimulación de la conducta empresarial se desarrolló un modelo conductual para un conjunto muy extenso de empresas suecas (Shahnazarian, 2011), pero en este modelo los vínculos intersectoriales y la creación de precios de equilibrio ya no están presentes. El modelo tiene además objetivos más claramente definidos, y vinculados a la simulación fiscal. Otros centros de investigación han desarrollado sus propias herramientas de microsimulación de la conducta empresarial. Destacamos el modelo para Alemania del Centro de Investigaciones Económicas Europeas (ZEW), por su transparente documentación (Reister , Spengel , Finke y Heckemeyer, 2008) y la posterior investigación de uno de los autores (Heckemeyer, 2012), que combina las técnicas de micro-simulación con meta-análisis para entender las consecuencias de diversas posibles reformas del impuesto de sociedades.

Finalmente, desde una perspectiva más directamente econométrica un enfoque manejable para explicar las decisiones empresariales es el uso de elasticidades que pueden derivarse de estudios basados en respuestas a las reformas fiscales. Un ejemplo de estas investigaciones es Chetty y Saez (2005), que estudia cómo la tributación de los dividendos afecta la política de pago de las empresas sobre la base de una reforma tributaria específica en los Estados Unidos.

Algunos trabajos recientes indican la importancia de los fenómenos a nivel de empresa para la evolución agregada de la economía. Un reciente estudio para la economía española (García-Santana, Moral-Benito, Pijoan-Mas y Ramos, 2016) encuentra que *“la mala asignación de los factores productivos entre empresas del mismo sector se incrementó sustancialmente en todos los sectores.”* [durante la fase expansiva que precedió a la

Gran Recesión]. *“En ausencia de tal deterioro, se estima que el crecimiento promedio de la Productividad Total de los Factores se habría situado [...] en línea con el crecimiento de la frontera tecnológica. Asimismo, se observa que el empeoramiento en la asignación de recursos fue más severo en los sectores donde la incidencia de las regulaciones es más importante.”*. El precedente del trabajo de van Tongeren (y los trabajos de la “Competitiveness Research Network (CompNet)”, creada por el sistema europeo de Bancos Centrales) indican que una representación realista con datos contables a nivel de empresa individual de la actividad productiva es esencial tanto para entender la especialización productiva internacional y el desarrollo económico como para abordar la persistencia de las recesiones, y la dificultad que muestran las economías para recuperar un uso pleno de los recursos después una contracción económica.

Esta intuición se basa en la observación de que en general en las expansiones económicas se producen claros desequilibrios sectoriales: algunos sectores vinculados al consumo duradero y la inversión se ven especialmente afectados por el ciclo económico (Black y Cusbert, 2010; Stock y Watson, 2002) siendo el sector constructor el caso más extremo de comportamiento cíclico sectorial (Leamer , 2007). También es conocido que el grado de apalancamiento operativo y financiero de familias y empresas es muy relevante para determinar la vulnerabilidad a las crisis financieras (Borio, Disyatat y Juselius, 2013).

De alguna forma, si queremos (muy razonablemente) asumir que la tecnología disponible no se ve afectada por el ciclo económico, los modelos con funciones de producción muy agregadas están condenados a culpar de las fluctuaciones económicas a “shocks” inobservables de una productividad que incluso en los actuales modelos de equilibrio general dinámico son (en la famosa frase de Solow) una “medida de nuestra ignorancia”. Una verdadera dinámica económica necesita empezar identificando aquellos elementos que guardan la memoria de una economía, porque una economía sin memoria fluctuaría como un ruido blanco.

Identificamos al menos tres stocks donde una economía almacena las decisiones del

pasado (“path dependence”): por un lado en las mentes de las personas queda un stock de hábitos y experiencias que condicionan su actitud hacia el futuro. Las personas que han vivido las expectativas defraudadas de una burbuja de activos van a formar sus expectativas de futuro de forma distinta de la que les llevo a ser defraudadas en el pasado; del mismo modo los hábitos de consumo adquiridos en un nivel de renta condicionan la capacidad de los agentes de ajustarse a un shock en sus ingresos (Campbell y Cochrane, 1999). En segundo lugar, el presente hereda del pasado un stock de bienes de capital y de capital humano. Por ejemplo, un país que ha pasado por una burbuja inmobiliaria suele tener un número de personas demasiado elevado formadas para trabajar en el sector constructor, y un volumen excesivo de capital físico específico para la construcción (desde excavadoras a fábricas cementeras).

Finalmente, el pasado nos lega un stock de compromisos (y en particular de compromisos jurídicamente vinculantes en forma de contratos), que condicionan el futuro. El stock de contratos incluye dos tipos que resultan especialmente relevantes después de una recesión: los contratos laborales suelen incluir compromisos salariales adquiridos en un entorno muy diferente que se vuelven inasumibles para una de las partes (esto está detrás el fenómeno de la “rigidez salarial”). Las estructuras financieras de las empresas también pueden volverse insostenibles, por ejemplo, por la existencia de unas deudas que superan la capacidad de pago presente.

Estos tres grandes stocks (expectativas y preferencias, bienes de capital y contratos) no son independientes entre sí. En particular la palabra capital se utiliza para referirse a dos objetos distintos, aunque económicamente vinculados: por un lado el capital real, es decir el conjunto de bienes que se utilizan para producir otros bienes pero que no quedan incorporados al bien producido ni se consumen en el proceso productivo (en general duran más de un año).¹ Por otra parte el capital financiero es el conjunto de los contratos que canalizan los ingresos empresariales después de costes laborales a los propietarios y

¹En términos contables el capital “circulante” incluye inventarios, y otros activos a corto plazo, pero en este trabajo, nos referimos por “capital” al capital fijo tal como se entiende en contabilidad nacional.

acreedores de una empresa (y distinguimos entre los instrumentos financieros de renta fija y de renta variable, recibiendo estos últimos el apelativo contable de “capital”).

La relación entre ambos objetos es que (dejando aparte los impuestos), en condiciones de equilibrio general competitivo, donde las empresas carecen de poder de mercado, las rentas que no afluyen al factor trabajo son exactamente equivalentes a la remuneración por el alquiler de los bienes del capital (y la compensación por su depreciación) a los ahorradores que han financiado su compra. En una economía real, sin embargo, la parte residual de la renta empresarial después de costes laborales además de remunerar el alquiler y la depreciación de los bienes del capital utilizados en la producción en general incluye los “beneficios puros” derivados del poder de mercado de los empresarios y de otras rentas, como las derivadas de la posesión de recursos naturales, licencias o patentes.

Como comentamos en el primer párrafo de esta introducción, el cuerpo de esta Tesis está formado por dos trabajos independientes con un tema común: la representación del capital en los modelos económicos. El primer trabajo se presenta en el Capítulo 2 y se centra en una cuestión concreta, que entendemos relevante para la teoría del crecimiento: la relación entre el capital real y la calidad de los recursos energéticos que lo alimentan. El segundo trabajo, que se presenta en el Capítulo 3, trata sobre el análisis con técnicas de economía experimental del un resultado fundamental en la teoría económica sobre el capital financiero: el teorema de irrelevancia de la estructura del capital de Modigliani-Miller (Modigliani y Miller, 1958; Stiglitz, 1969). En el resto de esta Introducción se comenta el contenido de ambos capítulos y se enmarca en la cuestión más general de la representación del capital en los modelos económicos.

El **Capítulo 2** está basado en el artículo “Net Energy Analysis in a Ramsey-Hotelling Growth model” (Macias y Matilla, 2015), y se sitúa en la intersección entre la teoría cuantitativa del crecimiento y la llamada Economía Ecológica. La economía cuantitativa ha desarrollado un conjunto importante de técnicas para representar el capital real y su papel en los procesos productivos y de distribución de la renta. Considerado desde la época

de Ricardo uno de los tres factores de producción, el capital real estaría formado por los bienes producidos que se usan en la producción. Al contrario que los otros dos factores de producción (la fuerza laboral y la tierra), el capital no es un factor “dado” para la economía clásica, y Ricardo habla de él como “trabajo acumulado” cuando razona desde la teoría laboral del valor.

La forma más estandarizada de representar el capital real en los modelos económicos es incluir su stock (valorado a coste histórico y depreciado según una tasa anual) como un factor en una función de producción (generalmente la Cobb-Douglas) y describir la acumulación de dicho stock en una ecuación que considera una depreciación del capital que tiene que ser permanentemente compensada mediante el esfuerzo inversor de la economía. Las limitaciones de este enfoque son evidentes. Entre las que consideramos más relevantes para la comprensión de los ciclos económicos y el diseño de las políticas fiscales y monetarias están las siguientes: un conjunto heterogéneo de bienes se tratan como uno solo, totalmente homogéneo, donde las múltiples industrias y la especificidad del capital para ellas se ignora. Tampoco se considera en esta clase de modelo la incorporación de progreso tecnológico u otras características de los bienes de capital (por ejemplo, su eficiencia energética). Finalmente se obvia la existencia de un “tiempo de latencia” entre el momento en que un proyecto de inversión se inicia, y el tiempo hasta que empieza a generar bienes.

Adicionalmente a las anteriores, creemos que para la teoría del crecimiento hay otra limitación en las representaciones estándar del capital real de gran trascendencia: su relación con los recursos naturales. Esta insuficiencia se aborda mediante un modelo de crecimiento estándar con la energía como insumo en la función de producción. La calidad del stock disponible de energía es ordenada por su Tasa de Retorno Energético (TRE) definida como “la relación entre la energía producida y los costes energéticos incurridos para generarla y entregarla”.² Estos costes son los costes directos de energía (combustible y electricidad utilizados en el proceso para obtener la energía útil final) y los costes indirectos (la energía

²La TRE en inglés es conocida como “Energy Return on Energy Investment” (EROI).

incorporada en los bienes de capital utilizados por el sector de producción de energía).

El capítulo continúa describiendo los problemas de contabilidad energética relacionados con la TRE (calidad de la energía y análisis del ciclo de vida para el cálculo de energía neta), y presenta la “curva de auto-consumo de energía” como la mejor representación matemática del total de recursos energéticos.

A continuación se propone una extensión del modelo de crecimiento económico neoclásico que incluye en la función de producción un flujo de energía como input (adicionalmente al capital y al trabajo). La producción de esa energía es proporcional al capital instalado en el sector energético e inversamente proporcional al auto-consumo de energía de los recursos energéticos actualmente utilizados.

Para el modelo así construido (llamado Ramsey-Hotelling-TRE) se calcula su estado estacionario para diferentes niveles de auto-consumo de energía y se ha realizado un análisis de estática comparativa de los estados estacionarios que generan los distintos parámetros del modelo. De este ejercicio se extraen resultados y consecuencias que detallamos en el propio Capítulo 2, y que se resumen brevemente en el capítulo de Conclusiones de esta Tesis Doctoral.

El **Capítulo 3** de esta Tesis está basado en el artículo “Irrelevance of capital structure in the laboratory: an experiment with complete and asymmetric information” (pendiente de publicación), y este trabajo utiliza la metodología de la Economía Experimental para abordar un tema clásico de Finanzas Corporativas.

Una característica importante de los mercados financieros es la diversidad de contratos que representan diferentes derechos sobre los flujos de caja de una empresa determinada. Los contratos más comunes que canalizan los flujos de caja de una empresa son la deuda (un compromiso nominal de pago con plazos fijados) y el capital (el derecho a recibir los flujos de efectivo residuales después del servicio de la deuda). En lo referente a la estructura de los contratos que canalizan la renta del capital, el actual modelo base es el teorema de

irrelevancia financiera de Modigliani-Miller. Este teorema dice que bajo ciertas condiciones el valor de mercado de todos los instrumentos que forman el pasivo de una empresa es una cantidad que solo depende del flujo libre de caja que esta genera. En esas condiciones las decisiones de pago de dividendos y apalancamiento de una empresa no afectan a su valor de mercado (son “irrelevantes”), y más en general la instrumentación financiera del pasivo empresarial es irrelevante.

Las consecuencias macroeconómicas de Modigliani-Miller son inmensas y en buena parte infra-consideradas. Por ejemplo, en un mundo donde el teorema fuese literalmente cierto, los niveles de endeudamiento empresarial serian irrelevantes, y por tanto no podría haber “sobre-endeudamiento”. Los efectos económicos de los ratios mínimos de capital bancario deberían ser nulos. La propia efectividad de la política monetaria y la relevancia económica de los tipos de interés se vuelven más contra-intuitivos en un mundo donde todas las empresas son indiferentes entre financiarse en deuda y en capital.

Por supuesto, las hipótesis de Modigliani-Miller no son realistas, pero el hecho de que los efectos económicos del endeudamiento estén tras el velo de un resultado de irrelevancia nos indica que el análisis micro-fundado de las consecuencias macroeconómicas del endeudamiento es intrínsecamente muy difícil. Un hecho sorprendente es que incluso trabajos empíricos de primer nivel dedicados a entender esta cuestión no mencionan al Teorema de Modigliani-Miller ni las razones por las que el autor considera que el endeudamiento no es neutral (Borio, Disyatat y Juselius, 2013).

En este capítulo se describe un experimento que pone a prueba la irrelevancia de la estructura de capital, y se analizan sus resultados. En dicho experimento, cada grupo de diez sujetos se enfrenta a la siguiente situación durante trece períodos: hay dos activos (acciones y bonos), cuyos valores están determinados por una variable estocástica (el “valor real” de la empresa) extraída de una distribución uniforme. La deuda de la empresa es conocida por todos los participantes. Al inicio de cada ronda del experimento se revela a los participantes una señal con información incompleta sobre el valor de la empresa.

En cada período, los sujetos pueden negociar los precios del bono y la acción durante cinco minutos en dos mercados de subasta doble (sin posibilidad compra-ventas en descubierto). En cada ronda, los sujetos están inicialmente dotados de un préstamo de efectivo y una cartera de bonos y acciones que imita la estructura financiera de la empresa. Al final de cada ronda se informa a los sujetos sobre el verdadero valor de la empresa y sus ganancias o pérdidas del período de negociación. Al final del experimento, las ganancias por ronda se suman y se convierten en efectivo real. En el transcurso del experimento se consideran cuatro niveles de endeudamiento y tres niveles de la señal de valor.

Seis de los doce grupos realizarán el tratamiento *Público*, donde la señal que lleva información sobre el valor de la empresa se entrega a todos los participantes. Los otros seis grupos harán el tratamiento *Privado* donde la señal solo se revelará a cuatro participantes elegidos al azar.

El tratamiento *Público* permite analizar si la valoración neutral al riesgo y la irrelevancia de la estructura de capital se verifican en unas condiciones experimentales diseñadas para ser semejantes a las que requiere el Teorema de Modigliani-Miller. El tratamiento *Privado* permite la evaluación del desempeño empírico de los dos marcos de formación de creencias bajo información asimétrica: las expectativas racionales frente a la información previa (bayesiana). Los resultados experimentales se analizan detalladamente en el propio capítulo, y se resumen en las Conclusiones de esta Tesis Doctoral.

Capítulo 2

Análisis de rentabilidad energética en un modelo de crecimiento Ramsey-Hotelling

2.1. Introducción

El impacto del agotamiento de los recursos energéticos ha sido un problema clásico en Economía al menos desde que se publicó “La Cuestión del Carbón” (Jevons, 1865), que presenta la cuestión de la sostenibilidad de un sistema productivo que depende significativamente de recursos naturales no renovables. La descripción de la senda óptima de agotamiento de un recurso no renovable es un problema resuelto utilizando el cálculo variacional en los primeros años de la economía neoclásica (Hotelling, 1931). Por otra parte, la teoría moderna del crecimiento económico se desarrolló principalmente en la década de 1950, aprovechando el trabajo de Ramsey (1928) sobre ahorro óptimo. Ramsey describió la decisión de un individuo que asignaba de manera óptima su renta en cada período entre el ahorro y el consumo, a fin de obtener un valor presente máximo de su futuro bienestar

descontado.

Para hacer teoría del crecimiento, era necesario generalizar los conceptos puramente individualistas de la teoría del ahorro de Ramsey y darles contenido social. Para el ahorrador de Ramsey, la renta y la rentabilidad del ahorro eran datos dados, pero una teoría cerrada del crecimiento tenía que internalizarlos. Por ello las teorías del crecimiento neoclásicas (Koopmans, 1965; Cass, 1965) tomaron al ahorrador de Ramsey y lo sustituyeron por un agente representativo que elegía como dividir la producción corriente entre el consumo y el equivalente social del ahorro: la inversión en bienes del capital. La rentabilidad del ahorro sería la ganancia en el flujo de consumo futuro que compensaba el sacrificio presente de invertir en capital.

La forma elegida para expresar la relación entre el stock de capital y la capacidad productiva de la economía fue postular la existencia de una “función de producción“ que presentaba toda actividad económica como el resultado de la combinación de los “factores productivos“ identificados por Smith y Ricardo: el trabajo humano, los bienes de capital y el factor de la tierra que Ricardo describió como *“los poderes originales e indestructibles [productivos] del suelo“*.

La forma general de una “función de producción“ es la siguiente (donde Y y L son respectivamente los flujos corrientes de bienes producidos, K es el stock de bienes de capital- a partir de ahora llamado “el capital“-y E es la aportación del factor tierra (que consiste en un flujo de recursos renovables y/o un stock de recursos no renovables).

$$Y = f(K, L, E)$$

A las funciones de producción en general se les exige la propiedad de ser homogéneas de primer orden, es decir, al multiplicar los insumos por un escalar, el producto queda multiplicado por el mismo escalar.

Sin embargo, en los modelos neoclásicos de Cass y Koopmans las funciones de producción solo incluían capital y trabajo como inputs. Las razones de esta desviación del pensamiento económico clásico de Smith y Ricardo eran principalmente empíricas: en los Estados Unidos de la postguerra la importancia del sector agrícola estaba disminuyendo y las materias primas y las fuentes de energía eran baratas y abundantes. Como resultado de esta omisión, y de la propiedad homogénea de primer orden de la función de producción, se puede realizar la siguiente simplificación:

$$Y = f(K, L)$$

$$\frac{Y}{L} = \frac{1}{L} * F(K, L) = F\left(\frac{K}{L}, \frac{L}{L}\right)$$

$$y = F(k, 1) = f(k)$$

Donde k e y son capital y producto *per capita*. La omisión del factor de la tierra hace posible hacer teoría del crecimiento directamente en términos *per capita*, separando totalmente la economía de la demografía. Esta simplificación representa una enorme diferencia entre la economía clásica y la neoclásica: para los economistas clásicos, la determinación de la población era un problema económico como el desempleo o la distribución del ingreso. La teoría neoclásica del crecimiento temprana se basaba en funciones de producción que solo incluían el capital y el trabajo como insumos, y eran susceptibles de la transformación *per capita* expuesta.

Posteriormente, en los años setenta, los recursos naturales no renovables se incorporaron a los modelos de crecimiento neoclásicos (Dasgupta y Heal, 1974; Solow, 1974), y se caracterizaron las tendencias a largo plazo de la producción y el consumo con y sin crecimiento de la productividad. Aun así, la narrativa canónica de la economía neoclásica sigue

identificando el progreso tecnológico y el entorno institucional como los impulsores centrales del proceso de crecimiento (Acemoglu y Robinson, 2012; North, Wallis y Weingast, 2009).

Por otro lado, en los doscientos años de la Revolución Industrial, el crecimiento se ha relacionado no solo con un nivel creciente de productividad y acumulación de capital, sino también con un aumento igualmente sostenido del uso de la energía. Esto ha sucedido en un proceso de retroalimentación, donde el mismo progreso técnico (tomemos la invención de la máquina de vapor como el ejemplo canónico) creó una demanda creciente de energía (carbón) y proporcionó los medios para aumentar la oferta (la máquina de vapor fue utilizada en primer lugar en la minería del carbón).

Como reacción al descuido en la relevancia del uso extensivo de los recursos naturales (especialmente la energía) como un factor determinante del crecimiento económico en la economía neoclásica, ha surgido un cuerpo teórico de pensamiento económico (la Economía Ecológica) que afirma que el crecimiento económico después de la Revolución Industrial se ha basado en el agotamiento del stock de combustibles fósiles (Cottrell, 1955; Hubbert, 1956; Georgescu-Roegen, 1971; Odum y Odum, 1983; Mayumi, 2001). La economía ecológica también considera que la escasez económica se deriva al menos en parte de las restricciones termodinámicas que afectan a cualquier sistema físico, y en particular a la sociedad humana.

Una herramienta principal de la Economía Ecológica ha sido el “análisis de energía neta“, que se define en Cleveland (1992) como una *“técnica para evaluar sistemas de energía [...] que compara la cantidad de energía suministrada a la sociedad por el sector de producción energética con el energía utilizada en el proceso de producción de energía“*. El desarrollo técnico del análisis de energía neta fue realizado en el ámbito de la ingeniería para calcular el ciclo de vida energético de algunos productos e instalaciones (Thomas, 1977; Hendrickson, Lave y Matthews, 2006) y por científicos ecológicos que ampliaron hacia la civilización humana el análisis del flujo de energía desarrollado para los ecosistemas (Odum

y Odum, 1983). Una medida relevante derivada del análisis de energía neta es la TRE (“Tasa de rentabilidad energética“) definida como *“la relación entre la energía producida y los costes energéticos incurridos para generarla y entregarla“*.¹ Estos costes son los costes energéticos directos (combustible y electricidad utilizados en el proceso para obtener la energía útil final) y los costes indirectos (la energía incorporada en los bienes de capital utilizados por el sector de producción de energía). La relevancia económica del “análisis de energía neta“ y en particular de la TRE sigue siendo un tema controvertido (Cleveland y Kauffman, 1991; Cleveland, 2001) que se analiza en la Sección 2.2 de este Capítulo.

La eficiencia en el uso y la producción de energía es un importante impulsor del crecimiento: la cantidad de trabajo útil realizado por unidad de exergía (una medida física de la energía libre en un combustible) mejoró constantemente en los siglos XIX y XX (Ayres y Warr, 2005). En Stern (2010a) se ajusta un modelo de crecimiento para la economía de Suecia con el sector de producción energética explícitamente separado del resto de la economía. El modelo es sensible a las mejoras de calidad en los combustibles utilizados y a las mejoras en la eficiencia del uso de energía en la economía sueca, pero el agotamiento de las fuentes de energía y las mejoras en la producción de energía no se consideran (una decisión sensata para la pequeña economía abierta de Suecia, pero una limitación para entender un sistema económico cerrado como la economía global). El paradigma de “conversión de exergía“ proporciona una medida de cuán físicamente eficiente es el uso de la energía primaria utilizada por el sistema económico, mientras que la TRE es una medida sintética de cuán difícil es proveer esa energía con la tecnología y los recursos dados. La TRE y la eficiencia de conversión de exergía proporcionan medidas útiles y complementarias de eficiencia física para los sectores de la economía productores y consumidores de energía, respectivamente.

La primera ventaja de TRE como medida de calidad de los recursos energéticos es ser una medida física (en lugar de una monetaria). La clasificación de los recursos natura-

¹La TRE corresponde a la expresión inglesa “Energy Return on Energy Investment“ (EROI)

les por “costes monetarios“ (Hotelling, 1931; Chakravorty, Roumasset y Tse, 1997) es un enfoque razonable para describir en primera instancia la dotación de recursos energéticos heterogéneos, pero no puede utilizarse directamente en un modelo de equilibrio general porque los costes monetarios deben ser el resultado de la interacción del mercado entre la demanda (derivada de las preferencias subjetivas) y la oferta (derivada de las dotaciones de recursos y funciones de producción). Las descripciones físicas de la escasez de recursos (como la “riqueza de la mena“ en minería) son las variables naturales en los modelos de equilibrio general, mientras que los modelos basados en “costes monetarios de extracción“ están formulando hipótesis ocultas que pueden llevar a sesgos importantes cuando las condiciones de la producción cambian significativamente respecto de las actuales. Por ejemplo, el agotamiento de los recursos energéticos podría afectar el coste de reposición del capital o el coste de la mano de obra, que son determinantes de los propios costes de producción de energía. En un modelo donde los recursos energéticos se clasifican por costes de producción (fijos) no se consideran los efectos de la segunda ronda del agotamiento de los recursos energéticos en el propio coste de los bienes energéticos (Stern, 1997; Pearce, 2008; Kenny, Law y Pearce, 2010).

La segunda ventaja de TRE es que es comparable en todas las fuentes de energía: una descripción más detallada de la calidad física de las diferentes fuentes de energía (la concentración de mineral de las minas de uranio, el espesor de la veta para las minas de carbón, el tamaño y la profundidad en los pozos de petróleo y gas) se pueden utilizar en un modelo de Ramsey-Hotelling para predecir las trayectorias de agotamiento de los recursos naturales y el impacto del agotamiento de los recursos naturales en el consumo. Pero estas medidas son inconmensurables entre sí, y obligan a que las comparaciones sobre coste y uso de los diversos recursos energéticos tengan que emerger del comportamiento del modelo. Al ser comparable a través de diferentes fuentes de energía, la TRE promedio de las fuentes de energía actuales se puede calcular y utilizar como una medida agregada de la calidad de los recursos energéticos en uso, permitiéndonos incluir todas las fuentes de energía como un solo bien en los modelos cuantitativos.

Como es habitual en Economía, existe un dilema entre los modelos de bajo nivel (donde se utilizan descripciones detalladas de la escasez física y la tecnología) y una descripción de alto nivel de las relaciones entre la economía y el sistema energético. En las descripciones de bajo nivel, la exactitud, la precisión y el mayor realismo del modelo implican una mayor sensibilidad a las opciones de modelado y la descripción de la tecnología, mientras que los modelos de alto nivel son menos sensibles a la tecnología particular y las opciones de modelado (pero aún dependen de los supuestos de alto nivel) y sus resultados son más transparentes y comprensibles. La TRE es un concepto y medida útil para el modelado de alto nivel del impacto de las restricciones físicas en la economía, y así se utiliza en este trabajo.

El uso del análisis de energía neta en la economía neoclásica ha sido inusual, con sólo unas pocas aplicaciones, concentradas principalmente en el comercio internacional: Baumol y Wolff (1981) utiliza el análisis input-output y el concepto de rendimiento energético para demostrar que los subsidios dirigidos aumentan la dependencia energética (frente a los impuestos Pigouvianos, que no tienen ese efecto indeseable) y Hong (2007) analiza la “energía incorporada” en el comercio de mercancías de China y sus consecuencias. Por otro lado, el interés académico en la TRE se ha mantenido en los últimos años, incluyendo algunos artículos revisados por pares y algunos libros sobre la metodología y aplicaciones económicas de la TRE (Cleveland, 2001; Hall, Balogh y Murphy, 2009; Pimentel, 2008). El interés en las aplicaciones económicas de la TRE por parte de los científicos ambientales se ha reflejado en una serie de publicaciones en revistas de Ciencias Naturales, que incluyen artículos en “Nature” (Hall, Tharakan y Hallock, 2003), “Annals of the Science Academy of New York” (Murphy, Hall y otros, 2010), “Ambio” (Mulder y Hagens, 2008) y un número especial de “Sostenibilidad” (Hall, 2011).

En 2015 se publicó en “Energy Policy” el artículo en el que se basa este capítulo (Macias y Matilla, 2015), y desde entonces el ritmo de publicación en este ámbito de las ciencias socio-ambientales no se ha reducido. Destacamos de la literatura posterior una

contribución teórica sobre el impacto de la TRE sobre el crecimiento (Fizaine y Court, 2016) y varias contribuciones dedicadas a la estimación actualizada de la TRE de diversas fuentes de energía. De ellas hay que destacar la construcción (Fizaine y Court, 2017) de series temporales de la TRE de los combustibles fósiles desde finales del siglo XIX hasta 2012, nuevos estudios y metanálisis sobre la TRE de la energía solar fotovoltaica (entre los que destacamos por la claridad de sus resultados Palmer y Floyd (2017) y Raugei, Sgouridis y Murphy (2017)) y un artículo sobre la TRE de la producción de electricidad eólica (Huang, Gan y Chiueh, 2017).

El artículo en que se basa este capítulo hizo dos contribuciones originales a la literatura teórica sobre la TRE: primero en el ámbito conceptual, señalamos que la TRE es una relación de apalancamiento entre la energía producida y la utilizada por el sector energético, y por tanto su impacto económico depende en gran medida de los costes no energéticos (salarios, capital, impacto ambiental, etc) de expandir la actividad del sector energético. En segundo lugar, la observación anterior nos permite incluir naturalmente la TRE en un modelo de crecimiento neoclásico.

Para resumir la contribución conceptual, el impacto económico de un cambio en el TRE del sector energético de una sociedad depende necesariamente del coste no energético de la expansión y mantenimiento del sector de producción de energía de esa sociedad. Si el sector de producción de energía pudiera expandirse de forma gratuita, cualquier disminución (no por debajo de uno) en la TRE de las fuentes de energía disponibles (que es un índice de eficiencia) podría compensarse gratuitamente mediante una expansión de la escala de actividades del sector energético. Una vez que se interpreta correctamente la TRE y se modela el coste de expansión del sector energético, el parámetro TRE entra naturalmente en un modelo de crecimiento neoclásico.

El impacto económico de la reducción en el TRE que nuestra sociedad enfrentaría como resultado del agotamiento de los combustibles fósiles de mejor calidad ha sido una preocupación permanente para los economistas ecológicos. Hay muchos indicios cualitativos en

la literatura sobre Economía Ecológica en el sentido de que los impactos en la reducción de la TRE sobre el consumo final, el bienestar y la población podrían ser significativos e incluso catastróficos (Manno, 2011; Hall, Balogh y Murphy, 2009). Además de las evaluaciones cualitativas sobre el impacto del declive de la TRE en el consumo en Bassi, Powers y Schoenberg (2010) se presentan los resultados de un ejercicio de simulación detallado donde se utiliza explícitamente la TRE promedio para la producción de energía en los EE.UU para modelar los efectos económicos del agotamiento de los recursos energéticos. Los resultados de este artículo para 2050 son que con un cambio en la TRE de petróleo y gas desde alrededor de 11 (2005) a alrededor de 6 (2050), el “consumo discrecional” (consumo después de que se satisfacen las necesidades básicas) reducirá su “peso en todos los flujos económicos” desde el 36 % al 15 % (lo que implica una reducción severa en el consumo per cápita total) y la inversión discrecional (más allá del reemplazo de capital) desaparecería por completo. El peso de la producción de energía en todos los “flujos económicos” aumentaría de alrededor de 10 % a 22 %.

Por otro lado, en el modelo que presenta este capítulo (utilizando herramientas de equilibrio económico estándar), el impacto de una reducción en el TRE promedio para el sector energético de 10 a 5 implicaría (dependiendo de la sustituibilidad de la energía por capital) una reducción del consumo per cápita de menos de 10 %, un descenso significativo pero no catastrófico. Sin embargo nuestro estudio del impacto se basa en un análisis de estática comparativa (el coste de la transición no se toma en cuenta) y no incluye el efecto del crecimiento de la población ni las externalidades de contaminación.

El resto de este capítulo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2.2 se presentan los principales conceptos de contabilidad de energía y análisis de energía neta (con un énfasis especial en la TRE): particularmente una descripción de la contabilidad de recursos minerales y algunos datos estilizados sobre el agotamiento de recursos naturales (con un enfoque especial en los recursos energéticos). Luego se discuten algunas limitaciones de la contabilidad clásica de recursos naturales y, para superarlas se propone una descripción

matemática de la calidad global de los recursos energéticos basada en la TRE: la curva de auto-consumo de energía. También se comenta la relación entre las reservas de combustibles primarios, el capital instalado en el sector energético y el flujo de energía útil entregado a la economía. La Sección 2.3 presenta una función de producción mixta CES-Cobb-Douglas con energía, capital y mano de obra que permite una especificación flexible de la sustitución (a largo plazo) entre capital y energía. A continuación se propone un modelo Ramsey-Hotelling-TRE que relaciona los conceptos discutidos en la Sección 2.2. En la Sección 2.4 se calcula el estado estacionario del modelo para diferentes niveles de TRE, y se realiza un análisis de estática comparativa de estos estados estacionarios. La Sección 2.5 presentará las conclusiones del Capítulo 2 y algunas propuestas para futuras investigaciones.

2.2. Métodos

La primera cuestión antes de discutir la contabilidad de la energía es evaluar en qué medida la “energía” puede tratarse como un bien compuesto. El petróleo, el gas, el carbón o el uranio, que forman la mayor parte de los combustibles primarios son bienes diferentes que se compran y venden en diferentes mercados y cuyos precios no siempre se mueven conjuntamente. Además, estas fuentes de energía primaria se utilizan para producir diferentes formas de energía secundaria (vectores energéticos), siendo los más importantes los combustibles líquidos para los motores de combustión interna, el calor y la electricidad.

Al abordar estos bienes conjuntamente debe considerarse el grado de sustituibilidad entre ellos. Los trabajos empíricos han encontrado una baja sustituibilidad entre la energía y el capital y una limitada sustitución entre combustibles en el corto plazo, y se encuentra una mayor sustituibilidad en el medio y largo plazo (Sweeney 1984, Atkeson y Kehoe 1999). Esto no es una sorpresa, porque con un stock dado de capital instalado existe una relación muy estrecha entre la producción económica y los insumos de energía. Por otro lado, en el

largo plazo, las decisiones sobre la instalación de capital dependen de los precios relativos de las diferentes fuentes de energía, por lo que la demanda de combustible a largo plazo es mucho más elástica.

Desde un punto de vista más fundamental, existen procesos físicos conocidos que permiten la transformación de cualquier forma de energía libre en otra:² es decir, la energía química se puede convertir fácilmente en un diferencial de temperatura (combustión), un diferencial de temperatura se puede convertir en trabajo mecánico (en turbinas o motores), el trabajo mecánico se puede transformar en electricidad (con un generador eléctrico), que se puede convertir en un potencial químico (en una batería) o en un diferencial de temperatura (a través de una resistencia). Con un aumento positivo (pero arbitrariamente pequeño) en la entropía (una reducción de la energía libre) y el uso del capital físico, las formas de energía pueden transformarse entre sí.

Además, las leyes de la termodinámica implican que cualquier proceso macroscópico debe mantenerse con el consumo de energía libre. Estos hechos apoyan la hipótesis de que la energía libre es un insumo esencial para todos los procesos económicos y que existen procesos físicos que garantizan la sustitución entre diferentes fuentes de energía. Como se explicó anteriormente, una medida del coste de proveer una unidad de energía útil al sistema económico es la TRE. La definición de TRE, (la proporción entre la energía final provista y los costes energéticos de producirla), se puede expresar matemáticamente. Suponiendo que la producción de E unidades de energía necesita el uso de (E_1, \dots, E_n) unidades térmicas de las fuentes de energía 1 an n, la TRE es:

$$TRE = \frac{E}{E_1 + \dots + E_n}$$

²La energía libre es la que se puede utilizar para hacer un trabajo útil (macroscópico). En un sistema cerrado, donde la energía del sistema esta fijada por la Primera Ley de la Termodinámica (ley de conservación de energía), la energía libre disminuye cuando aumenta la entropía del sistema.

Un problema bien conocido del análisis de energía neta es la cuestión de la calidad de la energía. En algunos análisis de energía neta, las entradas y salidas de diferentes tipos de energía se agregan por sus equivalentes térmicos (medidos en “unidades térmicas británicas, b.t.u“, julios o barriles equivalentes de petróleo), como en la fórmula anterior. El enfoque término-equivalente ignora el hecho importante de que existen características económicas relevantes más allá del contenido termico de una fuente enérgica. Una unidad térmica de electricidad puede generar más producción económica que una unidad térmica de petróleo, y una unidad térmica de petróleo genera más producción económica que la misma unidad térmica de carbón.

Las metodologías más directas para la contabilidad de la energía con corrección de calidad se basan en establecer “pesos de corrección de calidad“ en la definición original de TRE. Siendo $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ los pesos de corrección de calidad, la “TRE corregida por calidad“ es:

$$TRE_{.q} = \frac{\lambda E}{\lambda_1 E_1 + \dots + \lambda_n E_n}$$

La mayoría de los analistas de energía neta aceptan el principio de corrección por la calidad de la energía, pero la construcción de índices de calidad para definir un bien compuesto implica problemas técnicos sustanciales (Stern, 2010b), y no hay una metodología única para la corrección por calidad energética.

Se han desarrollado algunas metodologías basadas en la entropía para la corrección de la calidad en el análisis de energía (corrección por exergía y emergía, por ejemplo). Sin embargo las medidas termodinámicas de calidad se basan en ciclos de energía ideales y no en el uso real de la energía por parte del sistema económico. Aún así, bajo condiciones ideales de competencia en el mercado, y suponiendo que las características no energéticas de los combustibles no son económicamente relevantes, se puede demostrar que existe una relación definida entre los precios del mercado y exergía (Lesourd, 1981). Para construir

ponderaciones de corrección de calidad de energía económicamente relevantes, se ha propuesto (Cleveland, 1992, 2001) el uso de algunos promedios a largo plazo de los precios relativos de la energía.

La TRE no trata de la eficiencia física en el uso de energía (gratuita) en nuestro entorno sino sobre los flujos de energía económicamente útil: esto es, cuanta energía económicamente útil tiene que invertirse para obtener energía primaria económicamente útil. En particular la TRE de viento o sol no es una medida de la eficiencia física de la transformación de la energía libre de la luz solar o el viento en electricidad. Es una relación entre la cantidad de electricidad (corregida de calidad) producida por los paneles solares y molinos de viento y la energía corregida de calidad invertida para producirla: es decir, la electricidad, gasolina o gas utilizados en todo el proceso de producción, transporte e instalación del panel o del molino de viento.

Para incluir los costes de energía tanto directos como indirectos de un proceso económico, existe una metodología denominada Análisis Ambiental del Ciclo de Vida basado en el modelo Input-Output (ver Bullard, Penner y Pilati 1978 y Hendrickson, Lave y Matthews 2006).³ Esta metodología toma un proceso económico dado, calcula los bienes intermedios utilizados (por ejemplo, el acero usado en una fábrica de automóviles) y, para todos esos inputs, la matriz input-output de Leontief se invierte para obtener los costes de energía incurridos a través de la cadena de valor añadido desde las materias primas al bien final. La combinación del análisis del ciclo de vida y la contabilidad input-output proporciona un cálculo completo y a nivel de todo el sistema económico de los costes de energía de una mercancía determinada (Murphy, Hall y otros, 2011; Henshaw, King y Zarnikau, 2011). Cuando se aplica a un proceso cuyo resultado es un producto energético (el proceso de producción de gasolina desde la plataforma petrolera a la estación de servicio, o la electricidad producida por carbón desde la mina de carbón hasta el enchufe) el resultado de

³Un recurso de interés para realizar el Análisis Ambiental del Ciclo de Vida basado en el modelo Input-Output, es el modelo EIO-LCA, desarrollado por el Green Design Institute of the Carnegie Mellon University (www.eiolca.net).

dividir la energía final producida (corregida por calidad) por los inputs energéticos (corregidos por calidad) que se han gastado en el proceso de producción es precisamente la TRE.

La relevancia económica del análisis de energía neta es el tema de una gran controversia, entre quienes consideran que la única medida relevante de escasez es el precio de mercado de diferentes combustibles y aquellos que consideran que el análisis del ciclo energético es importante, o incluso la medida más importante de escasez. En nuestra opinión, no hay ninguna contradicción entre el precio de mercado y la TRE. El precio de mercado es (al menos bajo competencia perfecta y expectativas racionales) la mejor medida disponible de la escasez económica. Pero la escasez económica no es solo el resultado de las preferencias subjetivas de los agentes y la estructura de la producción, sino también el resultado de la calidad de los recursos.

Aunque en general el precio es un estadístico suficiente de la escasez económica de un recurso en un momento dado, explicar el proceso de formación de precios exige conocer los datos base que el precio sintetiza: preferencias subjetivas, funciones de producción y características (incluida la calidad) de los recursos energéticos primarios. Por ello entendemos que la TRE desempeña un papel en la economía de la energía similar a la “ley de la mena” (la abundancia porcentual de un mineral en el yacimiento del que se extrae) en la economía de los recursos minerales. Ningún economista de recursos minerales niega que la “ley” de los yacimientos es un indicador esencial para comprender el nivel de precios de un mineral dado (Philips y Edwards, 1976). Pero aunque existen modelos de precios de la energía que vinculan la “ley” de los recursos disponibles con los precios, nadie afirma que esta medida pueda sustituir al precio de mercado (Shinkuma y Nishiyama, 2000). Sin embargo, al contrario que la “ley de la mena” (que es una medida pura y estática de la calidad del recurso), la TRE se ve afectada por el cambio tecnológico en el sector energético de la economía. La dinámica de la TRE sintetiza información sobre la calidad de los recursos y la tecnología en el sector energético.

Cuadro 2.1: *TRE (corregida por calidad) de diversas fuentes de energía y referencia de la estimación*

Fuente de energía	TRE	Referencia
Petroleo y Gas, EE.UU, 1954	18	Cleveland, 2001
Petroleo y Gas, EE.UU, 1974	12	Cleveland, 2001
Petroleo y Gas, EE.UU, 1997	11	Cleveland, 2001
Gasolina , 1997	7	Cleveland, 2001
Carbón, a la salida de la mina, EE.UU., 1954	25	Cleveland, 1992
Carbón, a la salida de la mina, EE.UU., 1987	25	Cleveland, 1992
Eólica	17	Huang, Gan y Chiueh, 2017
Solar Fotovoltaica	9	Raugei, Sgouridis y otros, 2017
Biofuel	< 1	Pimentel, 2008

Algunas medidas son mejores que la TRE para capturar la calidad física de una fuente de energía dada: la “ley de la mena” en las minas de uranio para el combustible nuclear, el espesor de la veta para las minas de carbón, el tamaño y la profundidad de los yacimientos de petróleo y gas, etc. Sin embargo estas medidas son inconmensurables entre las diferentes fuentes de energía. Por otro lado, TRE tiene la ventaja de ser una medida principalmente física y comparable entre diferentes fuentes de energía. Es decir, la TRE corregida de calidad promedio proporciona una comparación directa entre el carbón estadounidense, el petróleo saudí y el gas ruso, y proporciona métricas unidimensionales y sólidas (basadas en la Física) para la calidad de los recursos energéticos. La evolución temporal de la TRE mide el agotamiento de los recursos energéticos (Cleveland, 2001). En el Cuadro 2.1 proporcionamos estimaciones de la TRE corregida de calidad promedio de algunas fuentes de energía⁴.

Para mayor comodidad matemática, definimos el “auto-consumo de energía” como el inverso de la TRE (el porcentaje de la energía bruta producida que consume el propio sector energético). El auto-consumo se mueve entre 0 y 1 para las fuentes de energía (es más grande que 1 para los sumideros de energía). A partir de ahora, en este documento, tanto el TRE como el auto-consumo se consideran corregidos calidad (a menos que se indique lo contrario) y el término auto-consumo se utiliza preferentemente.

⁴El caso de la energía nuclear está rodeado de una gran controversia con estimaciones que van desde menos de uno a más de noventa, así que se ha decidido no incluirla. La energía hidroeléctrica es muy específica de cada localización, y su “TRE promedio” no tiene sentido.

2.2.1. La calidad de los recursos, el agotamiento y la curva de auto-consumo de energía como una representación integral de los recursos energéticos.

La teoría económica del agotamiento de los recursos fue descubierta por James Anderson hacia finales del s.XVIII (Lackman, 1976) aunque fue David Ricardo quien la popularizó ya en el s.XIX. El concepto central de la teoría de la renta es el de la productividad marginal del factor de la tierra. En cualquier país, grandes extensiones de tierras no cultivadas conviven con un ingreso positivo del factor tierra: esta aparente paradoja se explica señalando que la renta no se paga por la escasez absoluta del recurso, sino por la escasez relativa de tierra de alta calidad (Ricardo, 1817). En el segundo capítulo de su libro, Ricardo nos invita a considerar la tierra como ordenada por productividad, y supone (por simplicidad) que el producto depende solo de dicha calidad y las horas de trabajo humano que se dedican a la agricultura. Según Ricardo habrá una tierra (llamada “parcela marginal“) que solo genera suficiente producto para pagar salarios; la renta que paga cualquier otra parcela será justo la diferencia entre el producto generado por esta parcela y el que genera la parcela marginal. Dicho de otra forma, las horas de trabajo que “ahorra“ la fertilidad de la tierra (respecto de la tierra de mínima calidad que merece la pena cultivar) son justamente la parte que el arrendador de la tierra obtendrá como participación en el producto. Del mismo modo, la cantidad total de energía libre disponible para la economía mundial podría ser virtualmente infinita y, sin embargo, el agotamiento de las fuentes de energía más baratas seguiría teniendo consecuencias económicas, ya que requeriría el uso de un mayor volumen de mano de obra y capital para obtener la misma cantidad de energía económicamente útil.

En la contabilidad de los recursos minerales (Nordhaus, 2006), las “reservas“ se definen como la cantidad de recursos conocidos recuperables con la tecnología disponible en el entorno de los actuales precios de mercado. El stock de reservas probadas de un mineral está determinado por el resultado de tres flujos contables: producción, descubrimientos y reclasificaciones. La producción reduce la cantidad de reservas probadas por la cantidad

producida y los descubrimientos la incrementan en la cantidad descubierta. Las reclasificaciones vinculan los flujos contables con las fuerzas económicas: cuando los precios aumentan o la tecnología mejora, algunos recursos que no eran económicamente recuperables pueden volverse rentables y, en consecuencia, se “reclasifican” como reservas. Dos fuerzas opuestas dominan la historia de la minería metálica en los últimos dos siglos: por un lado, ha habido una reducción sostenida en la “ley de la mena” de los yacimientos en producción mineral, tanto en valor promedio como en varianza (Mudd, 2009). En línea con la teoría económica, en el inicio de la exploración geológica se observan fuertes oscilaciones en las leyes de mineral promedio relacionadas con el descubrimiento de nuevos yacimientos pero cuando el conocimiento geológico mejora, la regla de extracción de recursos por orden de costes dirige el mercado (Reynolds, 1999). Esto significa (ver Figura 2.1, extraída de Mudd 2009) que la reducción en la calidad de los recursos minerales como resultado del agotamiento está bien documentada.

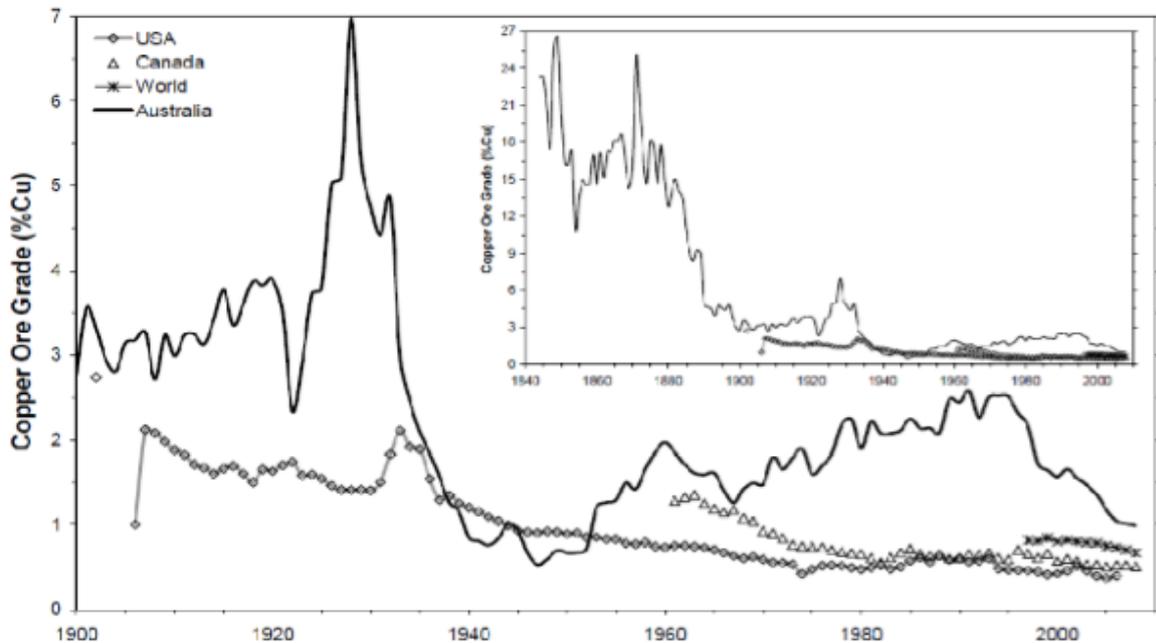


Figura 2.1: Ley de la mena de los yacimientos de cobre en Australia y en el mundo. Fuente: Mudd, 2009

Por otro lado los precios reales de los metales se observan estacionarios y la producción crece exponencialmente sin una reducción de las reservas (ver Figura 2.2, para el caso del cobre, que es típico). Esto significa que durante la Revolución Industrial la mejora de la productividad en el descubrimiento y extracción de minerales siempre ha sido capaz de superar los efectos del agotamiento. Si hacemos la hipótesis de que el crecimiento de la productividad puede ser sostenido indefinidamente y el recurso agotable es sustituible en la función de producción, los recursos agotables pueden utilizarse de manera sostenible si cualquier consumo de capital natural se compensa con un aumento del stock de capital producido (Dasgupta, 2001; Gelb, 2011). Por otra parte para modelos con depreciación de capital, sin crecimiento de productividad y con un recurso agotable (como el que se propone en este capítulo), ningún nivel de consumo positivo es sostenible (Dasgupta y Heal, 1974).

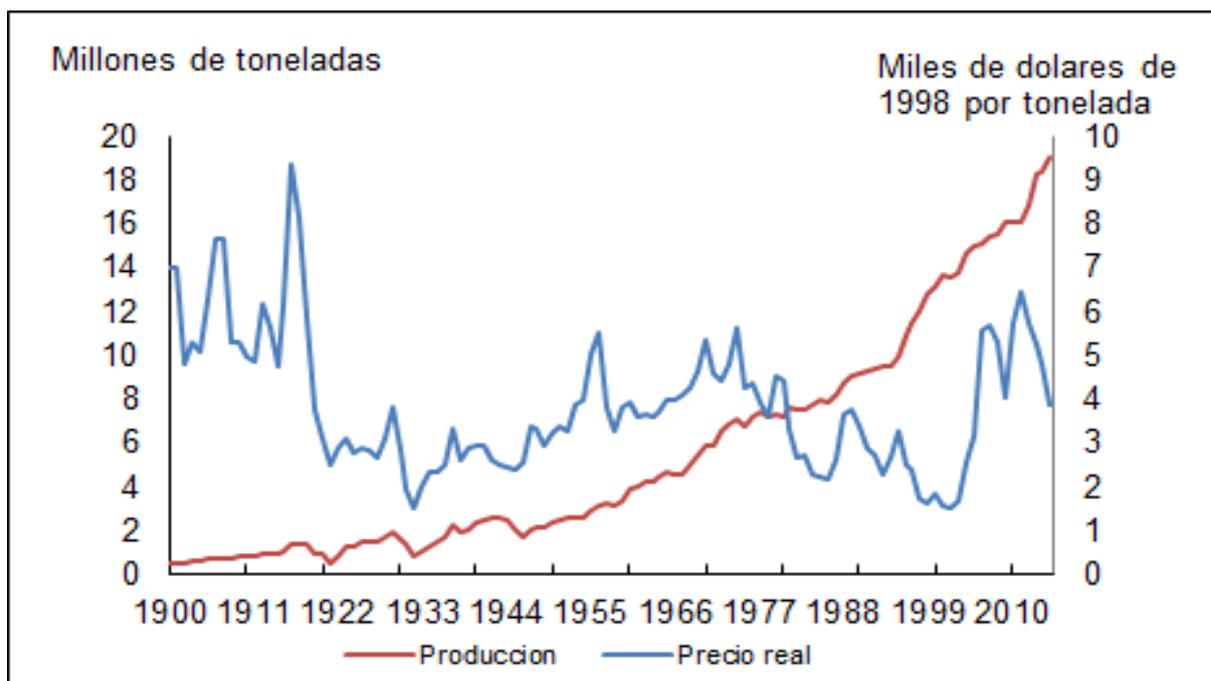


Figura 2.2: Precios reales (dólares de 1998) y producción primaria (excluido reciclaje) del cobre desde 1900. Fuente: US Geological Survey

En el caso de la extracción de combustibles fósiles encontramos los mismos hechos estilizados que hemos en el caso de los minerales metálicos (ver Figura 2.3). Se observa un

aumento de reservas en el periodo de 1970-2010: es decir, los descubrimientos y reclasificaciones han más que reemplazado la producción. Los precios reales no muestran una tendencia perceptible: sus altos niveles en la primera década del siglo XXI son análogos a los alcanzados en los años setenta del siglo XX, y luego han vuelto a descender. Las reservas probadas de gas y petróleo están ligeramente por encima de los cincuenta años de producción corriente, y superan el siglo en el caso del carbón.

Utilizando la TRE como la medida de calidad para los recursos de combustibles fósiles (ver Figura 2.4) el mismo patrón de agotamiento del resto de la industria minera es evidente: la calidad de los recursos (medidos según la TRE) disminuye a lo largo del tiempo para la industria del petróleo y el gas en los EE. UU. y la TRE desempeña el mismo papel de indicador de calidad en la extracción de combustibles fósiles que la “ley de la mena” ocupa en la minería de metales.

Como consecuencia de lo anterior, para la representación de los recursos energéticos globales en un modelo económico, la simple exposición del stock de reservas de los principales combustibles primarios (petróleo, gas, carbón y uranio) está incompleta porque los recursos infra-marginales que actualmente no es rentable recuperar no están incluidos en las reservas probadas, pero algunos de ellos se volverán rentables en el curso del proceso de agotamiento. Desde un punto de vista económico, una descripción económica más completa de los recursos disponibles de un producto mineral dado sería una curva que clasificase su stock por coste de extracción. Aunque ninguna institución está publicando actualmente estas curvas para las reservas mundiales de los principales combustibles primarios, se realizó un análisis similar para los recursos de carbón de los EE.UU. (Zimmerman, 1977) y más recientemente se ha hecho ese estudio para los recursos petrolíferos (Aguilera, Eggert y otros, 2009).

Con el auto-consumo de energía como medida del agotamiento relativo, podemos clasificar todos los recursos energéticos (medidos en unidades de energía corregida por calidad) por sus niveles de auto-consumo. La curva de auto-consumo presenta para cada nivel de

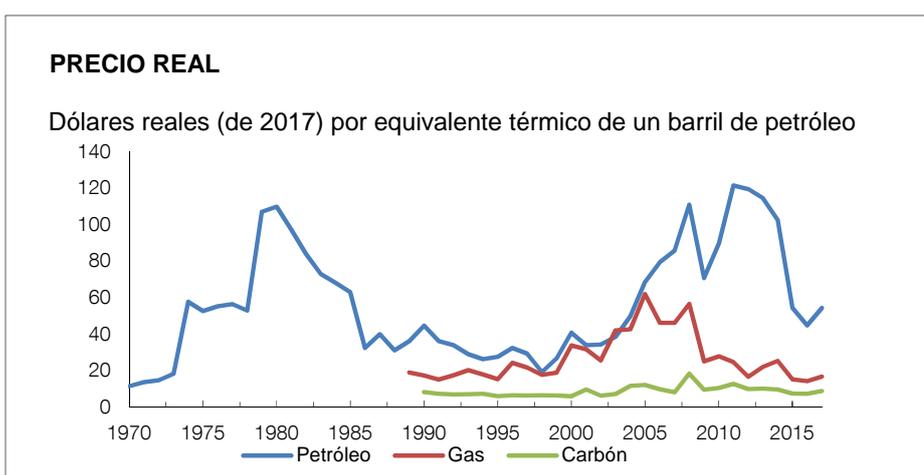
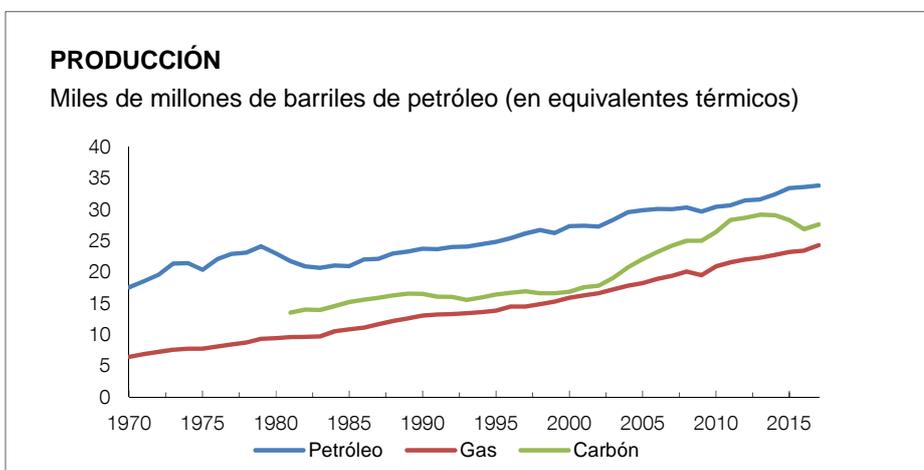
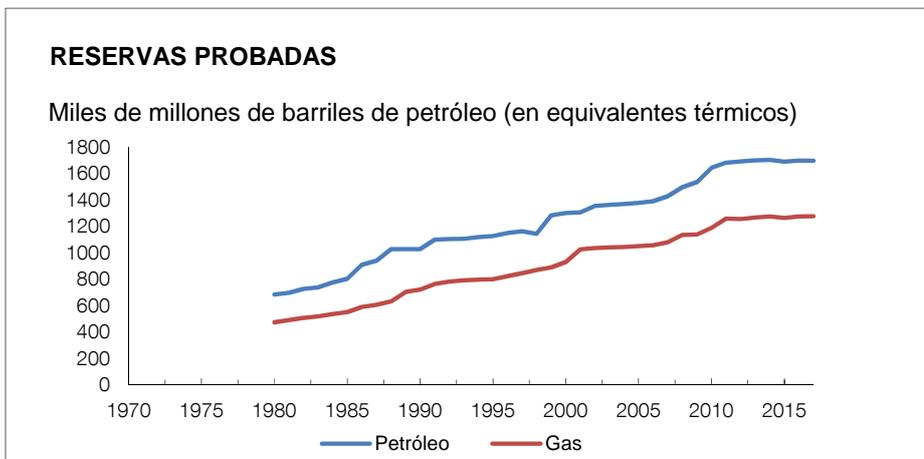


Figura 2.3: Reservas probadas, producción anual y precio de los principales combustibles fósiles. Fuente: BP Statistical Review of World Energy

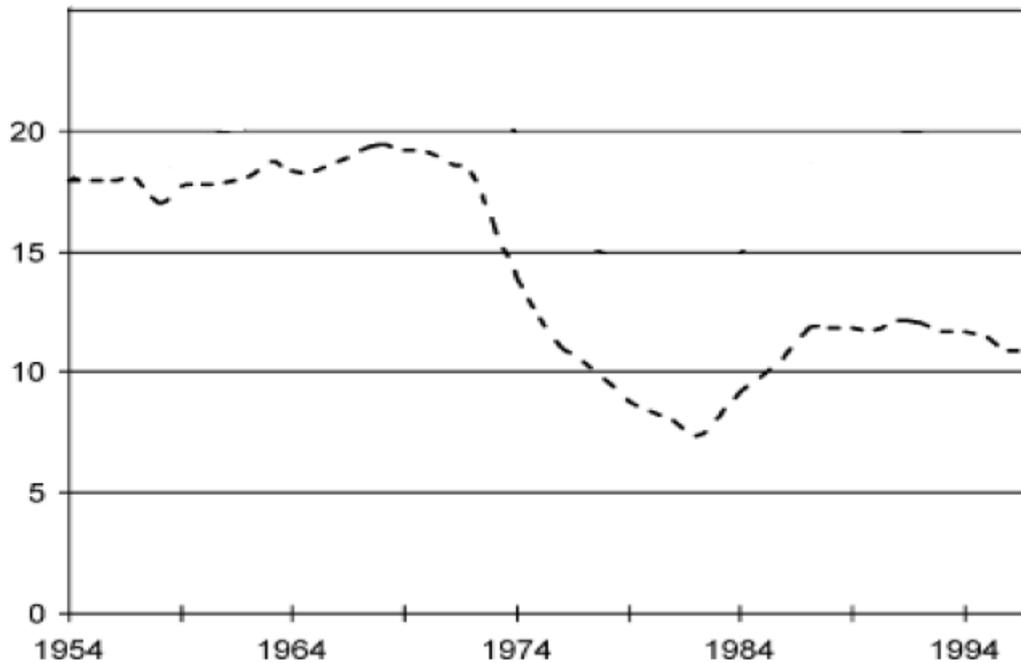


Figura 2.4: *TRE del petróleo y el gas en los Estados Unidos. Fuente: Cleveland (2001).*

auto-consumo la cantidad total de energía bruta disponible (llamaremos a esa curva $Q(\cdot)$ en el resto de este documento). A diferencia de las mediciones de pura calidad física de los recursos, como la “ley de la mena”, el auto-consumo energético puede verse afectado por el cambio tecnológico: en la curva de auto-consumo, el progreso tecnológico daría lugar a un movimiento de la masa debajo de la curva hacia la izquierda.

La curva de auto-consumo es el análogo en la economía de la energía a las curvas de tonelaje por ley de un mineral utilizadas para clasificar los recursos minerales metálicos (ver Gerst 2008 y Stürmer 2012). En la Figura 2.5 se muestra el esquema de una curva de auto-consumo que proporciona para cada nivel de auto-consumo (en porcentaje) el volumen de energía (corregido para la calidad) en unidades de energía. En el panel izquierdo, la energía disponible para la economía mundial es finita, mientras que en el panel derecho hay una fuente de energía renovable escalable (la llamada “tecnología de respaldo”, ver Nordhaus

1973) representada como una asíntota.⁵

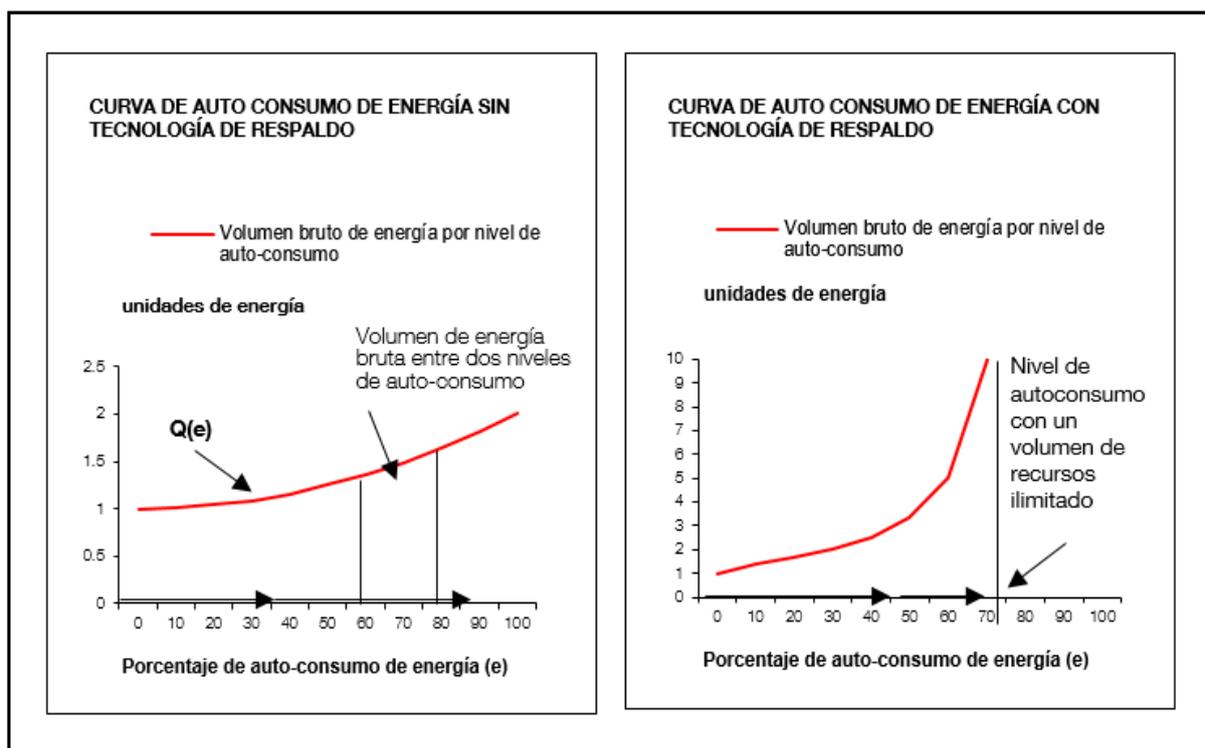


Figura 2.5: Esquema de dos curvas de auto-consumo energético

Dada la curva $Q(\cdot)$, la energía total disponible para la economía mundial sería:

$$E_{gross} = \int_0^1 Q(s)ds$$

Pero una parte de esa energía tendría que ser utilizada para producir energía para el propio sector energético, por lo que la energía neta disponible para su uso final sería:

$$E_{net} = \int_0^1 (1 - s)Q(s)ds$$

⁵Entre los candidatos a ser la “tecnología de respaldo”, se puede destacar la energía solar o los reactores reproductores nucleares (Manne, 1974).

La curva de auto-consumo de energía será la representación de la calidad de los recursos en nuestro modelo.

2.2.2. Capital instalado en el sector energético: el vínculo entre el stock de reservas y la producción corriente

El auto-consumo energético es una buena medida del agotamiento energético absoluto. El sistema económico (como todos los sistemas macroscópicos) necesita obtener energía libre de su entorno y no puede funcionar en base a fuentes de energía que generen menos energía útil de la que consumen. Las fuentes de energía con auto-consumo superior al 100 % no son fuentes sino “sumideros de energía“.

Pero para fuentes de energía con un auto-consumo inferior al 100 %, la relevancia de la TRE no es inmediata. Supongamos que una economía tiene un sector energético con un 10 % de auto-consumo y el sector energético produce 100 unidades de energía para el resto de la economía (produce, entonces, $100/(1-0.1) = 111$ unidades energéticas, consumiendo para sí 11,1 unidades de energía). Cuando el auto-consumo aumenta al 20 % para producir 100 unidades de energía neta el sector energético tendría que producir $(100 / (1-0,2) = 125)$ unidades brutas de energía. Siguiendo este ejemplo es obvio que para un auto-consumo menor del 100 % *siempre es posible expandir las actividades del sector energético para alcanzar cualquier nivel deseado de producción de energía neta*. El auto-consumo es un índice de eficiencia, y un índice de eficiencia por sí solo no puede imponer ningún límite a la producción de energía final, porque cualquier pérdida de eficiencia siempre puede compensarse con un aumento de la actividad bruta. Esta es una observación conceptual importante, ya que implica que cualquier modelo económico que incluya la TRE como variable tiene que incluir explícitamente una descripción del “coste no energético de expandir el sector energético“ (por ejemplo, el uso de capital, los costes ambientales, etc). En el modelo incluido en este capítulo, un deterioro del auto-consumo de energía obliga a la economía a

utilizar más capital (producido y mantenido con mano de obra humana) para obtener la misma producción de energía final.

El tema más importante en la controversia a corto y medio plazo sobre la escasez del petróleo (ver Hirsch, Bezdeck y Wendling 2005 y Cleveland y Kauffman 1991) se refiere a las dificultades para convertir las reservas en producción cuando la economía mundial se ve obligada a utilizar depósitos de energía más marginales (Robelius, 2007). Convertir las reservas en producción no es un proceso que se pueda realizar a voluntad. Aunque en muchas ocasiones (especialmente en 1973) los precios del petróleo han aumentado de manera muy significativa, la capacidad de la industria petrolera para responder a estos aumentos de precios con una rápida expansión del suministro ha demostrado ser limitada. La razón de esta rigidez es que convertir las reservas en producción requiere la instalación de un stock adicional de capital.⁶ El stock de capital necesario para producir una unidad de energía es mayor cuanto más marginal (mayor auto-consumo energético necesita) es el recurso energético que se debe extraer.

En el modelo que se presentará en la siguiente sección, se supone que la cantidad de energía que se puede obtener con un stock dado de capital extractivo es proporcional al nivel de auto-consumo energético de la fuente de energía que estamos considerando. Por ejemplo, si una cantidad dada de capital extractivo es capaz de extraer 100 unidades de energía (corregida de calidad) con un auto-consumo del 10%, para un auto-consumo del 20%, la misma cantidad de capital solo puede extraer solo un flujo de 50 unidades de energía. Esto significa que suponemos que el sector de energía tiene una función de producción de proporciones fijas (para los insumos de capital y energía).

⁶Aparte de los retrasos relacionados con el proceso de exploración geológica.

2.3. Resultados

A fines de los años setenta, después de la crisis del petróleo, hubo una gran controversia entre quienes consideraban que la escasez de recursos naturales generaba restricciones vinculantes e inminentes al crecimiento económico y quienes consideraban que el aumento de la productividad y la sustitución de recursos siempre hacían posible que la economía mundial creciese (Stiglitz, 1974; Georgescu-Roegen, 1975). Después de este periodo los economistas ecológicos y la Economía Energética general han continuado la controversia sobre la sustitución entre energía y capital con la Economía Ecológica ofreciendo una visión más pesimista de los límites de la sustitución entre fuentes de energía y de las fuentes de energía y el capital, y los economistas energéticos convencionales siendo más optimistas sobre las posibilidades de sustitución (a largo plazo).

Existe una evidencia empírica significativa de sustituibilidad a largo plazo entre energía y capital. En Sweeney (1984) se exponen los siguientes hechos estilizados sobre la sustitución entre distintas fuentes de energía y entre la energía y el capital:

1. *“Las respuestas de la demanda a precios de energía más altos generalmente implican la sustitución de la energía por otro factor de producción o de una fuente de energía por otra o ambos mecanismos”.*
2. *“La mayor parte de la energía se utiliza junto con capital de larga duración que una vez instalado tiene requisitos de uso de energía bastante fijos”.*
3. *“Los ajustes del precio de la energía a largo plazo tienden a ser sustancialmente mayores que los ajustes que se producen después de unos años o incluso de una década. Por lo tanto, los ahorros de energía y la sustitución entre combustibles motivada por aumentos de precios pueden seguir actuando durante muchos años después de que los precios hayan dejado de subir”.*

Para tener en cuenta las discrepancias entre la sustitución a largo y corto plazo, se

puede utilizar un modelo de capital “putty-putty“ (Atkeson y Kehoe, 1999).⁷ Dado que nuestro interés es el efecto del agotamiento de los recursos energéticos primarios sobre las tendencias a largo plazo en el consumo y el bienestar mundiales, en las funciones de producción se debe interpretar que las elasticidades de sustitución relevantes entre capital, trabajo y energía son las de “largo plazo“.

Por ello proponemos representar el proceso productivo mediante una función de producción donde el trabajo y los “servicios de capital“ se combinen mediante una función Cobb-Douglas, que explica los hechos estilizados de crecimiento a largo plazo más importantes (Stresing, Lindenberger y Kümmel, 2008). Por otro lado, los servicios de capital son el resultado de una función de producción de CES que combina capital y energía (ver Kemfert 1998 y Kemfert y Welsch 2000, para un análisis del desempeño de las funciones CES anidadas).

$$F(K, E, L) = \left[\left(a [K]^{-\beta} + (1 - a) [E]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^{\alpha} L^{1-\alpha}$$

Donde, K es capital, L es mano de obra y E es energía final (corregida por calidad) generada por el sector de producción de energía. El parámetro α es la productividad marginal de los servicios de capital ($[1-\alpha]$ es la productividad marginal del trabajo), y β es el parámetro de sustitución de capital-energía a largo plazo en la función de producción CES-Cobb Douglas:

$$\sigma = \frac{1}{1 + \beta}, \beta \in (-1, \infty)$$

Cuando β tiende a -1 la elasticidad de sustitución entre capital y energía tiende a ser perfecta, lo que significa que es fácil compensar el agotamiento de los recursos energéticos

⁷En estos modelos, el capital tiene características heterogéneas por fecha de inversión, de forma que los altos precios de la energía se traducen en la selección de un stock de capital con alta eficiencia energética en los años donde existían expectativas de un futuro con altos precios de la energía

con un aumento del stock de capital, mientras que para β tendiendo a infinito la función CES tiende a estar más cerca de una función de proporciones fijas, donde el nivel de la producción está determinado por el insumo menos abundante. Para $\beta = 0$, la función CES es la Cobb-Douglas. Para las funciones del CES, σ es exactamente la elasticidad de Morishima (Anderson y Moroney, 1993), un parámetro cuyo valor de largo plazo se estima que se mueve en $\sigma \in (0,70, 1,73)$, con una mejor estimación de 1.21 (Koetse, Groot y Florax, 2008), lo que implica que $\beta \in (-0,42, 0,42)$ con una estimación central de $-0,17$.

Presentamos un modelo de tipo Ramsey-Hotelling (Ramsey, 1928; Hotelling, 1931; Chakravorty, Roumasset y Tse, 1997; Chakravorty, Moreaux y Tidball, 2008) que describe la evolución de una economía poblada por un hogar representativo con aversión al riesgo cuyo consumo aparece descontado a una tasa ρ .

$$\max_{c,l,m} \int_0^T e^{-\rho t} u(c_t) dt$$

El agente representativo está dotado de una cantidad fija de trabajo (una unidad en cada momento por persona) y la función de producción es la CES-Cobb Douglas presentada anteriormente. En la función CES-Cobb-Douglas, la energía bruta extraída (v) se corrige por el auto-consumo de energía (e) en el momento t . El resto es una ecuación clásica de acumulación-depreciación del capital.

$$\dot{k}_t = \left[\left(a k_t^{-\beta} + (1-a) [(1-e_t)v_t]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^\alpha l_t^{1-\alpha} - c_t - \delta k_t$$

El sector energético se define como el que convierte los recursos energéticos primarios en energía utilizable: para fijar ideas, un motor de automóvil no es parte del sector energético, pero sí lo es la gasolinera donde reposta. El sector energético se modeliza por separado del resto de la economía para evitar una doble contabilización, ya que los costes directos de energía y el contenido energético del capital en el sector energético ya están descontados

en la definición de auto-consumo energético.

Si la producción de energía en el modelo se realizase con capital de propósito general (k), el coste de producción de energía se contabilizaría doblemente: por un lado, el auto-consumo de energía sería restado de la energía bruta producida en la función de producción $[(1 - e)v]$ y por otro lado, el sector energético utilizaría también la energía integrada en el capital de uso general utilizado por el sector energético. Para evitar esa doble contabilización, en el modelo que presentamos, el capital utilizado en el sector energético se produce sin gasto de energía. Por ejemplo, una unidad de maquinaria (un martillo) utilizada en la economía general requiere para su producción un consumo de energía que aparece en la función CES-Cobb-Douglas anterior. Si se utiliza el mismo martillo en el sector productor de energía, la energía invertida en su producción se considera un auto-consumo de energía $(1 - e_t)$ y no debe aparecer en la función de producción de esa unidad de capital.

Por tanto en este modelo, k^E representa el capital necesario para producir m que es el flujo de inversión que se acumula en el stock de capital extractivo M . Para representar estas relaciones la siguiente ecuación es la misma ecuación de acumulación-depreciación de capital que en la economía general, pero sin el input energético:

$$\dot{k}_t^E = (k_t^E)^\alpha (1 - l_t)^{1-\alpha} - m_t - \delta k_t^E$$

La maquinaria para el sector energético (m) se acumula en un stock de maquinaria de extracción y procesamiento de energía (M).

$$\dot{M}_t = m_t - \delta M_t$$

Por tanto M representa el capital productor de energía (centrales nucleares, plataformas petrolíferas, minas de carbón y centrales eléctricas que convierten la energía primaria en energía útil), mientras que k^E representa el capital utilizado para producir ese capital

(incluidas las fábricas que producen el equipo de energía, las fundiciones que producir el acero utilizado para ese equipo, y el equipo de construcción utilizado para construir cualquier instalación en el sector energético) pero sin considerar ningún coste de energético, ya que estos se encuentran directamente incorporados en la curva de auto-consumo de energía.

La instalación de capital en el sector energético puede aumentar la producción de energía, pero a medida que la economía avanza hacia mayores niveles de auto-consumo (debido al agotamiento de los recursos de mayor calidad), una cantidad determinada de capital puede extraer un volumen decreciente de energía bruta (ver Subsección 2.2.2). La producción de energía es directamente proporcional al capital instalado en el sector productor de energía e inversamente proporcional al auto-consumo actual de energía:

$$v_t = \frac{M_t}{e_t}$$

Hay un coste no energético en la producción de energía: el coste de mantener el stock de capital M , para producir energía bruta v . En estado estacionario ese coste se deriva de la mano de obra utilizada para reemplazar el capital depreciado en el sector. Dada $Q(\cdot)$, la curva de auto-consumo (ver Subsección 2.2.1), el agotamiento se representa como el movimiento del nivel de auto-consumo contemporáneo (e_t) hacia un nivel más alto, y el movimiento de esa variable de agotamiento es directamente proporcional al extracción de energía bruta e inversamente proporcional a la cantidad de recursos en cada nivel de auto-consumo.

No hay niveles negativos de trabajo ($l_t, 1 - l_t$), consumo (c_t), o inversión. Por tanto:

$$\begin{aligned}
0 &\leq l_t \leq 1 \\
0 &\leq m_t \leq (k_t^E)^\alpha (1 - l_t)^{1-\alpha} - \delta k_t^E \\
0 &\leq c_t \leq \left[\left(a k_t^{-\beta} + (1 - a) [(1 - e_t) v_t]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^\alpha l_t^{1-\alpha} - \delta k_t
\end{aligned}$$

Finalmente, resolver el siguiente modelo de control óptimo con c_t, l_t, m_t como controles y k_t, k_t^E, M_t, e_t como variables de estado proporcionaría las trayectorias del consumo, el bienestar y la cantidad de mano de obra dedicada al sector energético:

$$\begin{aligned}
&\max_{c,l,m} \int_0^T e^{-\rho t} u(c_t) dt \\
\dot{k}_t &= \left[\left(a k_t^{-\beta} + (1 - a) [(1 - e_t) v_t]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^\alpha l_t^{1-\alpha} - c_t - \delta k_t \\
\dot{k}_t^E &= (k_t^E)^\alpha (1 - l_t)^{1-\alpha} - m_t - \delta k_t^E \\
\dot{M}_t &= m_t - \delta M_t \\
v_t &= \frac{M_t}{e_t} \\
\dot{e}_t &= \frac{v_t}{Q(e_t)} \\
0 &\leq l_t \leq 1 \\
0 &\leq m_t \leq (k_t^E)^\alpha (1 - l_t)^{1-\alpha} \\
0 &\leq c_t \leq \left[\left(a k_t^{-\beta} + (1 - a) [(1 - e_t) v_t]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^\alpha l_t^{1-\alpha}
\end{aligned}$$

2.4. Discusión

Si los recursos energéticos disponibles para la economía mundial son finitos no hay un estado estacionario para el modelo Ramsey-Hotelling-TRE: dado que no se ha incluido un término de crecimiento de la productividad en el modelo, el agotamiento de los recursos da lugar a una trayectoria de consumo que tiende a cero (ver Dasgupta y Heal (1974) para obtener resultados generales sobre recursos agotables sin crecimiento de productividad).

Por otro lado, si existe una fuente de energía escalable y renovable (generadores solares

o nucleares, por ejemplo), hay una trayectoria del modelo que agota de manera óptima los recursos no renovables hasta el punto donde la primera fuente de energía renovable escalable suministra toda la demanda de energía (“la tecnología de respaldo“, ver Nordhaus 1973). En este caso, hay un estado estacionario, que se puede calcular fácilmente fijando $e_t = e$. Para calcular el estado estacionario en primer lugar observamos que las tres últimas desigualdades en el modelo Ramsey-Hotelling-TRE se cumplen trivialmente en un estado estacionario y pueden eliminarse. Entonces, el modelo (con e como parámetro en lugar de como variable) se convierte en:

$$\begin{aligned} & \text{máx}_{c,l,m} \int_0^T e^{-\rho t} u(c_t) dt \\ & \dot{k}_t = \left[\left(a k_t^{-\beta} + (1-a) \left[\left(\frac{1-e}{e} \right) M_t \right]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^{\alpha} l^{1-\alpha} - c_t - \delta k_t \\ & \dot{k}_t^E = (k_t^E)^{\alpha} (1-l_t)^{1-\alpha} - m_t - \delta k_t^E \\ & \dot{M}_t = m_t - \delta M_t \end{aligned}$$

Usando las condiciones necesarias de Pontryaguin para el sistema anterior e imponiendo las condiciones de estado estacionario (las variables de estado no cambian, y tienen por tanto derivada nula) se puede calcular un estado estacionario para las variables l, k, k^E, m, M, c dados los parámetros $\alpha, a, \delta, \rho, \beta, e$. Para simplificar las ecuaciones, se definen los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} \chi &= \left(\frac{\rho+\delta}{\alpha(1-a)} \right)^{\frac{\alpha+\beta}{\beta(\beta+1)}} \left(\frac{(\delta+\rho)}{\alpha} \right)^{\frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{\alpha+\beta}{\beta(\beta+1)}} \left[\left(\frac{a\alpha}{\delta+\rho} \right) \right]^{\frac{1}{(\beta+1)}} \left[\frac{(\delta+\rho-\alpha\delta)}{\alpha\delta} \left(\frac{(\delta+\rho)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} \right]^{\frac{\alpha+\beta}{\beta}} \\ \zeta &= \chi \left[\left(\frac{1-e}{e} \right) \right]^{\frac{\alpha+\beta}{(\beta+1)}} \end{aligned}$$

Luego, la siguiente ecuación nos permite calcular el trabajo en el sector no energético (1) en estado estacionario. Dicha ecuación se puede resolver numéricamente:

$$\left(a \left[\zeta (1-l)^{\frac{\alpha+\beta}{\beta}} l^{-\frac{\alpha+\beta\alpha}{\beta(\beta+1)}} \right]^{-\beta} + (1-a) \left[\left(\frac{1-e}{e} \right) \frac{(\rho+\delta-\alpha\delta)}{\alpha\delta} \left[\frac{\alpha}{(\rho+\delta)} \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} (1-l) \right]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} l^{\frac{1}{\beta}}$$

$$(1-l)^{-\frac{(\beta+1)}{\beta}} = \left[\left(\frac{\rho+\delta}{\alpha a} \right) \zeta^{(\beta+1)} \right]^{\frac{1}{\alpha+\beta}}$$

La solución numérica de l en la ecuación anterior permite calcular analíticamente el estado estacionario de todas las variables:

$$k = \left[\chi \left[\left(\frac{1-e}{e} \right) \right]^{\frac{\alpha+\beta}{(\beta+1)}} \right] (1-l)^{\frac{\alpha+\beta}{\beta}} l^{-\frac{\alpha\beta+\alpha}{\beta(\beta+1)}}$$

$$k^E = \left(\frac{(\delta+\rho)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} (1-l)$$

$$m = \delta M$$

$$M = \frac{(\delta+\rho-\alpha\delta)}{\alpha\delta} k^E = \frac{(\delta+\rho-\alpha\delta)}{\alpha\delta} \left(\frac{(\delta+\rho)}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\alpha-1}} (1-l)$$

$$c = \left[\left(ak^{-\beta} + (1-a) \left[\left(\frac{1-e}{e} \right) M \right]^{-\beta} \right)^{-\frac{1}{\beta}} \right]^{\alpha} l^{1-\alpha} - \delta k$$

Con las ecuaciones anteriores, se realizará un análisis de estática comparativa del estado estacionario. La lista completa de los parámetros que determinan c, l, m, k, k^E, M, e es $\alpha, a, \delta, \rho, \beta, e$. Todos los parámetros serán fijos excepto β , para el cual se elegirán unos pocos valores representativos y para esos valores se mostrará cómo el porcentaje de mano de obra utilizada en el sector no energético (l) y el nivel de consumo (c) evolucionan con el nivel de auto-consumo energético (entre 2% y 60%). Como se discutió en la Sección 2.3, el rango empírico para β es $\beta \in (-0,42, 0,42)$ con una mejor estimación de -0.17, pero la sustituibilidad a largo plazo entre capital y energía es el tema de una gran controversia, por lo que en este trabajo consideraremos un rango más amplio de valores para β .

La depreciación se establece en 4% ($\delta = 0,04$) como un compromiso entre estimaciones empíricas muy diferentes: Musgrave (1992) estima que la depreciación se mueve entre 3% y 3.8% anualmente, mientras que Nadiri y Prucha (1996) estiman un 5.9% para activos tangibles e I + D en el sector manufacturero estadounidense.

El factor de descuento subjetivo se supone que es un 2 % ($\rho = 0,02$), en el rango estimado de Bezil y Hansen (1999) (1 % -5 %). La función de bienestar subjetivo ($u(\cdot)$), que determina la aversión al riesgo) no desempeña ningún papel en el nivel de estado estacionario de las variables (pero es importante determinar la velocidad de convergencia), por lo que no se elegirá en este ejercicio. Para la parte Cobb-Douglas de la función CES-Cobb-Douglas el producto marginal de los servicios de capital es del 40 % ($\alpha = 0,4$), mientras que el producto marginal del trabajo es del 60 % ($1 - \alpha = 0,6$), que son sus niveles estándar en la literatura para países desarrollados (ver Bentolila y Saint-Paul 2003 y Danxia Xie 2011).

Los servicios de capital se producen combinando capital con energía bajo una función de producción CES. La función de producción de CES tiene dos parámetros: el parámetro a da el peso de los factores (capital y energía) en la producción de servicios de capital y β es un parámetro que regula la elasticidad de sustitución entre energía y capital. Cuando $\beta = 0$, la función de producción tiene un parámetro de Cobb Douglas. Elegimos ($a = 0.1$), que para el caso Cobb-Douglas (donde β tiende a 0), genera un producto marginal de la energía en el entorno del 4 %, que está en línea con las estimaciones empíricas (Atkeson y Kehoe, 1999).

En el Cuadro 2.2 presentamos el valor elegido para todos los parámetros del modelo (y la referencia que lo justifica) en el ejercicio de estática comparativa de estado estacionario.

En el estado estacionario (donde se detiene la acumulación de capital), para una e dada, el único factor escaso es la mano de obra, por lo que la mejor medida del tamaño relativo de los sectores de energía y no energía es precisamente el uso de mano de obra en el sector no energético (l) y en el sector energético ($1 - l$). En la Figura 2.6 se muestran las curvas $l_\beta(e)$ para $\beta \in \{-0,5; -0,3; -0,1; 0,1; 0,5; 1; 2; 5\}$. La curva correspondiente al caso de Cobb-Douglas (donde β tiende a 0) debe moverse entre las curvas con $\beta = -0,1$ y $\beta = 0,1$.

Para $\beta < 0$, cuando la energía se vuelve más costosa se sustituye fácilmente en el

Cuadro 2.2: *Parámetros del modelo y rango de sus estimaciones empíricas.*

Factor Económico	Parámetro	Valores	Rango Empírico
Tasa de descuento subjetivo	ρ	2 %	1 %-5 % (Belzil y Hansen, 1999)
Participación de los servicios del capital en el producto	α	40 %	Para los países de la OECD: 30 %-40 % (Bentolila, 2003). Países en desarrollo: 40-50 % (Danxia Xie, 2011)
Parametro de sustitución entre energía y capital	β	-0.5; -0.3; -0.1; 0.1; 0.5; 1; 2; 5	Rango del percentil 95: (-0,428-0,421); Mejor estimacion puntual:-0,173 (Koetse, Groot y Florax, 2006)
Parametro de proporción entre capital y energía	a	4 %	Atkenson y Kehoe, 1999
Depreciación del capital	δ	4 %	Musgrave, 1992: Rango: (3 %-3,8 %); Mejor estimacion puntual: 3,4 %; Nadiri y Prucha, 1996; Mejor estimacion puntual: 5,9 %
Auto-consumo (inversa de la TRE)	e	2 – 60 %	Se explora un rango amplio

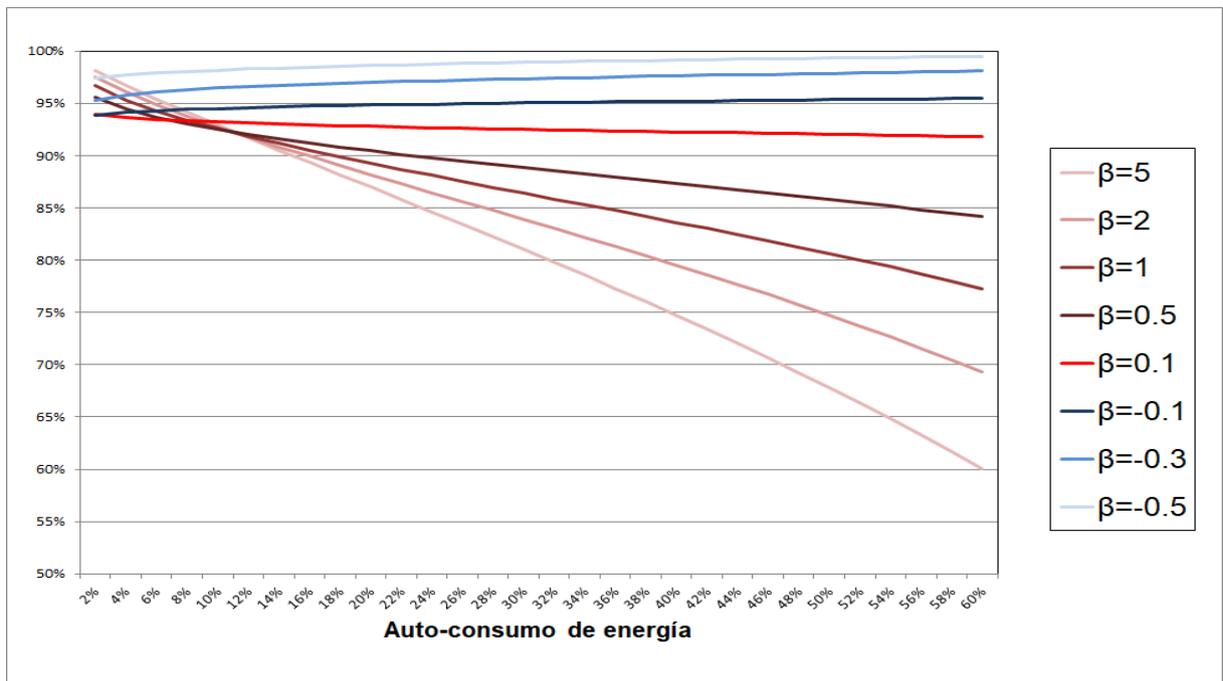


Figura 2.6: *Porcentaje de la fuerza de trabajo en el sector no energético, según auto-consumo energético para diferentes niveles del parámetro de sustitución (β)*

proceso de producción, y hay un aumento en el stock de capital del sector no energético (por ejemplo, con inversión en eficiencia energética), mientras que la cantidad recursos (horas de trabajo) destinados a la producción de energía se reduce. Para $\beta > 0$, la economía reacciona al agotamiento con un aumento en el tamaño del sector energético porque la energía no puede ser fácilmente sustituida por capital, por lo que para maximizar el consumo, se deben dedicar más recursos a la producción de energía. Para el caso de Cobb-Douglas (β tiende a 0), se puede demostrar que el tamaño del sector energético es constante para cualquier nivel de auto-consumo.

En la Figura 2.6 las curvas $c_\beta(e)$ se muestran para los mismos parámetros que antes:

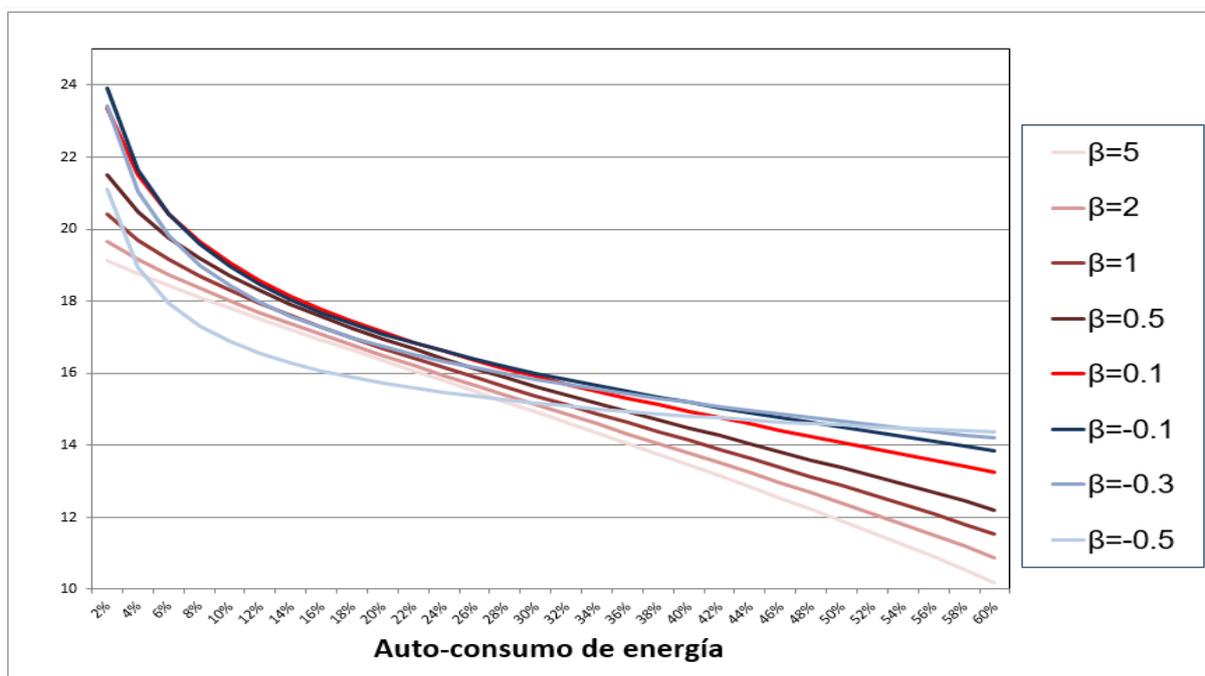


Figura 2.7: Nivel de consumo del agente representativo, según auto-consumo energético para diferentes niveles del parámetro de sustitución (β)

Para el consumo, el gráfico muestra siempre una reducción con el agotamiento, porque un peor auto-consumo (baja calidad de los recursos energéticos) siempre tiene un impacto negativo en el consumo agente representativo. Este descenso es más constante para

una mayor β , mientras que para un β menor la disminución es muy rápida para niveles de auto-consumo mas reducidos (si la sustitución entre energía y capital es fácil, niveles muy bajos de auto-consumo de implican un uso masivo de “energía fácil“ que soporta un consumo final muy alto, pero un pequeño aumento del auto-consumo de energía conduce a una rápida reducción de los niveles de consumo). Después de las primeras etapas de agotamiento, la facilidad de sustitución entre energía y capital reduce drásticamente el impacto de la reducción de la calidad de los recursos sobre el consumo del agente representativo (ver líneas azules en la Figura 2.7). Por otro lado, cuando la sustitución de energía-capital es más difícil, el sistema económico no puede aprovechar tan intensivamente la “energía barata“ y, como consecuencia, también es menos vulnerable a un cambio en el auto-consumo energético en los niveles de auto-consumo más reducidos, pero cuando el agotamiento avanza, la facilidad de sustituir energía por capital no protege al consumidor representativo del agotamiento del recurso energético.

El impacto en el consumo final de un aumento del auto-consumo de energía del 10 % al 20 % y del 10 % al 30 % se muestra en el Cuadro 2.3. Los impactos serían significativos, y en el caso del 10 % al 30 %, claramente el impacto en el consumo sería peor para los casos más inelásticos.

La interpretación directa del “modelo estático“ simplificado de esta sección es que describe la situación en la que existe una tecnología de respaldo con un nivel de auto-consumo (e). Lo que muestra cada curva de consumo y uso de la fuerza laboral por nivel de auto-consumo del modelo estático (Figuras 2.6 y 2.7) es precisamente el nivel de consumo en estado estacionario de economías con diferentes tecnologías de respaldo, cuyos valores de auto-consumo (e) son diferentes. Pero también es posible una interpretación dinámica: si el agotamiento de los recursos energéticos es muy lento en comparación con el tiempo necesario para acumular capital y los agentes son miopes sobre la futura abundancia de recursos energéticos (suponen que existe una cantidad ilimitada de recursos energéticos con el mismo auto-consumo que el actual), la dinámica de transición se vuelve casi irrelevante,

Cuadro 2.3: *Porcentaje de disminución del consumo en estado estacionario como resultado de un cambio en el auto-consumo energético.*

	El auto-consumo varia del 10 % al 20 %	El auto-consumo varia del 10 % al 30 %
$\beta = 5$	-8,2 %	-16,2 %
$\beta = 2$	-8,4 %	-16,0 %
$\beta = 1$	-8,8 %	-16,0 %
$\beta = 0,5$	-9,4 %	-16,4 %
$\beta = 0,1$	-10,1 %	-16,5 %
$\beta = -0,1$	-9,8 %	-15,6 %
$\beta = -0,3$	-9,1 %	-14,0 %
$\beta = -0,5$	-6,8 %	-10,1 %

y en cada punto del proceso de agotamiento, la economía está muy cerca del estado pseudo estacionario determinado por el nivel de auto-consumo de energía en ese momento.⁸

Dados los parámetros $\alpha, a, \delta, \rho, \beta$ hemos calculado las funciones $l(e), k(e), k^E(e), m(e), M(e), c(e)$ que caracterizan los estados estacionarios del modelo y (utilizando las ecuaciones de agotamiento del modelo completo), las siguientes ecuaciones aproximan la dinámica de agotamiento del modelo:

$$v_t = \frac{M_t}{e_t}; \dot{e}_t = \frac{v_t}{Q(e_t)} \Rightarrow \dot{e}_t = \frac{M(e_t)}{e_t Q(e_t)}$$

La ecuación anterior proporcionaría la velocidad del movimiento del sistema económico sobre las curvas en las figuras 4 y 5. La evolución de las variables de estado podría derivarse de las siguientes ecuaciones:

⁸Esta clase de hipótesis, muy habitual en la química matemática de las reacciones enzimáticas se llama hipótesis del “quasi estado estacionario”.

$$\{\dot{e}_t = \frac{M(e_t)}{e_t Q(e_t)}, l(e_t), k(e_t), k^E(e_t), m(e_t), M(e_t), c(e_t)\}$$

Por supuesto, cuanto más rápido es el proceso de agotamiento en relación con los procesos de ajuste de capital, y más orientado al futuro es el agente representativo de la economía, más diferente es la verdadera trayectoria dinámica que resulta de la solución del modelo completo de la Sección 2.3 de la trayectoria de pseudo-estados estacionarios.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un modelo de crecimiento de Ramsey-Hotelling con energía como insumo en la función de producción. La calidad del stock disponible de energía ha sido ordenada por su Tasa de Retorno Energético (TRE). Se han discutido los problemas de contabilidad energética relacionados con el TRE (calidad de la energía y análisis del ciclo de vida para el cálculo de energía neta), y se ha presentado la curva de auto-consumo de energía como la mejor representación matemática del total de recursos energéticos cuando la TRE es heterogénea. También se ha hecho una hipótesis para la relación entre el TRE y el uso de capital: que el flujo de energía en la economía es proporcional al capital instalado en el sector energético e inversamente proporcional al auto-consumo de energía de los recursos energéticos actualmente utilizados. Se ha elegido la función de producción CES-Cobb-Douglas por ser lo suficientemente flexible para describir una amplia gama de opiniones sobre la elasticidad de sustitución entre capital y energía a largo plazo. Con todos estos elementos se ha presentado el modelo de Ramsey-Hotelling-TRE, se ha calculado su estado estacionario para diferentes niveles de auto-consumo de energía y se ha realizado un análisis de estática comparativa de los estados estacionarios que generan los distintos parámetros del modelo. Utilizando el concepto de trayectoria de pseudo estados estacionarios se ha hecho una interpretación dinámica de la estática comparativa de los estados estacionarios.

El modelo propuesto nos ha brindado un marco riguroso para responder a la ambiciosa pregunta planteada por el artículo de Hall, Balogh y Murphy (2009): “¿Cuál es la TRE mínima que debe tener una sociedad sostenible?”. Desde un punto de diseño de políticas el resultado más interesante de nuestro trabajo ha sido el hecho de que, una vez incorporados en un marco neoclásico, los efectos “en espiral de la muerte“ de una reducción sustancial en la TRE de las fuentes de energía en uso no parecen tan dramáticos como sugiere parte de la literatura en Economía Ecológica. El experimento numérico sobre el impacto del agotamiento de los recursos energéticos en el consumo de estado estacionario concluye que un aumento del auto-consumo de energía del 10 % al 20 % tendría un impacto significativo para todos los parámetros de elasticidad considerados pero nunca reduciría el consumo del agente representativo en más del 11 % (para los valores realistas de *beta*), y un cambio en el auto-consumo de energía del 10 % al 30 %, reduciría el consumo en estado estacionario en menos del 17 %.

El auto-consumo de energía en el petróleo y el gas ha pasado de alrededor del 5 % a más del 10 % entre 1954 y 1997, y el del carbón aún está cerca del 5 %, lo que proporciona cierta intuición del impacto del agotamiento geológico de los recursos energéticos en el crecimiento tendencial: parece que será significativo pero no dominante en las próximas décadas. Además, en el rango probable de variación del auto-consumo de energía, la capacidad de sustitución de energía por capital solo afecta moderadamente el nivel de consumo a largo plazo. Por supuesto, todo este ejercicio sería más robusto con una estimación geo-estadística de la distribución de los recursos energéticos por nivel de auto-consumo.

El ejercicio de estática comparativa realizado ha permitido descubrir dos hechos estilizados: primero, cuando la calidad de los recursos energéticos empeora (es decir disminuye la TRE) el tamaño del sector energético (medido en porcentaje de horas de trabajo utilizadas por dicho sector) disminuye cuando el parámetro de elasticidad de sustitución de capital-energía está por debajo de cero, es constante si es cero y aumenta si es mayor que cero. En segundo lugar la disminución del consumo cuando la TRE empeora es más

constante para una menor elasticidad de sustitución entre capital y energía, mientras que para una mayor elasticidad de sustitución, la disminución es muy rápida para niveles muy bajos de auto-consumo (la economía sufre mucho cuando se la priva del disfrute de las fuentes de energía barata) aunque después de primeras etapas de agotamiento, la facilidad de sustitución entre energía y capital reduce drásticamente el efecto sobre el consumo del agotamiento de los recursos. Cuando la sustitución entre energía y capital es más difícil el sistema económico no puede aprovecharse tan intensamente de la “energía barata” y como consecuencia, también es menos vulnerable a un cambio en el nivel del parámetro de auto-consumo energético.

Este efecto tiene consecuencias intrigantes, porque conduce a la intuición de que el agotamiento de los recursos tiene un mayor impacto a corto plazo, precisamente cuando la sustitución de la energía del capital es más fácil. La crisis del petróleo de los años 70, bajo esta perspectiva, parece ser el resultado de una economía que estaba sustituyendo el capital por el uso de la energía, debido al bajo precio del petróleo con una alta TRE, y que de repente se vio privada de la energía barata. La necesidad de adaptarse a un uso más equilibrado de la energía disponible llevó a acumular un mayor stock de capital (por ejemplo, en forma de motores más eficientes, o de una mayor diversificación en la producción de energía eléctrica, etc.).

En nuestra opinión tanto la discusión teórica, como el modelo propuesto y los resultados obtenidos representan un avance significativo en la fundamentación teórica de las aplicaciones económicas del análisis de energía neta. Desde su publicación el artículo en que se basa este capítulo ha recabado tres citas, y en cada una de ellas se resalta un elemento concreto del modelo expuesto: en Rye y Jackson (2018) el uso de la curva de clasificación de recursos por TRE, en Malaczewski (2018) el uso de la especificación CES-Cobb-Douglas de la función de producción, y en Chen, Feng, Wang y Hook (2017) la observación de que la TRE es una medida de calidad de los recursos energéticos análoga a la “ley de la mena” en la minería metálica.

El trabajo aquí presentado dista mucho de estar cerrado; por el contrario aspira a abrir una agenda investigadora con consecuencias empíricas. Dado que en este capítulo solo se ha realizado un ejercicio de estática comparativa del estado estacionario para un modelo simplificado (donde la curva de auto-consumo de energía se sustituye por un nivel fijo de auto-consumo), en primer lugar se debería construir una trayectoria dinámica completa del sistema bajo una distribución realista del stock de recursos energéticos por TRE (la propia estimación de esas curvas sería en sí misma un resultado valioso).

En segundo lugar, los factores ambientales pueden cambiar sustancialmente la perspectiva de este ejercicio (Brandt, Alex y Farrell, 2007). Si en el modelo propuesto la curva de TRE se sustituye por una superficie donde el stock de recursos energéticos se clasifica por auto-consumo e impacto ambiental, se podrían evaluar los efectos del agotamiento de recursos sobre las externalidades ambientales del sector energético. Nuestra intuición es que el aumento de la actividad bruta en el sector energético necesario para compensar el agotamiento de las fuentes de energía con un TRE más favorable tiene un impacto ambiental que probablemente sea el coste social más importante del proceso de agotamiento de las fuentes de energía no renovable.

Finalmente, aparte de la influencia que la clarificación de varios elementos de la TRE puede tener en la literatura empírica centrada en su estimación, creemos que el modelo aquí presentado puede abrir nuevas perspectivas en la contabilidad del crecimiento, facilitando la identificación del impacto de los cambios en la TRE sobre el crecimiento económico.

Capítulo 3

Irrelevancia de la estructura de capital en el laboratorio

3.1. Introducción

Una característica importante de los mercados financieros es la diversidad de contratos que representan diferentes derechos sobre los flujos de efectivo libres de una empresa determinada. Los contratos más comunes que canalizan la renta empresarial son la deuda (un compromiso para proporcionar un flujo de efectivo predefinido al tenedor de la deuda) y el capital (el derecho a recibir los flujos de efectivo residuales después del servicio de la deuda). Este último suele estar relacionado con el control político de la empresa.¹

¹De manera estilizada, podemos definir una empresa (no financiera) como una organización que compra insumos, los transforma y vende bienes transformados. La diferencia (positiva) entre el valor los bienes comprados (insumos) y los bienes vendidos (productos) es el valor añadido por la empresa. Excluyendo impuestos, el valor añadido de una empresa se distribuye parcialmente a sus trabajadores, mientras que el ingreso residual después de los costes laborales y la depreciación del capital se denomina flujo libre de caja. El flujo libre de caja se utiliza para la remuneración de los propietarios y acreedores de la empresa.

El teorema de irrelevancia de la estructura de capital de Modigliani-Miller (Modigliani y Miller, 1958) proporciona un conjunto de condiciones que hacen que el valor de mercado total de los derechos sobre los flujos libres de caja de una empresa no dependa de la estructura de dichos derechos. En particular, cuando se verifican las condiciones del teorema, el ratio entre deuda y capital y las decisiones sobre el pago de dividendos no afectan al valor total de mercado de los pasivos de la empresa. Por ejemplo, la irrelevancia del ratio de endeudamiento significa que dadas dos empresas con los mismos flujos libres de caja, una de ellas totalmente financiada con capital y la otra con capital y deuda, ambas deberían tener el mismo valor de mercado total (entendido como el valor de mercado de la deuda más el del capital). En este capítulo restringimos nuestra atención a esta proposición de invariancia del valor respecto del endeudamiento (irrelevancia de la estructura de capital), y vamos a ignorar las proposiciones de Modigliani-Miller referidas a la irrelevancia de la política de dividendos.

En Ho y Robinson (1994), las hipótesis de los teoremas sobre la irrelevancia de la estructura de capital se clasifican en dos grupos. Primero, tenemos un núcleo de hipótesis generales: perfección del mercado de capitales (no hay impuestos, no hay costes de bancarrota ni costes de transacción), exogeneidad de los flujos libres de caja de la empresa (el teorema se refiere a las decisiones de estructura de capital *dadas* las decisiones operativas y de inversión), y la maximización del valor de mercado como objetivo de la empresa.

La irrelevancia de la estructura de capital se mantiene como consecuencia de un argumento de arbitraje estricto si se cumple una de las siguientes hipótesis adicionales: i) hay varias copias de la misma empresa (“clases de riesgo” en la terminología de Modigliani y Miller 1958) y un activo seguro, o ii) los mercados financieros son completos en el sentido de Arrow-Debreu (Hirshleifer, 1966) o completables (Titman, 2002).²

²Textualmente en Titman (2002): “El teorema de Modigliani-Miller no requiere mercados completos. Una condición suficiente es que el proceso de adaptar o re-empaquetar valores no tenga costes y sea competitivo”

Cuando los mercados no pueden completarse y no hay “clases de riesgo” (Stiglitz, 1969), la invariancia de la estructura de capital ya no se demuestra por arbitraje sino que es un resultado de equilibrio general. Si las empresas emiten deuda corporativa “libre de riesgo” (emiten menos deuda que el valor mínimo posible de la empresa), se cumple lo siguiente: *”Supongamos que no hay quiebra y que los agentes pueden pedir prestado y prestar a un mismo tipo de interés de mercado. Si existe un equilibrio en el cual cada empresa tiene una relación deuda-capital dada y una valoración, entonces existe otro equilibrio en el que cambiando las relaciones deuda-capital de todas las empresas, las valoraciones de las empresas y el tipo de interés de mercado no cambian”*.

El teorema de Stiglitz (1969) puede extenderse al caso en que la deuda corporativa puede impagarse si se satisface la propiedad de separabilidad en dos fondos (en particular cuando los participantes del mercado tienen preferencias de media-varianza).³

En términos empíricos, incluso la perfección del mercado de capitales es una hipótesis demasiado exigente. De hecho, los impuestos no neutrales entre el capital y la deuda y los costes de la quiebra se identificaron como incumplimientos de la perfección del mercado de capitales en Modigliani y Miller (1963) y Kraus y Litzenberger (1973), respectivamente. Dado que los costes de bancarrota y la no neutralidad fiscal existen en todas las jurisdicciones del mundo, el teorema de Modigliani-Miller no se puede observar directamente en las empresas reales.

Una forma natural de proceder con el desarrollo teórico es relajar las condiciones del teorema. En la llamada teoría del coste-beneficio (Myers, 1984, 2001) se postula una forma en U del valor de la empresa con respecto al apalancamiento cuando se consideran y comparan entre sí los costes de bancarrota y los beneficios fiscales del endeudamiento. El marco teórico alternativo a la teoría del coste-beneficio es la teoría de la prelación, que

³Bajo la hipótesis de separabilidad, la estructura de capital es irrelevante, ya que cada inversor tiene efectivo y una copia a escala de la cartera de mercado que incluye los bonos y el capital de cada empresa en proporción al volumen total emitido.

establece que debido a la selección adversa los beneficios retenidos son la fuente preferida de financiación para las empresas, luego se recurre a la deuda si es necesario, y sólo en casos extremos se recurre a las ampliaciones de capital.

Desde un punto de vista empírico, Frank y Goyal (2005), Frank y Goyal (2009) y Rajan y Zingales (1995) proporcionan evidencia para la teoría del coste-beneficio y así apoyan indirectamente el teorema de Modigliani-Miller. En el caso de los bancos Cline (2015) encuentra que la reducción en los rendimientos de la deuda como resultado de una reducción del apalancamiento es solo un tercio de la que implicaría la irrelevancia de la estructura de capital. Por último, Harvey y Graham (2001) emplean encuestas de directores ejecutivos para examinar el fundamento de las decisiones de estructura de capital de las empresas y concluyen que criterios informales como la flexibilidad financiera y las calificaciones crediticias son los más importantes. Estos autores también encuentran un apoyo moderado para la teoría del coste-beneficio y constatan la existencia de objetivos de empresa para el ratio de deuda sobre capital.

Con datos observacionales no es posible controlar el “valor” de la empresa (distribución del valor presente de los flujos de caja futuros) para compararlo con el valor de mercado de los pasivos de la empresa. Una alternativa es realizar experimentos de laboratorio que complementen la literatura existente sobre la irrelevancia de la estructura de capital: en condiciones experimentales si se puede controlar la distribución del valor de la empresa, para compararla con el precio de mercado observable de los pasivos emitidos. En este capítulo se implementa un experimento inspirado en el modelo de riesgo crediticio estructural de Merton (1974).

Cada grupo de diez sujetos pasa por el siguiente diseño experimental durante trece períodos (el primero de prueba): hay dos activos (acciones y bonos) cuyos valores están determinados por una variable estocástica (el valor de la empresa) extraída de una distribución uniforme. La deuda de la empresa es de conocimiento común, y al comienzo de cada ronda se revela a los participantes una señal con información incompleta sobre el valor de

la empresa. Este diseño permite experimentar sobre cómo los precios de mercado de los activos dependen del nivel de deuda y de la información sobre el valor de la empresa.

En cada período, los sujetos pueden negociar los instrumentos durante cinco minutos en dos mercados (uno para las acciones y otro para los bonos) de doble subasta sin ventas al descubierto. Al empezar un periodo experimental los sujetos reciben una cartera de bonos y acciones que replican la estructura financiera de la empresa, y una línea de crédito que les permite comprar acciones y bonos, pero que tienen que devolver. Al final de cada ronda se informa a los sujetos sobre el verdadero valor de la empresa y sus ganancias o pérdidas del período de negociación. Las ganancias y pérdidas de un período no afectan las dotaciones iniciales del período siguiente (las ganancias no se transfieren). Al final del experimento, las ganancias por ronda se suman y se convierten en efectivo real.

A lo largo del experimento, se consideran cuatro niveles de endeudamiento y tres niveles de señal. Seis de los doce grupos experimentan el tratamiento *Público*, en el que la señal que lleva información sobre el valor de la empresa se da a todos los participantes (una situación similar a la hipótesis de información simétrica del modelo de Merton). Los otros seis grupos experimentan el tratamiento *Privado*, donde la señal se revela solo a cuatro participantes que se eligen al azar en cada período. El tratamiento *Privado* nos permite estudiar las consecuencias empíricas de la información privilegiada.

En el tratamiento *Público* la estructura de capital debería ser irrelevante para el valor de mercado de la empresa bajo preferencias media-varianza (incluido el caso particular de neutralidad de riesgo, que es la hipótesis habitual en la economía experimental cuando hay pequeñas cantidades de dinero en juego), ya que las carteras pueden recomponerse como es necesario para que se verifique la propiedad de separabilidad en dos fondos. Sin embargo, el arbitraje estricto no es posible: dada una distribución de valor de la empresa (determinada por la señal), diferentes estructuras de capital (determinadas por el nivel de endeudamiento) ocurren en diferentes mercados. Como consecuencia, la irrelevancia de la

estructura de capital no puede ser restablecida por un solo arbitrista sin asumir riesgos.⁴ El tratamiento *Público* permite probar si la valoración neutral al riesgo y la irrelevancia de la estructura de capital se verifican.

A diferencia del caso de información completa, donde solo hay un punto de referencia natural para la formación de las creencias de los participantes (expectativas racionales), para el tratamiento de *Privado*, la literatura proporciona dos marcos de formación de creencias simples que compiten entre sí (ver Lintner 1969): expectativas racionales e información previa (bayesiana). Existe una amplia literatura sobre información incompleta en los mercados experimentales, desde los primeros experimentos de Plott (1982) hasta experimentos recientes que comparan las hipótesis de formación de expectativas (Bossaerts, Frydman y Ledyard, 2013) o el impacto en los resultados del mercado del grado de dispersión de la información (Corgnet, DeSantis y Porter, 2020). El tratamiento *Privado* permite la evaluación del desempeño empírico de los marcos de formación de creencias mencionados.

Los resultados del análisis de los datos experimentales del tratamiento *Público* implican el rechazo de la hipótesis de valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales: las acciones están sobrevaloradas, principalmente cuando el su valor teórico es cercano a cero. Sin embargo la irrelevancia de la estructura de capital si se confirma experimentalmente.

El análisis de los resultados del tratamiento *Privado* se centra en la comparación experimental entre la adecuación de los equilibrios de expectativas racionales e información previa (bayesiana). El análisis de la desviación de los precios respecto de ambas especificaciones teóricas indica que la información previa (bayesiana) es un modelo mejor para describir la formación de precios en el mercado experimental que las expectativas racionales. El

⁴La metodología experimental brinda a la ciencia económica la posibilidad de sustituir las hipótesis conductuales en la teoría por el comportamiento real de los humanos. asignaturas. Cuando la irrelevancia de la estructura de capital puede restablecerse mediante un arbitraje estricto, las hipótesis de comportamiento no son importantes porque un solo arbitrista racional (y bien financiado) es suficiente para restaurarla. En ausencia de arbitraje, la irrelevancia de la estructura de capital aún puede mantenerse, pero depende de hipótesis conductuales.

análisis de las carteras finales de los participantes informados y no informados sugiere un ajuste incompleto de dichas carteras hacia las predichas por el equilibrio de información previa. Finalmente, la irrelevancia de la estructura de capital bajo información asimétrica se contrasta en el tratamiento *Privado* y los resultados no son concluyentes.

Nuestro estudio contribuye a la literatura sobre mercados financieros experimentales en el ámbito de las Finanzas Corporativas. Hasta donde sabemos, hay dos experimentos de laboratorio que contrastan el teorema de Modigliani-Miller sobre la irrelevancia del endeudamiento (ambos exploran situaciones donde el teorema se cumple por arbitraje). Primero, Levati, Qiu y Mahagaonkar (2012) se centra en la relación entre la aversión al riesgo y el precio de los activos y explora el efecto del apalancamiento en el coste de capital. En el diseño de estos autores, se consideran diferentes ratios de apalancamiento, pero los títulos de deuda no pueden impagarse. En consecuencia, el precio de la deuda no es estocástico y la deuda no se negocia. Los resultados del experimento muestran que los sujetos reconocieron el aumento del riesgo sistemático de las acciones cuando aumentaba el apalancamiento, ya que exigían una mayor rentabilidad por asumir ese riesgo. Además, los resultados apoyaron una curva de coste del capital respecto del endeudamiento en forma de U, lo que sugiere que los sujetos tienden a subestimar el riesgo de las acciones con bajo apalancamiento y a sobrestimar el riesgo de las acciones con alto apalancamiento. En segundo lugar, Charness y Neugebauer (2019) considera un entorno de mercado multiperiodo como el que daba lugar a burbujas financieras en Smith, Suchanek y Williams (1988), pero con dos activos. En este experimento el riesgo relativo de ambos valores es conocido y no cambia durante el transcurso del experimento. En el tratamiento de control, los flujos de efectivo de los activos negociados no están correlacionados. En el tratamiento principal, la diferencia de flujo de efectivo entre los dos activos es una cantidad fija, que corresponde al caso en el que los valores de ambos activos están determinados por una única variable aleatoria (el caso que tiene relación con las condiciones de Modigliani-Miller). Los resultados del experimento apoyaron la proposición de irrelevancia de la estructura de capital.

También hay una literatura experimental sobre la política de dividendos, donde se contrasta su irrelevancia o el impacto de diferentes estructuras de dividendos en la proposición de irrelevancia del nivel de endeudamiento. En Asparouhova, Besliu y Lemmon (2016), dos activos tienen el mismo valor total, pero en uno de ellos hay pagos en efectivo anticipados. El instrumento que entrega efectivo anticipadamente tiene mayor valor, lo que va en contra del teorema de Modigliani y Miller sobre irrelevancia de la política de dividendos. En Angerer, Neugebauer y Shachat (2019) se estudian las consecuencias de incluir jugadores artificiales en el diseño experimental de Charness y Neugebauer (2019). El estudio muestra que la Ley del Precio Único se verifica con más exactitud cuando hay un algoritmo que implementa una estrategia de arbitraje. Finalmente, Neugebauer (2020) analiza la solidez de los resultados de Charness y Neugebauer (2019) cuando se incluyen pagos por dividendos. Las diferencias de precio de mercado entre un valor apalancado y uno no apalancado no se ven afectadas cuando se agregan flujos de dividendos idénticos a los pagos de ambos valores, pero es suficiente cambiar el momento de los pagos de dichos dividendos para afectar significativamente la eficiencia del mercado.

El trabajo que presentamos pone a prueba la irrelevancia de la estructura de capital en un entorno sencillo (similar al modelo de Merton) donde tanto el capital como la deuda se presentan abiertamente como tales y se negocian de forma independiente. En el experimento se considera la posibilidad de impago de la deuda, se exploran diferentes niveles de endeudamiento y se investigan los efectos de la explotación de información asimétrica no monopolística.

El resto del capítulo procede de la siguiente manera. En la Sección 3.2, describimos el marco teórico en el que estudiamos la irrelevancia de la estructura de capital. En la Sección 3.3, se discute la implementación experimental para el tratamiento *Público* y se presenta el equilibrio neutral al riesgo en el tratamiento *Público*. En la Sección 3.4, se presentan y discuten los resultados del tratamiento *Público* (donde se pone a prueba la irrelevancia de la estructura del capital). En la Sección 3.5, se presentan y discuten los re-

sultados del tratamiento *Privado* (donde se consideran modelos alternativos de formación de expectativas). En la Sección 3.6, concluimos el capítulo. Las instrucciones del experimento se relegan al Apéndice.

3.2. Modelo

Nuestro experimento se inserta en el marco de los modelos de riesgo crediticio estructural de Merton (1974). El valor de la empresa es una variable aleatoria $V > 0$. Hay dos clases de instrumentos financieros, que se denominan bonos y acciones, que tienen derecho al valor de la empresa. Suponemos que la empresa ha emitido n bonos con un valor nominal de D cada uno y m acciones. Si la realización de V es igual a v , cada bono paga su valor nominal D (si el valor de la empresa es mayor que su deuda) o una parte proporcional del valor de la empresa (en caso de quiebra):

$$B(v) = \min \left\{ D, \frac{v}{n} \right\}.$$

El valor residual (el valor restante después de pagar a los tenedores de bonos, si hay alguno disponible) se distribuye por igual entre m acciones:

$$S(v) = \max \left\{ 0, \frac{v - n \cdot B(v)}{m} \right\}.$$

El experimento está diseñado para estudiar si los participantes son capaces de internalizar cómo la distribución del valor de la empresa y su nivel de deuda determinan simultáneamente el valor de los bonos y las acciones. Para inducir heterogeneidad en la distribución del valor de la empresa, se proporciona una señal s a algunos o todos los sujetos en cada ronda del experimento. Esta señal proviene de una función indicadora $s(v)$ que informa a su receptor de un subconjunto del dominio de la variable aleatoria V donde ha caído la

realización de v . El conocimiento de la señal induce una nueva distribución del valor de la empresa (la distribución del valor de la empresa condicional de la señal), ya que después de recibir la señal, un agente racional tendrá la distribución de la variable condicionada al conocimiento de la señal: $V|s(V) = s$.

Supongamos que hay dos mercados en los que se negocian bonos y acciones. Sea $p_B(s, D)$ el precio del bono y sea $p_S(s, D)$ el precio de la acción dada la señal s y la deuda D . Entonces, el valor de mercado de la empresa $M(s, D)$ es igual a $M(s, D) = n \cdot p_B(s, D) + m \cdot p_S(s, D)$.

En nuestro mercado experimental, el tipo de recomposición de cartera que permite mantener la propiedad de separación de dos fondos es posible. Por lo tanto, si los participantes tienen preferencias de media-varianza (incluida la neutralidad del riesgo), y toman decisiones óptimas bajo incertidumbre, se cumple la irrelevancia de la estructura de capital.⁵

Un problema clásico en Finanzas y Economía Experimental es la eficiencia con la que los mercados integran la “información privilegiada” en los precios de los activos. Si los mercados fueran perfectamente eficientes, los precios incorporarían toda la información recibida por todos los sujetos, y la irrelevancia de la estructura de capital también se mantendría bajo información asimétrica.

Para permitir la experimentación sobre la incorporación de información en los precios de mercado, el experimento descrito se ejecuta con información tanto simétrica como asimétrica. En las Secciones 3.3 y 3.4, se informa el análisis de los datos del tratamiento *Público* (donde la señal s se entrega a todos los participantes). El enfoque del tratamiento *Público* es poner a prueba la valoración neutral al riesgo y la irrelevancia de la estructura de capital en un diseño experimental donde se dan condiciones para que ambas propiedades

⁵Los participantes del mercado pueden cambiar la composición relativa de su cartera de valores (si consideran que los bonos y las acciones tienen un precio relativo incorrecto), y pueden cambiar su exposición total al valor de la empresa comprando o vendiendo la misma cantidad de bonos y acciones.

puedan verificarse. En la Sección 3.5, se analiza el tratamiento *Privado* (donde el valor de s se revela solo a algunos sujetos que se eligen al azar en cada ronda). En este apartado se comparan diferentes hipótesis sobre la formación de expectativas y la difusión de información cuando la información es asimétrica, y después se pone a prueba la irrelevancia de la estructura de capital.

3.3. Diseño experimental y análisis de equilibrio

En el experimento implementado y basado en el marco descrito en la sección previa la distribución del valor de la empresa (V) es una uniforme discreta en el conjunto $1, \dots, 6000$. La función $s(v)$ es una función indicadora que divide el dominio de la variable aleatoria en tres partes iguales:

$$s(v) = \begin{cases} \{1, 2, \dots, 2000\} & \text{if } v \leq 2000 \\ \{2001, 2002, \dots, 4000\} & \text{if } 2000 < v \leq 4000 \\ \{4001, 4002, \dots, 6000\} & \text{if } 4000 < v. \end{cases}$$

A lo largo de este documento, llamamos $s(v \leq 2000)$ la señal *Baja*, $s(2000 < v \leq 4000)$ la señal *Media* y $s(4000 < v)$ la señal *Alta*. Dado que V se distribuye uniformemente en $1, \dots, 6000$, la distribución condicional del valor de la empresa inducida por la señal ($V|s(V) = s$) es una distribución uniforme en el conjunto soporte determinado por s .

En nuestro experimento, un total de 120 sujetos (12 grupos de 10 sujetos) negocian bonos y acciones durante 13 rondas en dos mercados de doble subasta sin ventas al descubierto. Debido a que la primera ronda es solo para fines de capacitación, se elimina del análisis de datos posterior. Cada período de negociación dura cinco minutos.

El mercado de doble subasta se realiza en tiempo real en una red informática. La pantalla del ordenador de cada participante se divide en tres partes (ver Figura 3.1).

Periodo: 1 de 1 tiempo restante [sec]: 117 Tus ganancias acumuladas son de 0.0 ECU.

Mercado de acciones (renta variable)

Precio de venta:

Se indica tu precio con **	Lista de ofertas de venta:
*	40
	45

Precios de acciones a lo largo del tiempo:

Se indica tu precio con **	Lista de ofertas de compra:
*	35

Precio de compra:

Inventario:

Acciones: 5
Bonos: 8
Dinero (ECU): 3770

Deuda:

La deuda de la empresa es (ECU): 3000
Deuda por bono (ECU): 75

Información:

Cada participante sabe la distribución de la información.

El valor final pertenece al rango: (2000,4000]

Es decir, el valor a repartir entre cada pareja de bono y acción se elige uniformemente en el intervalo: (50,100]

Mercado de bonos (renta fija)

Precio de venta:

Se indica tu precio con **	Lista de ofertas de venta:
*	60

Precios de bonos a lo largo del tiempo:

Se indica tu precio con **	Lista de ofertas de compra:
*	20

Precio de compra:

Figura 3.1: Pantalla de operaciones vista por un participante.

El lado izquierdo de la pantalla se usa para realizar compraventas y recibir información sobre las acciones, y el lado derecho es análogo para administrar la cartera de bonos.⁶ En el centro de la pantalla, se proporciona la siguiente información: i) las tenencias de efectivo, acciones y bonos de cada jugador, ii) el nivel de deuda D de la empresa (en bonos y en total) en el período actual, y iii) la señal s que transmite información sobre el valor de la empresa. La señal s está disponible para todos los participantes en el tratamiento *Público* en consideración.

Esta pantalla se utiliza para comprar o vender un bono o una acción, o para establecer un precio de compra (el máximo que el participante está dispuesto a pagar) o un precio de venta (el mínimo que el participante está dispuesto a cobrar) por cada valor. Cada jugador puede tener como máximo una orden de compra y una orden de venta activa en cada mercado. Dado que no tiene sentido que un participante esté dispuesto a vender un valor por menos dinero del que está dispuesto a pagar para comprarlo, el sistema informático no permite la introducción de este tipo de orden contradictoria. No se pueden emitir órdenes de compra para las que el comprador carece de fondos suficientes u órdenes de venta para las que el vendedor carece del activo relevante en su cartera.

Para ambos mercados, cada participante puede ver la cola de órdenes de compra y venta y la evolución reciente de los precios de compra (en un gráfico). Las órdenes se ejecutan después de ser ordenadas por precio de compra y orden de precio de venta inverso. La transacción se efectúa cuando entra en la cola una orden de compra con un precio más alto que la orden de venta más barata, o cuando entra en cola una orden de venta con un precio más alto que la orden de compra de mayor precio. El precio de ejecución de la operación es el más antiguo de los precios de las órdenes que se cruzan. Una vez que se ejecutan las operaciones, el dinero y el activo se intercambian, y las órdenes cruzadas se eliminan de sus respectivas colas. Los mercados de doble subasta se implementan con el software informático z-Tree (Fischbacher, 2007).

⁶Cuando la empresa no ha emitido deuda, el número de bonos en cualquier cartera es cero y el mercado de bonos no aparece en la pantalla.

Al comienzo de cada ronda, todos los sujetos reciben 4 acciones, 4 bonos (siempre que $D > 0$) y 4.000 ECU (unidades monetarias experimentales) en efectivo que pueden usarse para comprar bonos y acciones, pero el préstamo de efectivo debe ser devuelto al final del período (sin intereses).

Si la empresa ha emitido deuda, los bonos tienen un derecho preferente sobre el valor de la empresa hasta el reembolso total de su valor nominal. Si no es posible el reembolso completo de los bonos, reciben una parte proporcional del valor de la empresa. El valor restante después de la redención nominal de los bonos (si hay alguno disponible) se distribuye por igual entre las 40 acciones de la empresa. Ambos tipos de activos vencen en efectivo al final del período de negociación, y a los sujetos se les abonan tanto los pagos derivados de la redención de los activos en ECU como el efectivo neto resultante de la negociación en el mercado.⁷ Los pagos acreditados en un período no forman parte de la dotación del participante en el período siguiente. Al final de la sesión, los pagos por ronda se suman y se convierten en euros a un tipo de cambio de 1 euro por 300 ECUS.

D está sujeto a variación dentro del tratamiento. En particular, se consideraron cuatro niveles de D en el transcurso de una sesión experimental: 0 ECUs por bono (0 ECU en total), 40 ECU por bono (1.600 ECU en total), 75 ECU por bono (3.000 ECU en total) y 110 ECU por bono (4.400 ECU en total). El nivel de deuda es comúnmente conocido por todos los sujetos al comienzo del período de negociación.

Para la realización del experimento se extrajeron 12 valores por adelantado a partir de la distribución de v , y estos se emparejaron con los niveles de deuda que se estudiarán de tal manera que se exploren todas las combinaciones de D y $s(v)$. La secuencia de valores

⁷Dado que los jugadores tienen acceso a un préstamo de efectivo, pueden tener pérdidas. Las pérdidas de una ronda, se suman con su signo (negativo) con los pagos del resto de rondas; si el pago final de “todas las rondas” es negativo, al participante solo se le paga la tarifa de participación. Ninguno de los participantes en el experimento tuvo un saldo final negativo. Los sujetos reciben 5 euros adicionales por la participación en el experimento.

de la empresa y los niveles de deuda que hemos empleado durante el transcurso de una sesión experimental (para todos los grupos) se resumen en el Cuadro 3.1. Dado que cada combinación de D y $s(v)$ ocurre solo una vez, el aprendizaje directo se minimiza.

Cuadro 3.1: *Valor de la empresa y nivel de deuda en cada ronda del experimento.*

Ronda	v	$s = s(v)$	D
1	3552	<i>Media</i>	75
2	1268	<i>Baja</i>	110
3	3344	<i>Media</i>	40
4	4473	<i>Alta</i>	0
5	388	<i>Baja</i>	75
6	4246	<i>Alta</i>	40
7	3659	<i>Media</i>	110
8	673	<i>Baja</i>	0
9	1016	<i>Baja</i>	40
10	5358	<i>Alta</i>	110
11	2223	<i>Media</i>	0
12	5639	<i>Alta</i>	75

Lineex, laboratorio informático de la Universidad de Valencia, fue contratado para verificar el correcto funcionamiento del software e implementar el experimento en sus instalaciones. Los sujetos fueron 120 licenciados en Ciencias Económicas y Empresariales de la Universidad de Valencia. Los beneficios medios por participante fueron de 11,94 euros más una cuota por participación de 5 euros. Las instrucciones proporcionadas a los participantes se pueden encontrar en el Apéndice.

Para el tratamiento *Público* (que es el que examinamos en las secciones 3.3 y 3.4) dado que todos los participantes reciben la misma información sobre s y D , la valoración neutral al riesgo de cada activo es la expectativa de su valor de liquidación según el conjunto de información incluyendo el conocimiento de s y D .

En el Cuadro 3.2 se presenta la valoración neutral al riesgo de los bonos, las acciones y toda la empresa, condicionada a la señal s y a la estructura de capital, parametrizada en

la deuda emitida D .

Cuadro 3.2: *Valoración neutral al riesgo con información completa sobre la señal s .*

s	Activo	D (por bono)				M
		0	40	75	110	
<i>Baja</i>	acciones	25,01	1,00	0	0	25,01
	bonos	-	24,01	25,01	25,01	
<i>Media</i>	acciones	75,01	35,01	6,26	0	75,01
	bonos	-	40,00	68,75	75,00	
<i>Alta</i>	acciones	125,01	85,01	50,01	16,01	125,01
	bonos	-	40,00	75,00	109,00	

Bajo las hipótesis de neutralidad al riesgo, y con información simétrica la irrelevancia de la estructura de capital es una aplicación inmediata de la linealidad del operador expectativas:⁸

$$M = \mathbb{E}(V) = \mathbb{E}(n \cdot B + m \cdot S) = n \cdot \mathbb{E}(S) + m \cdot \mathbb{E}(B) = n \cdot p_B + m \cdot p_S$$

3.4. Resultados

En esta sección, los datos experimentales del tratamiento *Público* se utilizan para comprobar dos hipótesis. La primera hipótesis es que los precios de los valores convergen a su valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales. La segunda hipótesis (más débil) es que la irrelevancia de la estructura de capital se mantiene en este marco experimental.

Hipótesis 1: Neutralidad al riesgo. *Los precios de los bonos y las acciones convergen a su valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales.*

⁸En condiciones de información asimétrica, si las expectativas se toman sobre conjuntos de información diferentes, el argumento basado en la linealidad del operador de expectativas ya no es válido.

Para proporcionar una descripción visual de los datos, se presentan dos gráficos de dispersión de la evolución del precio de mercado de las acciones (Figura 3.2) y de los bonos (Figura 3.3). Los precios de las compraventas ejecutadas (eje y) y los tiempos de las transacciones (eje x, en segundos) se representan para cada señal s y nivel de deuda D . En cada panel, se incluye una curva de ajuste no paramétrica para resumir la evolución de los precios durante el transcurso del mercado.⁹ En ambas figuras, una línea roja continua indica la valoración neutral al riesgo del valor dada la señal s .

La Figura 3.2 presenta una sobrevaloración sustancial de la acción con respecto a su valor neutral al riesgo para $s = Baja$, y para $s = Media$ cuando D es diferente de cero. Para la señal $Alta$ y para la señal $Media$ en ausencia de deuda parece haber convergencia a la valoración neutral al riesgo representada por la línea roja.

En la Figura 3.3 se muestra la información sobre la evolución de los precios de los bonos, incluyendo una línea verde que representa su valor nominal. Con la señal $Baja$, se observa una sobrevaloración sustancial si $D = 75$, que se vuelve aguda si $D = 110$. Para $D = 110$ bajo las señales $Media$ y $Alta$ el bono parece infravalorado. Para los otros casos, los precios de mercado parecen converger a la valoración neutral al riesgo.

Las Figuras 3.2 y 3.3 generalmente muestran cierta convergencia después de un período inicial de descubrimiento de precios, lo que es una observación importante porque la estabilidad de los precios promedio en la parte final de cada período de negociación permite el uso de los últimos precios negociados en cada mercado como base de datos para el análisis de regresión que sigue.

Para probar la Hipótesis 1 y cuantificar las fuentes del sesgo de los precios respecto de la valoración neutral al riesgo se estima un modelo de regresión (Cuadro 3.3). La variable dependiente es la diferencia entre el último precio del activo observado en cada mercado

⁹Se utiliza la función loess en R con un parámetro 0.6. La línea de ajuste no paramétrica está rodeada de un área sombreada que representa un intervalo de confianza del 95 %.

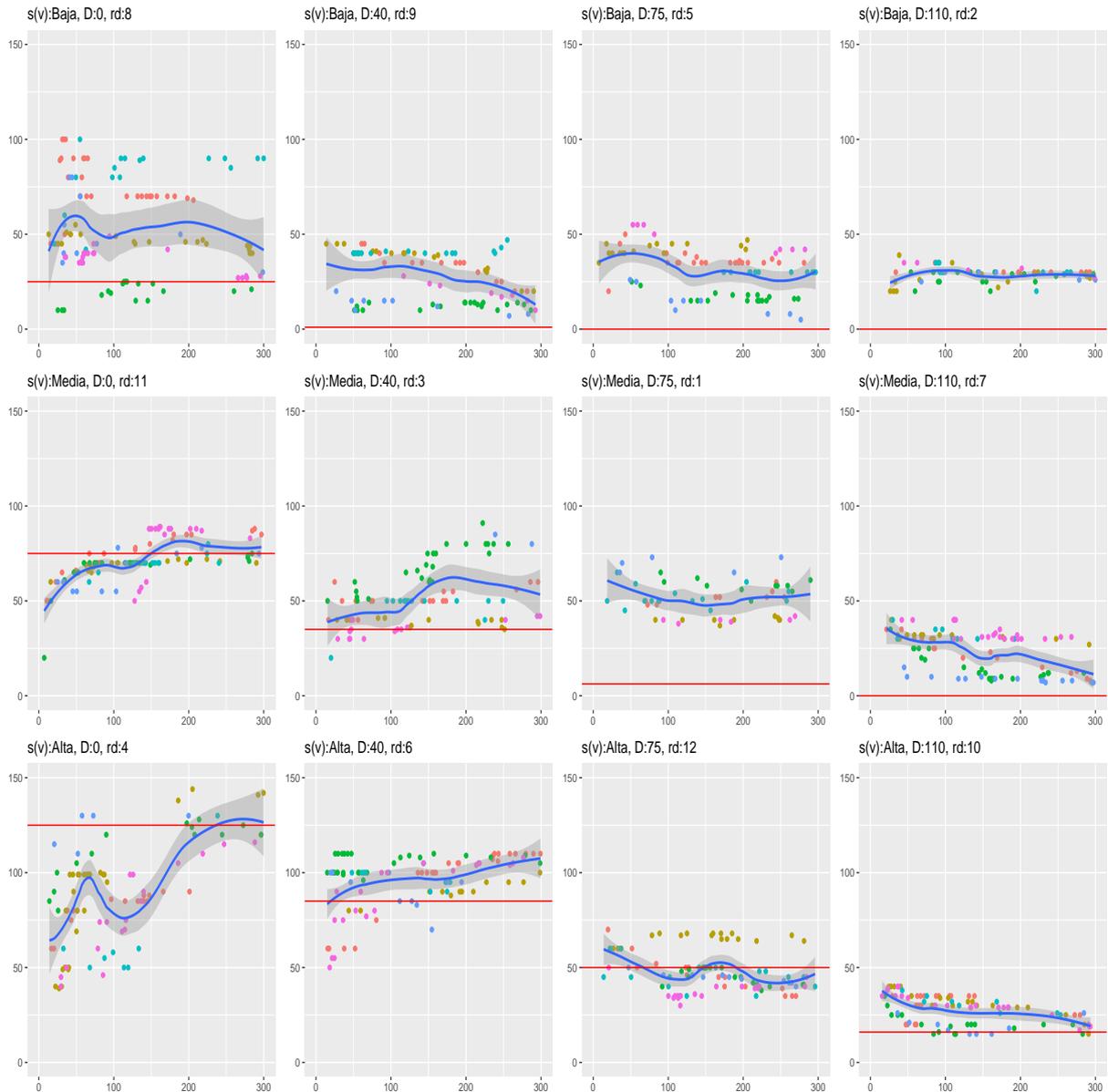


Figura 3.2: Gráfico de dispersión del tiempo (eje x, en segundos) y precio (eje y) de cada transacción registrada para las acciones. Los paneles indican la señal s , el nivel de deuda (D) y el orden en que se jugaron los mercados (rd). La valoración neutral al riesgo está representada por una línea roja continua, y los puntos que representan las transacciones de un grupo dado se representan con el mismo color en todos los paneles. Se incluye una curva de ajuste no paramétrico para resumir la evolución de los precios a lo largo del tiempo.

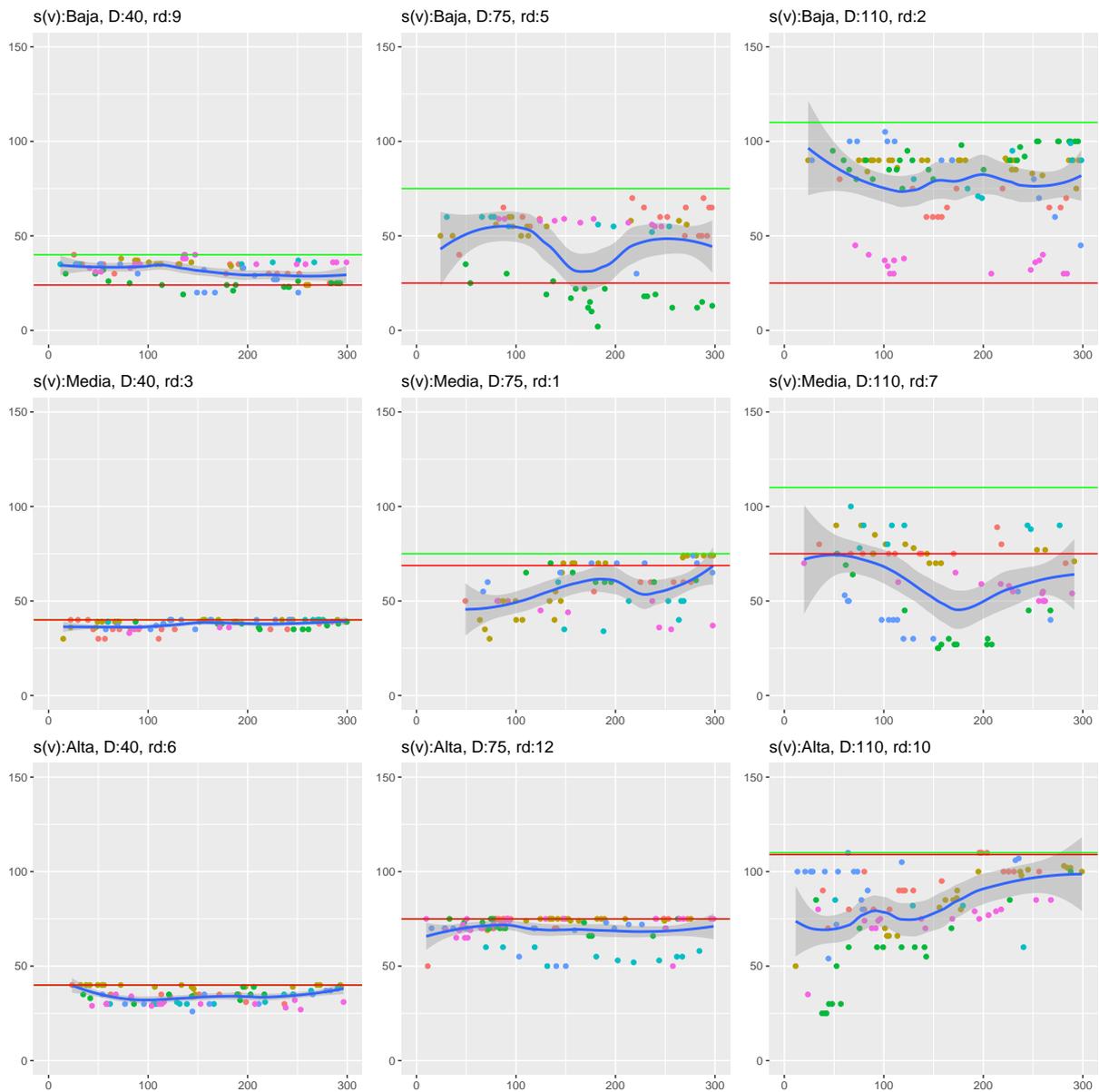


Figura 3.3: Gráfico de dispersión del tiempo (eje x) y precio (eje y) de cada transacción registrada para los bonos. Los paneles indican la señal s , el nivel de deuda (D) y el orden en que se jugaron los mercados (rd). La valoración neutral al riesgo está representada por una línea roja continua, la línea verde es el valor nominal de los bonos y los puntos que representan las transacciones de un grupo determinado se representan con el mismo color en todos los paneles. Se incluye una curva de ajuste no paramétrica para resumir la evolución de los precios a lo largo del tiempo.

experimental y la valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales. Nos referimos a esta variable como el “diferencia respecto al valor teórico”. Los regresores son las variables ficticias para la señal (*DBaja*, *DMedia*, *DAlta*) y el nivel de deuda (*D40*, *D75* y *D110*). Además, se incluye la variable *Ronda*, que es la posición que ha ocupado el mercado del que se obtiene el precio considerado en la secuencia de doce juegos por la que pasa cada grupo experimental. Esta variable se incluye para dar cuenta de la posibilidad de que la experiencia de juego mejore (o la fatiga degrade) las capacidades de valoración de los sujetos experimentales. A continuación, se presentan las especificaciones lineales.¹⁰ Los errores estándar y los p-valores se calculan con un estadístico robusto a errores agrupados (cluster robust statistic) por grupo de participantes.¹¹

La variable *Ronda* tiene un coeficiente negativo y significativo (al 1 %) para las acciones y los bonos, lo que sugiere que las habilidades de valoración mejoran durante el experimento. Las variables ficticias de señal son positivas y significativas para las acciones, mientras que para el bono solo *DBaja* es significativa (al 1 %). Por otro lado, la única variable ficticia de endeudamiento significativa es *D75* para las acciones (al 5 %).

Ambas regresiones muestran que la “diferencia respecto al valor teórico” es altamente predecible por los regresores considerados y, en consecuencia, la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo) no es un buen modelo de los precios observados en el tratamiento *Público*. La f^2 de Cohen de los modelos de regresión de acciones y bonos (alrededor del 100 % para ambos instrumentos) lo confirma.¹²

¹⁰Los p-valores para la significatividad de las variables o las diferencias entre las variables ficticias se muestran entre paréntesis en el texto para las hipótesis lineales consideradas. Los p-valores se calculan con el estadístico F de muestra finita (con dos colas).

¹¹La función `lm.cluster` en el paquete CRAN R `miceadds` se utiliza para esta corrección. Los valores p se calculan con el estadístico F de muestra finita (prueba de dos colas).

¹²La f^2 de Cohen es una medida del “tamaño del efecto”. Dadas dos especificaciones de regresión anidadas A y B, donde los regresores de B son un subconjunto estricto de los de A, $f^2 = \frac{(R_A^2 - R_B^2)}{(1 - R_A^2)}$, que para la evaluación de una regresión se simplifica en $f^2 = \frac{R^2}{(1 - R^2)}$. En Cohen 1988, $f^2 < 0,15$ se considera un efecto pequeño, $0,15 \leq f^2 \leq 0,35$ es un efecto moderado y $f^2 > 0,35$ se considera un efecto grande.

Cuadro 3.3: Regresión de la diferencia entre el precio de mercado de las acciones y los bonos y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda. Los errores estándar y los p-valores se calculan por un procedimiento robusto a problemas de agregación (por grupo de jugadores). Las desviaciones estándar se presentan entre paréntesis. La significatividad al 1 % está representada por (**), y el al 5 % está representada por (*).

	<i>Acciones</i>	<i>Bonos</i>
<i>DBaja</i>	32,92** (5,89)	35,95** (5,63)
<i>DMediana</i>	30,02** (4,93)	-0,58 (3,60)
<i>DAlta</i>	17,18** (4,20)	16,25 (8,94)
<i>D40</i>	6,88 (3,56)	
<i>D75</i>	11,41* (4,38)	2,64 (3,45)
<i>D110</i>	5,33 (3,33)	6,17 (5,34)
<i>Ronda</i>	-2,34** (0,45)	-2,88** (0,90)
R^2	0,49	0,52
Observaciones	72	54

Tanto los gráficos como el análisis estadístico sugieren una sobrevaloración de los valores cuyo precio es cero o cercano a cero (véase el elevado coeficiente y la significatividad de *DBaja*). Para proporcionar una evaluación empírica de esta hipótesis, se realiza una regresión de la “diferencia respecto al valor teórico” de la acción contra una constante, la variable *Ronda* y una variable ficticia (*DCasiCero*) para esos cinco mercados donde el valor teórico de la acción está por debajo de 10 (Cuadro 3.4). La regresión, tiene un R^2 de 42 %, no muy lejos del 49 % de R^2 de la especificación completa. Este resultado sugiere que las discrepancias entre precios de mercado y precios teóricos se concentran en el caso en que los valores de las acciones son cercanos a cero (para el bono esta fuente de errores de valoración no existe porque el mínimo valor teórico de un bono es 24).

Cuadro 3.4: *Regresión de la diferencia entre el precio de mercado de las acciones y los bonos y su valor teórico contra una variable ficticia que indica que el valor de la acción es menor que 10 ECU, y la variable Ronda. Los errores estándar y los p-valores se calculan por un procedimiento robusto a problemas de agregación (por grupo de jugadores). Las desviaciones estándar se presentan entre paréntesis. La significatividad al 1 % está representada por (**), y el al 5 % está representada por (*).*

<i>Acciones</i>	
<i>(Constante)</i>	27,94** (5,61)
<i>DCasiCero</i>	12,22** (4,22)
<i>Ronda</i>	-2,40** (0,67)
R^2	0,42
Observaciones	72

Una posible explicación de la sobrevaloración de valores con valor neutral al riesgo cero o

cercano a cero es el hecho de que los errores de valoración de esos activos son necesariamente positivos y no se cancelan en el proceso de formación de precios.

Cuando todos estos resultados se consideran en conjunto, la sobrevaloración con respecto a la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo) es sustancial para las acciones (y sensible para los bonos), y se confirma un fenómeno de aprendizaje a lo largo del experimento. Esto es suficiente para rechazar la Hipótesis 1 y establecer el siguiente resultado en su lugar:

Resultado 1. *Se rechaza la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo). Para bonos y acciones se observa sobrevaloración. La sobrevaloración de las acciones, más intensa, se concentra en aquellas cuyo valor teórico es cercano a cero.*

El rechazo de la hipótesis más fuerte de la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo) todavía deja margen para que la irrelevancia de la estructura de capital sea cierta en el mercado experimental. La Hipótesis 2 especifica el significado de la irrelevancia de la estructura de capital en el contexto del experimento.

Hipótesis 2: Irrelevancia de la estructura de capital. *El valor de mercado total de la empresa no depende de su endeudamiento.*

A diferencia de la valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales, que se aplica valor por valor y para la cual la hipótesis proporciona una valoración definitiva para el valor (que se puede utilizar como precio de referencia), la irrelevancia de la estructura de capital se mantiene mientras el valor de mercado no dependa significativamente del endeudamiento. Luego, para probar la Hipótesis 2, se debe evaluar la dependencia del valor total de mercado de la empresa respecto del nivel de endeudamiento en lugar de las diferencias con respecto a una valoración predefinida. Para este propósito, la variable dependiente para la regresión es ahora el valor de mercado total de la empresa. Los regresores son los mismos que los de la regresión anterior: las variables ficticias de señal (*Baja*, *Mediana* y *Alta*), apalancamiento (*D40*, *D75*, y *D110*) y la *Ronda*. Se consideran dos especificaciones:

la especificación “Base” incluye las variables ficticias de endeudamiento, mientras que la especificación “Sin apalancamiento” no. Ambas son especificaciones anidadas, lo que permite el cálculo de la f^2 de Cohen del conjunto de variables ficticias de endeudamiento.

Cuadro 3.5: *Regresión de la diferencia entre el valor de mercado de la empresa y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda. Los errores estándar y los p-valores se calculan por un procedimiento robusto a problemas de agregación (por grupo de jugadores). Las desviaciones estándar se presentan entre paréntesis. La significatividad al 1 % está representada por (**), y el al 5 % está representada por (*).*

	<i>Base</i>	<i>Sin Apalancamiento</i>
<i>DBaja</i>	85,38** (8,37)	92,56** (7,98)
<i>DMedia</i>	107,85** (8,12)	114,93** (5,52)
<i>DAlta</i>	149,49** (9,51)	157,10** (7,47)
<i>D40</i>	4,10 (7,27)	
<i>D75</i>	11,26 (7,27)	
<i>D110</i>	8,31 (7,22)	
<i>Ronda</i>	-3,97** (0,78)	-4,18** (0,71)
R^2	0,64	0,62
Observaciones	72	72

Las variables ficticias de señal (Cuadro 3.5) y *Ronda* son significativas al 1 %. Ninguna de las variables ficticias de endeudamiento ni las diferencias de coeficientes entre ellas es

significativa. La f^2 de Cohen para las variables ficticias de endeudamiento es del 4,3%, sustancialmente por debajo del umbral del 15% que define un tamaño de efecto pequeño. Este análisis estadístico se resume en el siguiente resultado:

Resultado 2. *Los resultados experimentales apoyan la irrelevancia de la estructura de capital.*

3.5. Tratamiento Privado

En el tratamiento *Privado*, el experimento descrito en la Sección 3.3 se lleva a cabo con una diferencia: la señal (s) no se revela a todos los participantes, sino a cuatro (de cada diez) participantes elegidos al azar en cada ronda. Este tratamiento nos permite estudiar las consecuencias de la información asimétrica.

En esta sección las hipótesis experimentales se derivan de dos modelos de equilibrio. Primero, en el caso de un equilibrio de expectativas racionales (ER), asumimos que todos los sujetos conocen la señal s ya sea porque recibieron esta información o porque pudieron inferirla de los precios de mercado. Por el contrario, la hipótesis de la información previa (IP) establece que los participantes no informados no infieren la información contenida en la señal de los precios de mercado, sino que aplican la regla de Bayes para calcular el valor esperado del instrumento financiero dada la información pública sobre la probabilidad de realización de cada estado y su propia información privada (ver Lintner 1969). Esta hipótesis de formación de expectativas implica que los participantes informados y no informados tienen diferentes valoraciones de cada valor porque sus conjuntos de información no están

igualados por el proceso de mercado.¹³

En ausencia de aversión al riesgo, los participantes racionales valorarían cada título según la expectativa matemática (dada la información disponible) del efectivo que proporciona en el momento de la liquidación. En esas condiciones, la selección óptima de activos se simplifica en la siguiente regla: comprar tantas unidades como sea posible del valor que más infravalorado y vender tantos valores sobrevalorados como se pueda. Este proceso de re-constitución de las carteras solo está limitado por la disponibilidad de efectivo y el hecho de que no se permiten las ventas al descubierto. En nuestro caso los préstamos en efectivo de 4.000 ECUS disponibles para cada sujeto le permiten comprar hasta el 90% de toda la empresa bajo la señal *Alta* (el caso en el que el valor de la empresa es el más alto y la restricción de liquidez es más probable que sea vinculante). En la práctica eso significa que las restricciones de liquidez no son vinculantes. Con suficiente liquidez, el precio de mercado en equilibrio igualará la valoración del tipo de participante con la máxima valoración del instrumento, y aquellos participantes que tengan dicha valoración serán los que se queden con el instrumento en su cartera.

El precio de equilibrio ER en el tratamiento *Privado* es la valoración neutral al riesgo con información completa (sobre la señal s) porque incluso aquellos sujetos que no conocen s al comienzo de una ronda lo inferen de la observación de los precios del mercado (que son información pública). En el Cuadro 3.2 se presentaron las valoraciones ER neutrales al riesgo de bonos, acciones y toda la empresa, condicionadas a la señal s y la estructura de capital D . Dado que en este equilibrio se supone que el proceso de mercado ha igualado la información de todos los participantes, los precios incorporan plenamente la información y las tenencias de la cartera de ambos tipos no están determinadas por la condición de

¹³Si bien IP conduce a un equilibrio bien definido en el mercado experimental hay que señalar que el equilibrio IP no es completamente racional. Debido a que los participantes desinformados bajo IP son conscientes de que no han podido inferir s , conocen su desventaja informativa. En esas condiciones, se verifica un teorema de “no intercambio” (ver Grossman y Stiglitz (1980), pero la hipótesis de IP supone que, aun conociendo su situación de desventaja, participan igualmente en el mercado.

agentes informados o no (y es razonable esperar que sean similares, ya que se parte de una cartera idéntica entre agentes informados y no informados).

Para el tratamiento *Privado*, el equilibrio IP es diferente del equilibrio ER porque los conjuntos de información de los sujetos informados y no informados son diferentes. Dada la información asimétrica, los precios del equilibrio de ER son las valoraciones condicionales a la señal, mientras que los precios de equilibrio bajo IP son el máximo entre la valoración condicional e incondicional de cada valor. Cada valor quedará en la cartera del tipo de agente que lo valore más.

Cuadro 3.6: *Valoración neutral al riesgo en el tratamiento Privado bajo la hipótesis IP.*

<i>s</i>	Activo	<i>D</i> (por bono)				Poseedor	<i>M</i>
		0	40	75	110		
<i>Baja</i>	acciones	75,01	40,34	18,76	5,34	no informado	75,01
	bonos	-	34,67	56,26	69,68	no informado	
<i>Media</i>	acciones	75,01	40,34	18,76	5,34	no informado	-
	bonos	-	40,00	68,76	75,01	informado	
	Empresa (<i>M</i>)	75,00	80,34	87,51	80,35		
<i>Alta</i>	acciones	125,01	85,01	50,01	16,01	informado	125,00
	bonos	-	40,00	75,00	109,00	informado	

En el Cuadro 3.6 se presentan los precios y las composiciones de cartera esperadas para el equilibrio IP. Los agentes cuya valoración es máxima para bonos y acciones son aquellos que están informados para la señal *Alta* y desinformados para la señal *Baja*, respectivamente.¹⁴ Se mantiene la irrelevancia de la estructura de capital ya que los compradores son del mismo tipo para las acciones y los bonos en esas dos señales, lo que implica que tienen el mismo conjunto de información; por lo tanto, la linealidad de las expectativas conduce inmediatamente a la irrelevancia de la estructura de capital (por el argumento que concluye

¹⁴La acción en el caso *Media* cuando no hay deuda es valorada por igual por los informados y los desinformados y mantenida en cartera por unos u otros indistintamente.

la Sección 3.3). Por otro lado cuando $s = Media$, los bonos son más valorados por los agentes informados y las acciones son más valoradas por los agentes desinformados. Entonces, la irrelevancia de la estructura de capital ya no se mantiene y M depende de D .

Para proporcionar una descripción visual de los datos, se presentan dos gráficos de dispersión de la evolución del precio de mercado de las acciones (Figura 3.4) y de los bonos (Figura 3.5). Los precios de las compraventas ejecutadas (eje y) y los tiempos de las transacciones (eje x, en segundos) se representan para cada señal s y nivel de deuda D . En cada panel, se incluye una curva de ajuste no paramétrica para resumir la evolución de los precios durante el transcurso del mercado y se representa la curva de ajuste no paramétrica del tratamiento *Público*, lo que permite evaluar las diferencias entre ambos tratamientos.¹⁵ En ambas figuras, una línea roja continua indica la valoración neutral al riesgo del valor basada en la señal s y una línea violeta indica la valoración neutral al riesgo (incondicional en la señal). En el tratamiento *Privado* el equilibrio ER es la valoración condicionada a la señal, mientras que en el equilibrio IP es el máximo entre las valoraciones condicionada e incondicional a la señal (ver Cuadro 3.6).

En la Figura 3.4, se observa que para $s = Baja$ y $s = Alta$, el diferencial entre tratamientos (la diferencia entre los precios promedio en *Privado* y *Público*) están en general alineados con la diferencia entre las valoraciones neutrales al riesgo incondicional (línea violeta) y condicional (línea roja continua). La existencia de los diferenciales de tratamiento en los paneles $s = Alta$ (donde los equilibrios IP y ER son iguales, como se observa comparando el Cuadro 3.6 con el Cuadro 3.2) sugiere que la valoración de precios incondicional juega un papel en la formación de precios incluso en el caso en que no importa para la determinación del precio en el equilibrio IP. En general, los gráficos muestran que en el tratamiento *Privado*, los precios están más cerca del equilibrio IP que del equilibrio ER. Para la señal $s = Media$, la diferencia de precio entre los equilibrios IP y ER es demasiado pequeña para ser útil analíticamente. Además, los diferenciales de tratamiento son pequeños y no

¹⁵La función loess se implementa en R con un parámetro 0.6. La curva de ajuste no paramétrico está rodeada de un área sombreada que representa un intervalo de confianza del 95 %.

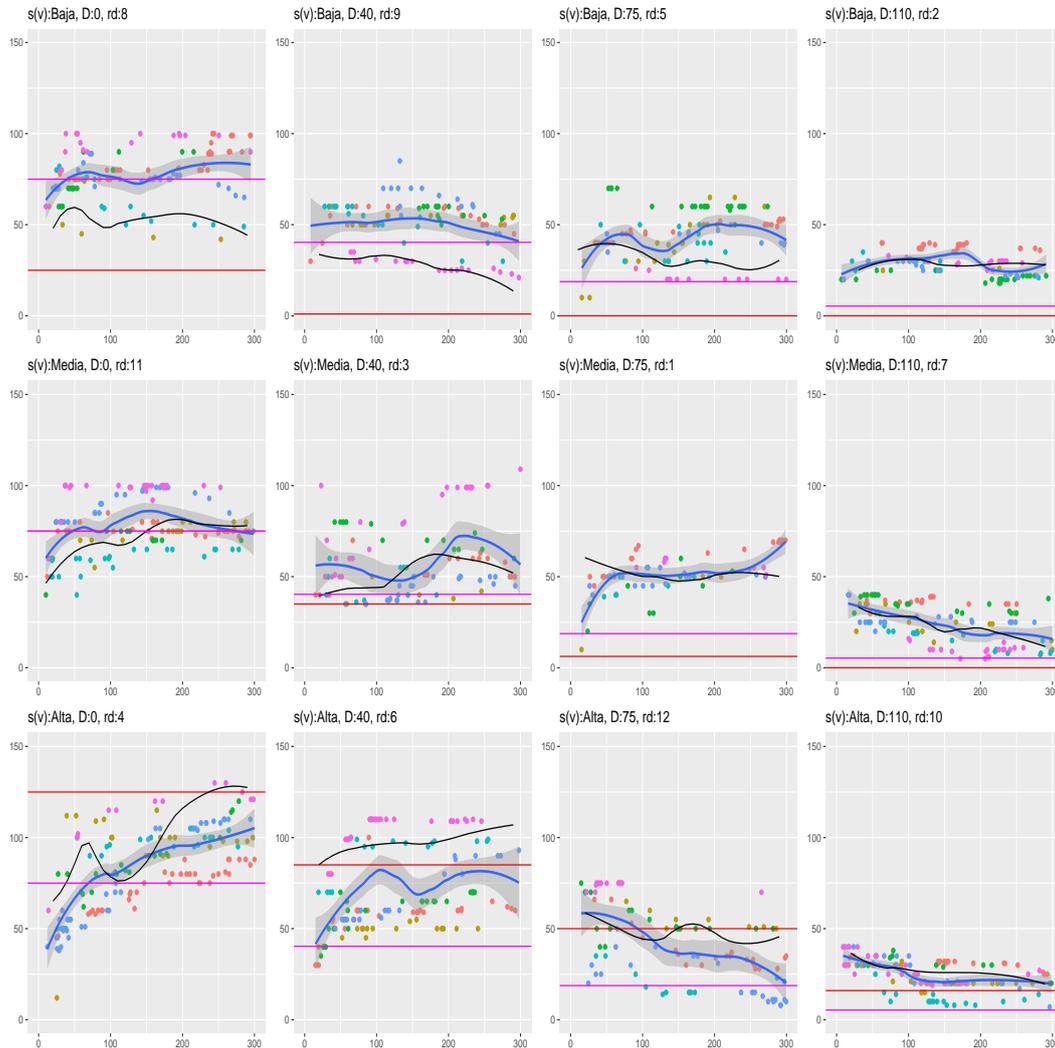


Figura 3.4: Gráfico de dispersión del tiempo (eje x) y precio (eje y) de cada transacción registrada para las acciones. Los paneles indican la señal s , el nivel de deuda (D) y el orden en que se jugaron los mercados (rd). La valoración neutral al riesgo está representada por una línea roja continua, y los puntos que representan las transacciones de un grupo dado se representan con el mismo color en todos los paneles. Se incluye una curva de ajuste no paramétrico para resumir la evolución de los precios a lo largo del tiempo mientras que la línea negra es la curva de ajuste no paramétrico del tratamiento Público del mismo panel, incluida para la comparación entre tratamientos.

se comentan.

En la Figura 3.5 se muestra la información sobre la evolución de los precios de los bonos, incluyendo una línea verde para el valor nominal del bono. Con la señal *Baja* se observa una sobrevaloración sustancial si $D = 75$ que se vuelve aguda si $D = 110$. Bajo las señales *Media* y *Alta*, se observa una infra-valoración sustancial de los bonos para $D = 110$. En general, la Figura 3.5 sugiere que los precios de mercado están más cerca de la valoración incondicional de la señal de los bonos que de los precios de equilibrio IP o ER.

En el resto de esta sección, los dos modelos se comparan siguiendo una metodología inspirada en Plott (1988): la adecuación de cada modelo se evalúa promediando los errores de precios, definidos como la diferencia absoluta entre los precios de mercado representativos (últimos negociados) en cada ronda y las valoraciones de ER y IP. Se utiliza un contraste no paramétrico para comparar los errores de precios para ambos equilibrios. Las consecuencias sobre de las carteras finales y las ganancias de los dos modelos de valoración se consideran y se contrastan estadísticamente. El análisis estadístico se completa con una discusión teórica que se resume en los Resultados 3 y 4. Finalmente, la irrelevancia de la estructura de capital se contrasta en el tratamiento *Privado*, y el resultado de esa prueba se resume en el Resultado 5.

Hipótesis 3: Equilibrio de ER (para precios de mercado). *En el tratamiento Privado, el equilibrio de ER es la especificación que mejor se ajusta a los precios de mercado.*

Tanto para el bono como para las acciones, el Cuadro 3.7 presenta la desviación media en valor absoluto entre el último precio de cada mercado y el valor teórico bajo los dos modelos considerados.¹⁶

Los resultados de la desviación media en valor absoluto sugieren que el IP es la mejor es-

¹⁶Para cada regresión, hay 12 mercados (4 niveles de deuda por 3 señales), y cada mercado es jugado por 6 grupos de participantes. Este proceso proporciona 72 observaciones de precios de mercado en el caso de las acciones y 54 para los bonos.

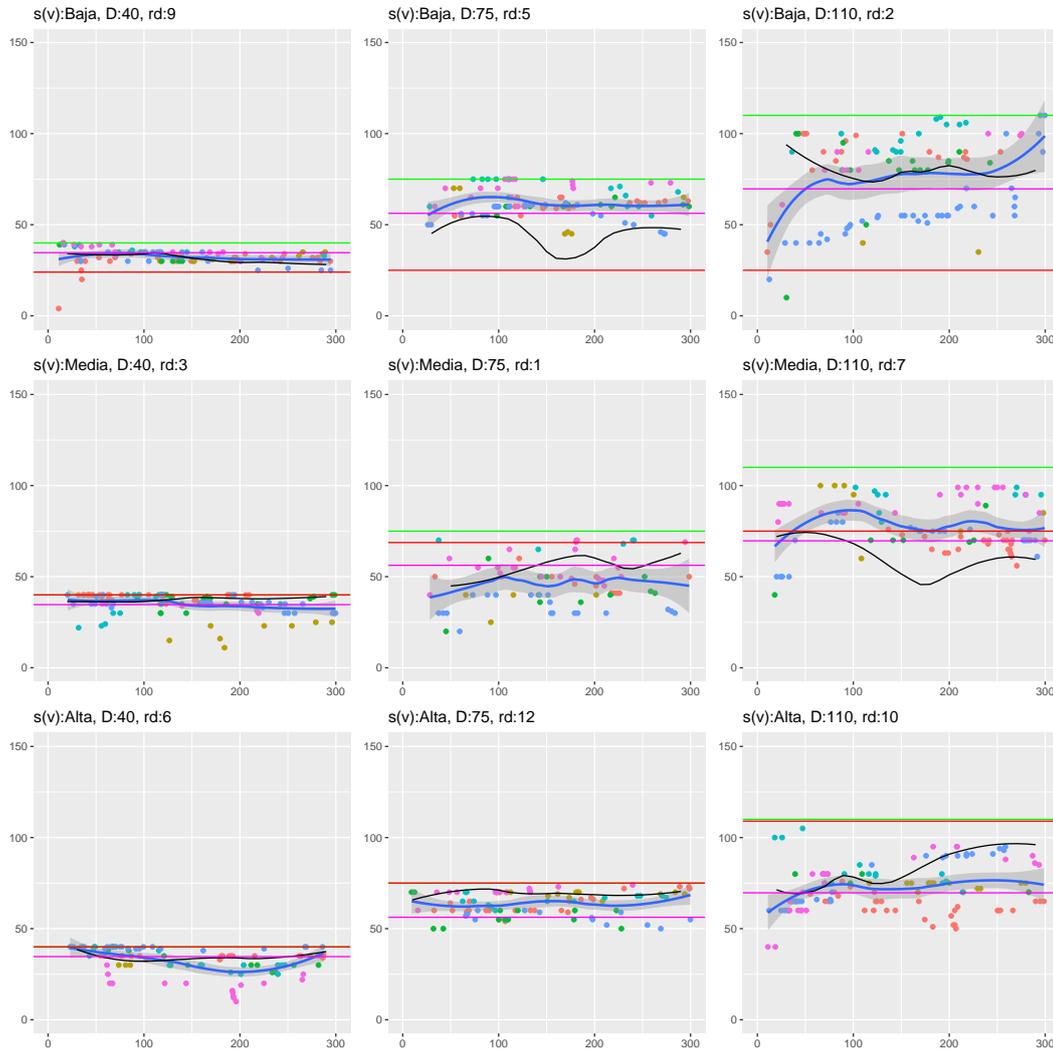


Figura 3.5: Gráfico de dispersión del tiempo (eje x , en segundos) y precio (eje y) de cada transacción registrada para los bonos. Los paneles indican la señal s , el nivel de deuda (D) y el orden en que se jugaron los mercados (rd). La valoración neutral al riesgo está representada por una línea roja continua, y los puntos que representan las transacciones de un grupo dado se representan con el mismo color en todos los paneles. Se incluye una curva de ajuste no paramétrico para resumir la evolución de los precios a lo largo del tiempo mientras que la línea negra es la curva de ajuste no paramétrico del tratamiento Público del mismo panel, incluida para la comparación entre tratamientos.

Cuadro 3.7: *Desviación media en valor absoluto entre el último precio de cada mercado (bonos y acciones) y los precios de equilibrio ER y IP*

	<i>ER</i>	<i>IP</i>
<i>Accion</i>	26,56	18,18
<i>Bono</i>	18,05	12,75

pecificación para ambos valores. Esta impresión se ve confirmada por los resultados de los contrastes estadísticos. El contraste de Wilcoxon es una prueba estadística no paramétrica que se utiliza para comparar dos muestras emparejadas para evaluar si la mediana de una población es menor que la otra. Los errores de precios con respecto a IP y ER por ronda son muestras emparejadas. La hipótesis nula de que el error de precio ER es menor que el error de precio de IP se rechaza (al 1 %) para ambos valores. Esto conduce al siguiente resultado:

Resultado 3. *La especificación IP se ajusta mejor a los precios de mercado que ER para las acciones y los bonos.*

La siguiente hipótesis está relacionada con la composición de cartera y los beneficios de los participantes informados y no informados. En principio, en un mercado eficiente (equilibrio ER), la información privada se transmite a través de los precios rápidamente debido a la competencia entre los jugadores informados para aprovechar su ventaja informativa, lo que conduce a precios observables que permiten a todos los participantes inferir la señal recibida por los jugadores informados. Como consecuencia, el mercado converge hacia los precios y las carteras ER: es decir, las ordenes de compraventa realizadas por los participantes informados integran completa y casi instantáneamente su información privada en los precios sin dejar un nivel de beneficio significativamente diferente para su propio grupo.

Sin embargo, bajo un equilibrio de IP, los jugadores no informados no infieren la verdadera señal recibida por los jugadores informados y sus valoraciones están sesgadas. Cuando la

señal es *Alta*, el precio de mercado bajo el equilibrio de IP (ver Cuadro 3.6) termina siendo la valoración de los jugadores informados, es decir, el precio de mercado es el valor ER de los valores y no se esperan beneficios especiales para los jugadores informados. Cuando la señal es *Baja*, los jugadores no informados establecen el precio de equilibrio y pagan por encima del precio racional, lo que genera beneficios anormales para los participantes con información completa.

Con respecto a la composición de las carteras de los agentes informados y no informados, el equilibrio de IP implicaría que las tenencias de bonos y acciones se concentrarían entre los participantes informados cuando la señal es *Alta* y entre los participantes no informados en el caso de que la señal sea *Baja*. Bajo el precio de ER, las tenencias de activos son indeterminadas.

La siguiente hipótesis resume las consecuencias observables de ER en las ganancias y las asignaciones de cartera: si la hipótesis ER se cumple para las ganancias (es decir, si la distribución de ganancias es similar para los participantes informados y no informados), cualquier distribución de los instrumentos sería racional, pero observacionalmente cabe esperar que con un equilibrio ER las carteras de los agentes informados y no informados tengan la misma distribución (no hay razón para que sea distinta). Por el contrario, la hipótesis de IP implica una determinada rentabilidad y una distribución de cartera concreta: los agentes informados deben obtener mayores ganancias y tener más activos (especialmente acciones) en el caso de que la señal sea *Alta* y menos en caso de que sea *Baja*.

Hipotesis 4: Equilibrio ER (para beneficios y composición de cartera). *En el tratamiento Privado los beneficios no son superiores para los participantes con información completa, y no hay diferencias significativas entre la composición de cartera según el status de acceso a la información.*

A continuación, vamos a comprobar la hipótesis de ER utilizando las diferencias en la rentabilidad y las diferencias de composición de carteras de los agentes informados y no

informados. En el Cuadro 3.8 se muestran los beneficios promedio de los participantes informados y no informados en el tratamiento *Privado*. Para comprobar la significatividad de la diferencia entre las ganancias de los participantes informados y no informados, se aplica una prueba no paramétrica: la prueba U de Mann-Whitney produce p-valores para la hipótesis nula de que la mediana de la distribución de las ganancias de los participantes informados es menor o igual que la mediana correspondiente a los participantes no informados. Los participantes informados obtienen mayores ganancias que los participantes no informados para toda la muestra y para cada señal excepto *Media*. Las diferencias son pequeñas (5,5 % de media para toda la muestra), excepto en la señal *Baja*, donde los participantes informados obtienen un beneficio medio un 50 % superior al beneficio medio de los no informados. Este resultado es precisamente el que se esperaría bajo la hipótesis de valoración de IP. El p-valor de la prueba U de Mann-Whitney (4,15 %) confirma que los participantes informados obtienen beneficios significativamente superiores a los de los participantes no informados con la señal *Baja*, mientras que para la muestra total y las otras dos señales, las ganancias obtenidas por los participantes informados no son significativamente superiores a las de los no informados.

El equilibrio de IP proporciona una hipótesis direccional clara sobre la composición de las carteras con la señal *Baja* (tenencias más altas de ambos valores por parte de los participantes no informados) y con la señal *Alta* (tenencias más altas de ambos valores por parte de los participantes informados).¹⁷ La cantidad de valores en las carteras finales de ambos tipos de participantes es claramente superior a cero en todas las señales y mercados, lo que descarta la asignación exacta de IP. Pero dichas carteras sugieren un movimiento sustancial desde la asignación original hacia la acumulación de los valores por parte del tipo de jugadores que más los valoran según el equilibrio IP. Los datos indican (ver Cuadro 3.9) que los participantes no informados han acumulado significativamente más acciones bajo la señal

¹⁷Para la señal *Media*, las diferencias de valoración entre los participantes informados y no informados son demasiado pequeñas para ser analíticamente relevantes. En consecuencia, las diferencias en las tenencias de activos no se analizan en este caso.

Cuadro 3.8: Valor medio de las ganancias según el nivel de información y p-valor de la prueba U de Mann-Whitney. Hipótesis Nula: la mediana de la distribución de las ganancias de los participantes informados es menor o igual que la de los participantes no informados.

	Tipo	Media	p – valor
<i>Todo</i>	<i>Informado</i>	308,39	(26,57 %)
	<i>No informado</i>	292,17	
<i>Baja</i>	<i>Informado</i>	104,48	(4,15 %)
	<i>No informado</i>	69,71	
<i>Media</i>	<i>Informado</i>	307,65	(82,7 %)
	<i>No informado</i>	327,31	
<i>Alta</i>	<i>Informado</i>	513,04	(13,51 %)
	<i>No informado</i>	479,47	

Baja y significativamente menos cuando la señal es *Alta*, y en ambos casos, con un p-valor menor del 1 %. Por otro lado, los participantes informados tuvieron significativamente más bonos cuando la señal fue *Alta*, pero cuando la señal fue *Baja* los participantes informados no tuvieron una menor cantidad de bonos en sus carteras.

Cuadro 3.9: Valor medio de las tenencias de acciones y bonos y p-valor de la prueba U de Mann-Whitney. Hipótesis Nula: la mediana de la distribución de las tenencias de valores es menor para los participantes informados si reciben la señal *Baja* y mayor si reciben la señal *Alta* (en comparación con la cartera de los participantes no informados).

Hipótesis Nula		Tipo	Acciones		Bonos	
			Media	p – valor	Media	p – valor
<i>Baja</i>	<i>Cantidad(Informado) ≥</i>	<i>Informado</i>	3,40	(0,61 %)	3,96	(29,1 %)
	<i>Cantidad(No informado)</i>	<i>No informado</i>	4,40		4,03	
<i>Alta</i>	<i>Cantidad(Informado) ≤</i>	<i>Informado</i>	5,99	(0,00 %)	4,79	(0,9 %)
	<i>Cantidad(No informado)</i>	<i>No informado</i>	2,67		3,47	

Resumimos la discusión anterior en el siguiente resultado:

Resultado 4: *Las carteras finales en el experimento son sustancialmente diferentes de IP y ER, pero hay una reasignación de los valores desde las dotaciones iniciales (iguales para participantes informados y no informados) hacia la asignación de IP. En cuanto a las ganancias, los participantes informados obtienen ganancias promedio significativamente superiores con la señal Baja, resultado compatible con una prevalencia sustancial de la valoración del IP por parte de los participantes desinformados.*

En conclusión, la hipótesis IP se ajusta mejor a los datos empíricos sobre precios de mercado, beneficios y composición de cartera que la hipótesis de ER. Los agentes informados intentan especular utilizando su ventaja informativa acumulando activos cuando la señal es *Alta* y vendiéndolos cuando es *Baja*. Cuando la señal es *Alta* los agentes informados compiten por los valores y llevan su precio hasta la valoración ER, de forma que sus beneficios finales no son significativamente más altos que los de los participantes no informados, mientras que en el caso en que señal es *Baja*, los agentes informados venden sus valores al precio fijado por la demanda de los participantes no informados, que es superior a su valor ER, y los agentes con información completa obtienen ganancias significativamente más altas.

Los resultados anteriores se hacen eco de hallazgos anteriores en una creciente literatura sobre finanzas experimentales, que sugieren que la inclusión de información privada en los precios de mercado es sustancialmente inferior a la de la información pública (Page (2020), Corgnet, DeSantis y Porter (2020), Biais, Hilton et al. (2005)).

Después de comparar los equilibrios IP y ER, se evalúa la irrelevancia de la estructura de capital en el tratamiento *Privado*. En el tratamiento *Público*, la irrelevancia de la estructura de capital es un resultado teórico, pero para el tratamiento *Privado* existen dos marcos de formación de creencias. En las señales *Alta* y *Baja*, la irrelevancia de la estructura de capital se mantiene por separado para los equilibrios IP y ER. Pero la discusión anterior sugiere

que en el tratamiento *Privado* la asignación de valores es intermedia entre la asignación de IP y la de ER, y las propiedades de irrelevancia de capital de una asignación híbrida no las conocemos teóricamente. En cualquier caso, la valoración empírica de la irrelevancia de la estructura de capital también se realiza para el tratamiento *Privado*. Se aplica la misma metodología del apartado anterior, partiendo de la misma Hipótesis:

Hipótesis 5: Irrelevancia de la estructura de capital. *El valor de mercado total de la empresa no depende de su endeudamiento.*

En el Cuadro 3.10 se presentan las mismas especificaciones de “Benchmark” y “Sin apalancamiento” de la sección 3.4 para el tratamiento de *Privado*. La única variable ficticia de endeudamiento significativa (al 1 %) es $D110$, y la diferencia entre $D40$ y $D110$ también es significativa al 1 %. La f^2 de Cohen para la variable ficticia de endeudamiento es 14,1 %, un efecto de tamaño aún pequeño, pero muy cercano al mediano. En nuestra opinión, los resultados de la irrelevancia de la estructura de capital bajo información asimétrica no son concluyentes, por lo que expresamos el siguiente resultado final:

Resultado 5: *Para el tratamiento de Privado, los resultados experimentales no son concluyentes respecto a la irrelevancia de la estructura de capital.*

3.6. Conclusiones

Este capítulo describe un experimento de laboratorio en el que el capital y la deuda de una empresa se negocian de forma independiente en dos mercados de doble subasta y se verifican las propiedades de perfección del mercado (no hay impuestos, costes de bancarrota ni de transacción). En el tratamiento *Público*, todos los participantes conocen una señal que contiene información sobre el valor de la empresa, mientras que en el tratamiento *Privado*, la señal se revela solo a algunos participantes elegidos al azar en cada ronda.

Cuadro 3.10: Regresión de la diferencia entre el valor de mercado de la empresa y su valor teórico contra variables ficticias de señal y deuda y la variable Ronda. Los errores estándar y los p-valores se calculan por un procedimiento robusto a problemas de agregación (por grupo de jugadores). Las desviaciones estándar se presentan entre paréntesis. La significatividad al 1 % está representada por (**), y el al 5 % está representada por (*).

	<i>Base</i>	<i>Sin apalancamiento</i>
<i>DBaja</i>	97,62** (8,69)	107,40** (6,70)
<i>DMedia</i>	99,81** (9,05)	109,46** (7,22)
<i>DAlta</i>	116,35** (11,01)	126,66** (8,77)
<i>D40</i>	2,06 (2,76)	
<i>D75</i>	15,27 (7,93)	
<i>D110</i>	15,51** (3,71)	
<i>Ronda</i>	-2,53** (0,88)	-2,79** (0,81)
<i>R²</i>	0,32	0,22
Observaciones	72	72

En el experimento, cada grupo de diez sujetos experimenta la siguiente situación durante trece períodos (el primero de prueba): hay dos activos (acciones y bonos) cuyos valores están determinados por una variable estocástica (el valor de la empresa) extraída de una distribución uniforme. La deuda de la empresa es de conocimiento común, y al comienzo de cada ronda se revela a los participantes una señal con información incompleta sobre el valor de la empresa. En cada período, los sujetos pueden negociar los instrumentos durante cinco minutos. Al final de cada ronda se informa a los sujetos sobre el verdadero valor de la empresa y sus ganancias o pérdidas del período de negociación. Al final del experimento, las ganancias por ronda se suman y se convierten en efectivo real.

A lo largo del experimento, se consideran cuatro niveles de endeudamiento y tres niveles de señal. La mitad de los grupos experimentan el tratamiento *Público*, en el que la señal que lleva información sobre el valor de la empresa se da a todos los participantes (una situación similar a la hipótesis de información simétrica del modelo de Merton). Los demás experimentan el tratamiento *Privado*, donde la señal se revela solo a cuatro participantes que se eligen al azar en cada período.

Los resultados del tratamiento *Público* se utilizan para determinar si la valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales es un buen modelo para los precios de mercado cuando dos valores (acciones y bonos) tienen que canalizar el valor de una sola empresa a sus propietarios finales. También se pone a prueba la hipótesis de la irrelevancia de la estructura de capital, que se debe verificar en el tratamiento *Público* siempre que los participantes del mercado actúen racionalmente dada la información disponible y tengan preferencias de media-varianza (incluida la neutralidad del riesgo, que es la hipótesis más plausible cuando las cantidades que se dirimen son pequeñas comparadas con la renta permanente del participante).

Los resultados experimentales rechazan la valoración de expectativas racionales con una sobrevaloración significativa tanto de los bonos como de las acciones; esta sobrevaloración es más acusada en las acciones cuyo valor teórico es cero o cercano a cero. Probablemente

esta sobrevaloración esta total o parcialmente influida porque los errores de valoración de aquellos instrumentos cuyo valor es cero o cercano a cero son necesariamente positivos y, en consecuencia, no se anulan con otros de signo opuesto en el proceso de formación de precios. A pesar de este resultado sobre la valoración (neutral al riesgo) de expectativas racionales, los resultados experimentales confirman la irrelevancia de la estructura de capital en el tratamiento *Público*.

El análisis de los resultados del tratamiento *Privado* se centra en la comparación entre el equilibrio de expectativas racionales y el de información previa (bayesiana). La especificación de información previa se ajusta mejor a los precios de mercado que la de expectativas racionales para las acciones y los bonos. Las carteras finales en el experimento son sustancialmente diferentes de las que sugieren los dos modelos de equilibrio, pero hay una reasignación de los valores desde las tenencias iniciales (iguales para participantes informados y no informados), hacia la asignación de información previa. En lo que se refiere a los beneficios, en el caso en el que la información completa lleva a una mayor valoración de los instrumentos, estos son comprados por los agentes informados, y sus valores de mercado corresponden a su valor neutral al riesgo condicional en la señal, con lo que no aparecen beneficios extraordinarios. Sin embargo, cuando los participantes sin información completa tienen una valoración más alta, al emitir órdenes de compra por encima de la valoración neutral al riesgo (condicional en la información completa) aparecen beneficios significativamente más altos para los participantes con información completa. Finalmente, para el tratamiento de *Privado*, los resultados experimentales no son concluyentes respecto a la irrelevancia de la estructura de capital.

Capítulo 4

Conclusiones

Como se argumentó en la introducción de esta Tesis Doctoral, los Capítulos 2 y 3, que forman su cuerpo, tienen un hilo conductor común: la doble naturaleza del capital (como stock de bienes de producción por un lado y como stock de contratos que canalizan las rentas no laborales por otro) y los problemas de representar el capital en ambas acepciones en los modelos económicos cuantitativos.

Por otro lado, los resultados obtenidos son altamente idiosincráticos de cada capítulo separadamente:

En el Capítulo 2 se presenta un modelo de crecimiento estándar con la energía como insumo en la función de producción. La calidad del stock disponible de recursos energéticos es ordenada por su Tasa de Retorno Energético (TRE).¹ Dicho capítulo describe los problemas de contabilidad energética para la estimación de la TRE, y presenta la curva de auto-consumo de energía como la mejor representación matemática del total de recursos energéticos cuando la TRE es heterogénea.

¹Definida como “la relación entre la energía producida y los costes energéticos incurridos para generarla y entregarla”. En inglés “Energy Return on Energy Investment” (EROI).

Con estos elementos se presenta una extensión del modelo de crecimiento económico neoclásico que incluye en la función de producción un flujo de energía como input. La producción de energía es proporcional al capital instalado en el sector energético e inversamente proporcional al auto-consumo de energía de los recursos energéticos en uso. Para el modelo así construido (llamado Ramsey-Hotelling-TRE) se ha calculado su estado estacionario para diferentes niveles de auto-consumo de energía y se ha realizado un análisis de estática comparativa de los estados estacionarios que generan los distintos parámetros del modelo.

Desde un punto de vista de diseño de políticas, el resultado más interesante de nuestro trabajo es una vez incorporados en un marco neoclásico, los efectos “en espiral de la muerte” de una reducción sustancial en la TRE de las fuentes de energía en uso no parecen tan dramáticos como sugiere parte de la literatura de Economía Ecológica. El experimento numérico sobre el impacto del agotamiento de los recursos energéticos en el consumo de estado estacionario concluye que un aumento del auto-consumo de energía del 10 % al 20 % tendría un impacto significativo para todos los parámetros de elasticidad considerados pero nunca reduciría el consumo del agente representativo en más del 11 %.

El modelo también ha encontrado algunas dinámicas sorprendentes: en primer lugar cuando la calidad de los recursos energéticos empeora (es decir disminuye la TRE) el tamaño del sector energético (medido en porcentaje de horas de trabajo utilizadas por dicho sector) puede aumentar cuando la elasticidad de sustitución entre capital y energía es baja, o, más contraintuitivamente, disminuir cuando es alta (con el caso Cobb-Douglas como frontera entre ambas situaciones). En segundo lugar, la disminución del consumo cuando la TRE empeora es más constante para una menor elasticidad de sustitución entre capital y energía, mientras que, para una mayor elasticidad de sustitución, la disminución es muy rápida para niveles muy bajos de auto-consumo aunque después de las primeras etapas de agotamiento la facilidad de sustitución entre energía y capital reduce drásticamente el efecto sobre el consumo del agotamiento de los recursos de mejor calidad.

En conjunto, creemos que este trabajo es el primero donde los recursos energéticos cla-

sificados por calidad mediante la TRE aparecen en un modelo de crecimiento neoclásico (con maximización de la utilidad individual y equilibrio en el mercado) estableciendo el uso económico del “análisis de energía neta” sobre bases teóricas más firmes, y tratando rigurosamente y dentro del marco de la economía neoclásica las cuestiones suscitadas por la llamada Economía Ecológica, Neo-fisiócrata o Bio-economía.

Las técnicas y el enfoque de este capítulo van en la línea general de la Tesis Doctoral, al ser una instancia particular de la cuestión más general tratada por la Tesis: los avances en la representación del capital en la economía cuantitativa. En este caso, los avances propuestos se refieren a la representación del capital real, tienen un enfoque de largo plazo, y creemos que permiten mejorar la comprensión de la economía humana dentro del medio ambiente físico en el que se desenvuelve.

En el Capítulo 3 se presenta un experimento que pone a prueba la irrelevancia de la estructura de capital, y se analizan sus resultados. En dicho experimento, cada grupo de diez sujetos se enfrenta a la siguiente situación durante trece períodos: hay dos activos (acciones y bonos), cuyos valores están determinados por una variable estocástica (el “valor de la empresa”) extraída de una distribución uniforme. La deuda de la empresa es conocida por todos los participantes. Al inicio de cada ronda del experimento se revela a los participantes una señal con información incompleta sobre el valor de la empresa.

En cada período, los sujetos pueden negociar los precios del bono y la acción durante cinco minutos en dos mercados de subasta doble. En cada ronda los sujetos están inicialmente dotados de un préstamo de efectivo y una cartera de bonos y acciones que imita la estructura financiera de la empresa. Al final de cada ronda se informa a los sujetos sobre el verdadero valor de la empresa y sus ganancias o pérdidas del período de negociación. Al final del experimento, las ganancias por ronda se suman y se convierten en efectivo real. En el transcurso del experimento se consideran cuatro niveles de endeudamiento y tres niveles de la señal de valor. Seis de los doce grupos realizarán el tratamiento *Público*, donde la señal que lleva información sobre el valor de la empresa se entrega a todos los participantes

(una situación similar a la hipótesis de información simétrica del modelo de Merton). Los otros seis grupos harán el tratamiento *Privado* donde la señal solo se revelará a cuatro participantes elegidos al azar en cada ronda.

El tratamiento *Público* permite analizar si la valoración neutral al riesgo y la irrelevancia de la estructura de capital se verifican en unas condiciones diseñadas para ser semejantes a las que requiere el Teorema de Modigliani-Miller. El tratamiento *Privado* permite la evaluación del desempeño empírico del marco de formación de creencias de expectativas racionales respecto del de información previa (bayesiana).

Los resultados del tratamiento *Público* rechazan la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo) con una sobrevaloración significativa tanto de los bonos como de las acciones; esta sobrevaloración es más acusada en las acciones cuyo valor teórico es cero o cercano a cero. Probablemente esta sobrevaloración es total o parcialmente influida porque los errores de valoración de aquellos instrumentos cuyo valor es cero o cercano a cero son necesariamente positivos y, en consecuencia, no se anulan con otros de signo opuesto en el proceso de formación de precios. A pesar de este resultado sobre la valoración de expectativas racionales (neutral al riesgo), los resultados experimentales confirman la irrelevancia de la estructura de capital en el tratamiento *Público*.

El análisis de los resultados del tratamiento *Privado* se centra en la comparación entre los equilibrios de expectativas racionales (ER) y de información previa (IP). La especificación IP se ajusta mejor a los precios de mercado que ER para las acciones y los bonos. Las carteras finales en el experimento son sustancialmente diferentes de las que sugieren los dos modelos de equilibrio, pero hay una reasignación de los valores desde las tenencias iniciales (iguales para participantes informados y no informados), hacia la asignación de IP. En lo que se refiere a los beneficios, en el caso en el que la información privilegiada lleva a una mayor valoración de los instrumentos, estos son comprados por los agentes informados, y sus valores de mercado corresponden a su valor neutral al riesgo condicional en la información privilegiada, con lo que no aparecen beneficios extraordinarios. Sin

embargo, cuando los participantes sin información privilegiada tienen una valoración más alta, al emitir órdenes de compra por encima de la valoración neutral al riesgo (condicional en la información privilegiada) aparecen beneficios significativamente más altos para los participantes con información privilegiada. Finalmente, para el tratamiento de *Privado*, los resultados experimentales no son concluyentes respecto a la irrelevancia de la estructura de capital.

En resumen, el Capítulo 3 se centra en cuestiones vinculadas a la representación del capital financiero en Economía, y explora experimentalmente un resultado central de las Finanzas Corporativas: el Teorema de Modigliani-Miller.

La primera observación que nos parece pertinente sobre el conjunto de esta Tesis es que los dos trabajos presentados son ejemplos de que el núcleo de la economía neoclásica es suficientemente flexible para asumir las ideas y metodologías de escuelas económicas alternativas e incorporar nuevas herramientas metodológicas. El Capítulo 2 es un ejercicio claro de incorporación de un concepto central de la Economía Ecológica (la TRE) dentro del marco de la economía neoclásica. En el Capítulo 3 una cuestión teórica clásica (la irrelevancia de la estructura de capital en la financiación empresarial) se aborda con una metodología empirista, que originalmente era periférica en Economía (aunque ahora el uso de experimentos económicos es ya un estándar asumido).

No solo la metodología del individualismo metodológico es capaz de lograr resultados en ámbitos de la ciencia social alejados de las temáticas tradicionales de la economía (el llamado imperialismo económico), sino que el proceso inverso también se produce. Perspectivas originalmente ajenas a la teoría económica como la perspectiva de clase social o la lógica de la competencia política se han podido expresar en el lenguaje de la economía neoclásica.² Esta capacidad de extensión y absorción es probablemente la prueba más palpable de que

²Concretamente el Marxismo Analítico (Roemer, 1986) y la Teoría de la Elección Pública (Persson y Tabellini, 2000) incorporan las perspectivas de clase y competencia política en el marco de la economía neoclásica.

el enfoque reduccionista (individualismo metodológico) y cuantitativo que ha tenido un indiscutible éxito en expandir la comprensión humana del orden material es también el más fértil para abordar la comprensión del orden social.

Los dos trabajos abordados en esta Tesis se seleccionaron principalmente por analizar dos cuestiones concretas y auto contenidas (como es conveniente en una Tesis Doctoral) dentro de la agenda investigadora más general comentada en la introducción. Los resultados obtenidos son particulares, pero el éxito en lograrlos resulta alentador para continuar explorando en la línea sugerida en la introducción, profundizando en la incorporación del comportamiento empresarial y las relaciones multisectoriales en los modelos económicos cuantitativos.

Durante las décadas posteriores a la crítica de Lucas (Lucas, 1976) la modelización económica se ha centrado sobre todo en desarrollar modelos económicos perfectamente consistentes y poblados por agentes optimizadores (habitualmente uno solo) que forman expectativas racionales. El precio de esa consistencia y exactitud ha sido una extrema simplicidad de la economía analizada, y el hecho de que la dinámica del modelo estuviese dominada por la reacción a “shocks” exógenos de cuya naturaleza el modelo no daba cuenta alguna.

Probablemente, el aumento del interés por las redes económicas y los modelos de agentes autónomos indica que esa tendencia se va a revertir en esta década, y se van a realizar modelos más detallados de los agentes económicos y sus relaciones, relajando las exigencias sobre su racionalidad y capacidad predictiva.³

En ese sentido, creemos que la continuación de los trabajos aquí presentados debe seguir la estela del trabajo sobre microsimulación a nivel de empresa y sector planteado por van Tongeren (Tongeren, 1995). Algunas técnicas econométricas y la disponibilidad de paquetes estadísticos integrados con lenguajes de programación permiten abordar la modelización de

³Conviene recordar que aunque los objetivos de los modelos de agentes autónomos y la microsimulación son habitualmente distintos (los modelos de agentes autónomos suelen tener intención explicativa, y los de microsimulación, predictiva), ambas técnicas son metodológicamente similares.

la evolución de la información contable a nivel de empresa con más naturalidad y garantías de éxito que los modelos ad hoc propuestos por van Tongeren.

Además la naturaleza de los productos científicos ha cambiado sustancialmente desde mediados de los años 90 del siglo pasado. Antes de la Segunda Guerra Mundial, la comunicación científica estaba dominada sobre todo por la publicación de libros, y los artículos en las revistas científicas especializadas tenían una función más auxiliar. Desde el final de la Segunda Guerra Mundial la hegemonía del paper académico como producto científico ha sido incontestada.

Sin embargo, conforme el análisis de datos gana peso dentro de la actividad científica, dos tendencias están transformando la producción académica: por un lado, los scripts y paquetes que implementan resultados científicos están ganando peso como productos científicos en si mismos. Por ejemplo, “The Journal of Statistical Software” tiene un factor de impacto considerable siendo principalmente una revista centrada en comunicar y documentar implementaciones de resultados estadísticos.⁴ Por otro lado, un creciente movimiento de “ciencia abierta” propone que la replicabilidad de los resultados científicos sea un criterio central de aceptación, y esto se logra mediante la entrega la comunidad científica de los datos y los programas que permiten la plena replicación de los resultados publicados.

Mientras que en una academia dominada por el “paper” los modelos sencillos, pedagógicos y perfectamente resueltos (idealmente con soluciones algebraicas cerradas), tienen una ventaja evidente, la probable consolidación de paquetes, scripts, y “notebooks” (de código abierto) como productos científicos de igual valor al paper hace que los modelos detallados, y actualizables (con bases de datos accesibles online) se vuelvan más atractivos. También permite pensar en un futuro donde los productos académicos no sean simplemente producidos y publicados, sino que aquellos resultados de más interés se mantengan permanentemente actualizados. Que al “descubrir” que ha caracterizado la labor académica en ciencias sociales del siglo XX, se le añada el “monitorizar” en el siglo XXI.

⁴ISI web of Knowledge, Impact Factor 10.30 en 2018.

La detallada e inabarcable descripción (empresa a empresa, sector por sector y ecuación a ecuación) de la economía holandesa del modelo de van Tongeren estaba condenada como libro a la oscuridad. El mismo producto en formato de software de código abierto sin duda sería mucho más interesante para la comunidad académica e incluso para usuarios privados o públicos interesados en el análisis económico y financiero.

La incorporación del nivel de la decisión empresarial y las relaciones intersectoriales en economía sin duda es una agenda investigadora extensa, que supera a cualquier persona; se trata de una apuesta por el realismo modelizador y descriptivo, después de muchos años donde el capital y la empresa han sido en buena parte suplantadas por funciones de producción simples en la modelización macroeconómica.

Aunque la era de la modelización del proceso económico en base a funciones de producción, expectativas racionales y agentes representativos era inevitable, y los enormes avances de la economía en las últimas décadas indican que ha sido una etapa inmensamente fértil, las herramientas, el conocimiento teórico y las condiciones institucionales están maduras para iniciar una nueva etapa, que además contiene en si la promesa de poder abordar primero la comprensión del ciclo económico, y acaso posteriormente, si acompaña la voluntad política, su eliminación.

Apéndice A

Instrucciones para los participantes

A.1. Instrucciones generales

¡Bienvenido! Gracias por venir. El propósito de esta sesión es estudiar cómo las personas toman sus decisiones financieras.

Además de los 5 Euros que te daremos por participar, podrás ganar una cantidad adicional de dinero que dependerá de tus decisiones. Para asegurar que el experimento se desarrolla correctamente te pedimos que cumplas las siguientes normas:

1. Por favor, no hables con otros participantes.
2. No olvides apagar tu teléfono móvil.
3. Si tienes cualquier pregunta, no dudes en levantar la mano y nosotros la respondemos.

Si no cumples estas normas los datos obtenidos no nos servirán y tendremos que excluirte de la sesión en cuyo caso no recibirás ninguna compensación. Todos los pagos que verás

estarán expresados en ECU (“experimental currency units”). Te pagaremos un tercio de céntimo de Euro (=0,0033 Euros) por cada ECU ganado durante el experimento. Es decir, 300 ECU ganados en el experimento equivalen a un Euro.

Como la cantidad de dinero que obtendrás depende de tus decisiones, es muy importante que leas cuidadosamente las instrucciones. Si no estás seguro de haber entendido algo, no dudes en llamarnos en cualquier momento para que podamos resolver tus posibles dudas.

A.2. Descripción de la situación

Al inicio del experimento se dividen todos los participantes aleatoriamente en grupos de 10. Los grupos no cambiarán durante la sesión y no habrá ninguna interacción entre los diferentes grupos. Los integrantes de cada grupo negocian dos activos (un bono y una acción) emitidos por una empresa durante 13 periodos de compraventa. La suma de las ganancias en los últimos 12 periodos determinará el pago final (en Euros). Es decir, el primer periodo es de prueba. En cada periodo, antes de abrir los mercados de compraventa, se determinará el valor de la empresa mediante un sorteo aleatorio, en el cual cada número natural entre 0 y 6.000 ECU tiene la misma probabilidad. La empresa tiene un determinado nivel de endeudamiento que cambia cada periodo. Utilizaremos 4 niveles de endeudamiento: 0 ECU, 1.600 ECU, 3.000 ECU y 4.400 ECU.

En cada periodo, cada uno de los 10 integrantes de un grupo recibe 4 acciones y 4 bonos (si hay deuda). Por tanto, la empresa emite cada periodo un total de 40 acciones y 40 bonos (si hay deuda). Eso implica que el valor nominal de cada bono es de 40 ECU si la deuda total es de 1.600 ECU, 75 ECU si la deuda total es de 3.000 ECU y 110 ECU si la deuda total es de 4.400 ECU. Además, cada jugador recibe cada periodo 4.000 ECU en efectivo, que se pueden utilizar para comprar bonos y acciones, pero que deben devolverse (sin intereses) al final del periodo.

Para el tratamiento Privado: Cuando abre el mercado, todos los jugadores son informados del valor nominal de la deuda incurrida por la empresa. Además, se informará a cuatro jugadores elegidos al azar del sub-intervalo $(0,2000]$, $(2000,4000]$, $(4000,6000]$ en el que ha resultado estar el valor de la empresa. Los participantes que reciben la información privada se eligen de nuevo al azar en cada periodo. Los otros seis jugadores no reciben ninguna información privada y, por tanto, verán el intervalo $[0,6000]$ en su pantalla. También se indica en pantalla el intervalo anterior con sus extremos divididos por 40, es decir, el rango en que se encuentra el pago por tener al final del periodo un bono y una acción en cartera. Por ejemplo, si la pantalla muestra que el valor total de la empresa pertenece al intervalo $(2000,4000]$ también se informa el intervalo $(2000/40,4000/40)=(50,100]$, que es donde se encuentra el pago que se recibirá a final del periodo por mantener en cartera un bono y una acción de la empresa. Obviamente, los jugadores pueden tener en todos los momentos cualquier combinación de bonos y acciones en su cartera.

El mercado permanece abierto durante cinco minutos (=300 segundos). Al final de cada periodo se presentará el verdadero valor de la empresa, el valor final de los activos en cartera y el beneficio del jugador. A continuación, explicaremos como se calcula el beneficio de cada jugador.

A.3. Beneficios

Si la empresa ha emitido deuda, los bonos cobran primero del valor de la empresa hasta su valor nominal, o hasta una parte alícuota del valor de la empresa si no es posible satisfacer toda la deuda, y el resto del valor se distribuye a partes iguales entre las 40 acciones de la empresa.

A continuación se ponen dos ejemplos del valor terminal de la empresa y del reparto de su valor entre bonos y acciones. En cada uno de ellos calculamos el beneficio para dos

jugadores. Jugador A dispone al final del periodo de 6 bonos, 5 acciones y 3.500 ECU en su cuenta. Jugador B dispone de 3 bonos, 2 acciones y 4.700 ECU en cuenta.

Ejemplo 1: La empresa ha emitido 40 bonos con un valor nominal de 40 ECU cada uno (su deuda total de 1.600 ECU), y resulta valer 4.000 ECU. Por tanto, el valor nominal de los bonos se paga íntegramente y las 40 acciones disponen para repartirse de 2.400 ECU, es decir, 60 ECU por acción.

1. Beneficio del Jugador A: $(6 \text{ bonos} \times 40 \text{ ECU/bono} + 5 \text{ acciones} \times 60 \text{ ECU/acción} + 3.500 \text{ ECU} - 4.000 \text{ ECU} [\text{por la devolución del préstamo de efectivo}]) = 240 + 300 - 500 = 40 \text{ ECU}.$
2. Beneficio del Jugador B: $(3 \text{ bonos} \times 40 \text{ ECU/bono} + 2 \text{ acciones} \times 60 \text{ ECU/acción} + 4.700 \text{ ECU} - 4.000 \text{ ECU}) = 20 + 120 + 700 = 940 \text{ ECU}.$

Ejemplo 2: La empresa ha emitido 40 bonos con un valor nominal de 75 ECU cada uno (su deuda total es de 3.000), y resulta valer 2.000 ECU. Como el valor de la empresa es menor que la deuda emitida, las acciones no reciben remuneración. Por otro lado, los 40 bonos se reparten a partes iguales el valor de la empresa, dando lugar a un ingreso por cada bono de 50 ECU.

1. Beneficio del Jugador A: $(6 \text{ bonos} \times 50 \text{ ECU/bono} + 5 \text{ acciones} \times 0 \text{ ECU/acción} + 3.500 \text{ ECU} - 4.000 \text{ ECU}) = 300 - 500 = -200 \text{ ECU}.$
2. Beneficio del Jugador B: $(3 \text{ bonos} \times 50 \text{ ECU/bono} + 2 \text{ acciones} \times 0 \text{ ECU/acción} + 4.700 \text{ ECU} - 4.000 \text{ ECU}) = 150 + 700 = 850 \text{ ECU}.$

La pantalla está dividida en tres partes. El lado izquierdo de la pantalla se utiliza para realizar las operaciones de compraventa y recibir la información de mercado sobre las acciones, y el derecho es del todo análogo pero permite gestionar los bonos. Cuando la empresa no ha emitido deuda, el número de bonos en cartera es cero, y el mercado de bonos no aparece en la pantalla. En el centro de la pantalla se informa sobre:

1. Las dotaciones de que dispone cada jugador de efectivo, acciones y bonos.
2. El nivel de deuda de la empresa (por bono y en total).
3. Información sobre el valor de la empresa (en caso de que el participante haya sido elegido aleatoriamente para recibir esta información), en forma del sub-intervalo del intervalo $(0,6.000]$ donde se encuentra el valor total de la empresa. También se indica el intervalo anterior con sus extremos divididos por 40, es decir, el rango en que se encuentra el pago por tener al final del periodo un bono y una acción en cartera.

Con esta pantalla cada jugador puede emitir una orden de compra o venta para un bono o acción estableciendo un precio de compra (máximo que se está dispuesto a pagar) y otro de venta (mínimo que se está dispuesto a cobrar) para cada instrumento (bono o acción), y pulsando el botón de enviar.

Como no tiene sentido que un participante esté dispuesto a vender un instrumento por menos dinero del que está dispuesto a comprarlo, o en sentido contrario, que esté dispuesto a comprar por menos precio del que está dispuesto a vender, el programa impide que se emitan:

1. Una orden de compra de un instrumento por más precio que la propia orden de venta en vigor (si la hay).
2. Una orden de venta de un instrumento por menos precio que la propia orden de compra en vigor (si la hay).

Las órdenes de compra o venta serán siempre números positivos, y el valor máximo que se admite para una orden de compra o de venta será para un bono igual a su valor nominal, y para una acción igual al que recibiría la acción en el caso en que la empresa vale 6.000 ECU, es decir ($6000/40=150$ ECU) menos el valor nominal de cada bono en ese periodo.

Existe un listado de órdenes de compra y venta en la pantalla donde las órdenes propias están marcadas con un asterisco. Un jugador puede anular una orden propia (de compra o venta), pinchando con el ratón en la orden que desea eliminar, y utilizando el correspondiente botón de borrar.

En ningún caso se pueden emitir órdenes de compra para cuya ejecución no se disponga del dinero u órdenes de venta para los que no se disponga de los instrumentos correspondientes para ejecutarlas. Cada jugador puede tener como mucho UNA orden de compra y UNA orden de venta abierta en cada uno de los dos mercados. Para cada uno de los mercados, se pueden observar las órdenes de compra y venta en cola y la evolución reciente de los precios de compraventa (en un gráfico).

Las reglas de ejecución de órdenes son:

1. Las operaciones se ejecutan ordenadas por precio de compra y orden inverso de precio de venta.
2. La primera compraventa se produce cuando en la cola de mercado entra una orden de compra de mayor precio que el de la orden de venta más barata, o cuando en la cola entra una orden de venta más barata que la orden de compra más cara.
3. La orden de compraventa se ejecuta según el más antiguo de los precios (de oferta o demanda) que participan en la compraventa ejecutada. Una vez realizada la compraventa las órdenes ejecutadas se eliminan de sus respectivas colas.

Ejemplo: Supongamos que en la cola de uno de los dos instrumentos existen dos órdenes de venta por valor de 40 y 30 ECU, y tres órdenes de compra de 20, 15 y 10 ECU,

respectivamente. En esas condiciones, como la orden de venta más barata es de 30 EUR, y la más cara de compra es de 20 EUR, no hay ninguna orden por ejecutarse. Un jugador introduce una nueva orden de compra por 41 ECU. La orden de compra tiene un mayor valor que la orden de venta de menor valor (30 ECU). Por tanto, se ejecuta la orden recién introducida, con un precio igual al de la orden más antigua de las dos (los 30 ECU de la orden de venta). Como consecuencia de la compraventa, el comprador obtiene por 30 ECU el instrumento, lo que se refleja en los inventarios de instrumentos y efectivo de ambos jugadores (el comprador ve aumentar los activos en su inventario, y ve reducirse su efectivo en 30 ECU; el vendedor ve reducirse su inventario del activo en una unidad, y su cuenta de efectivo se incrementa en 30 ECU).

Bibliografía

- Acemoglu, D., Robinson, J., 2012. Why Nations Fail: The Origins of Power, Prosperity, and Poverty. Crown Business.
- Acemoglu, D., Akcigit, U., Kerr, W., 2016. Networks and the Macroeconomy: An Empirical Exploration. NBER Macroeconomics Annual.
- Aguilera, R.F., Eggert R.G., Lagos, G., Tilton J.E, 2009. Depletion and the Future Availability of Petroleum Resources. The Energy Journal.
- Anderson, R.K., Moroney, J.R. , 1993. Morishima elasticities of substitution with nested production functions. Economic Letters.
- Angerer, M., Neugebauer, T., Shachat, J., 2019. Arbitrage bots in experimental asset markets. MPRA Paper 96224, University Library of Munich
- Asparouhova, E., Besliu, C., Lemmon, M., Rock, B., 2016. Payout policy, investor rationality, and market efficiency: evidence from laboratory experiments.. Technical report, Working paper, University of Utah.
- Atalay, E., 2017. How Important Are Sectoral Shocks?. American Economic Journal: Macroeconomics.
- Atkeson, A., Kehoe, P., 1999. Models of energy use: putty-putty vs. putty-clay. The American Economic Review.
- Ayres, A.U., Warr, B., 2003. Accounting for growth: the role of physical work. Energy.

- Ayres, A.U., Warr, B., 2005. Accounting for growth: the role of physical work. *Structural Change and Economic Dynamics*.
- Bassi, A., Powers, R., Schoenberg, W., 2010. An integrated approach to energy prospects for North America and the rest of the World. *Energy Economics*.
- Battisti,R., Corrado, A., 2005. Evaluation of technical improvements of photovoltaic systems through life cycle assessment methodology. *Energy*.
- Baqae, D.R., Farhi,E., 2017. The Macroeconomic Impact of Microeconomic Shocks: Beyond Hulten's Theorem. NBER Working Papers 23145.
- Baumol, W., Wolff, E., 1981. Subsidies to New Energy Sources: Do They Add to Energy Stocks?. *The Journal of Political Economy*.
- Bentolila, S., Saint-Paul, G., 2003. Explaining Movements in the Labour Share. *The B.E. Journal of Macroeconomics*.
- Bernanke, B., Gertler, M., Gilchrist, S., 1999.The financial accelerator in a quantitative business cycle framework. *Handbook of Macroeconomics*.
- Bezil, C.,Hansen, J., 1999. Subjective Discount Rates, Intergenerational Transfers and the Return to Schooling. Working Paper of the Institute for the Study of Labor.
- Biais, B., Hilton D., Mazurier K.,Pouget, S., 2005. Judgmental Overconfidence, Self-Monitoring and Trading Performance in an Experimental Financial Market. *Review of Economic Studies* 72(2), 287-312.
- Black, S., Cusbert, T., 2010. Durable Goods and the Business Cycle. RBA Bulletin, Reserve Bank of Australia.
- Borio,C., Disyatat, P, Juselius, M., 2013. Rethinking potential output: embedding information about the financial cycle. BIS Working Papers N. 404.

- Bossaerts, P, Frydman, C., Ledyard, 2013. The Speed of Information Revelation and Eventual Price Quality in Markets with Insiders: Comparing two Theories. *Review of Finance*.
- Brandt, A. R., Alex, E., Farrell, A.E., 2007. Scraping the Bottom of the Barrel: CO2 Emission Consequences of a Transition to Low-Quality and Synthetic Petroleum Resources. *Climatic Change*.
- Brunnermeier, M.K., Sannikov, Y., 2014. A Macroeconomic Model with a Financial Sector. *American Economic Review*.
- Bullard, C.W., Penner, P.S., Pilati, D.A., 1978. Net energy analysis: Handbook for combining process and input-output analysis. *Resources Energy*.
- Buslei,H., Bach,S., Simmler,M.,2014.Firm Level Models: Specifically Firm Models based upon large data sets. In *Handbook of Microsimulation Modelling*.
- Campbell, J.Y., Cochrane, J.H., 1999. By Force of Habit: A Consumption Based Explanation of Aggregate Stock Market Behavior. *Journal of Political Economy*
- Carroll,C.,2016.Theoretical Foundations of Buffer Stock Saving. Manuscript, Department of Economics, Johns Hopkins University.
- Cass, D., 1965. Optimum Growth in an Aggregative Model of Capital Accumulation. *Review of Economic Studies*.
- Chakravorty, U., Roumasset,J., Tse, K., 1997. Endogenous substitution among energy resources and global warming. *Journal of Political Economy*.
- Chakravorty, U., Moreaux, M., Tidball, M., 2008. Ordering the Extraction of Polluting Nonrenewable Resources. *American Economic Review* .
- Charness, G., Neugebauer, T., 2019. A test of the Modigliani-Miller invariance theorem and arbitrage in experimental asset markets. *The Journal of Finance*.

- Chen, Y., Feng, L., Wang, J., Hook, M., 2017. Energy-based energy return on investment method for evaluating energy exploitation. *Energy*.
- Chetty, R., Saez, E., 2005. Dividend Taxes and Corporate Behavior: Evidence from the 2003 Dividend Tax Cut. *The Quarterly Journal of Economics*.
- Cleveland, C., Kauffman, R., 1991. Forecasting ultimate oil recovery and its rate of production: incorporating economic forces into the models of M.King Hubbert. *The Energy Journal*.
- Cleveland, C., 1992. Energy quality and energy surplus in the extraction of fossil fuels in the US. *Ecological Economics*.
- Cleveland, C., Kauffman, R., Stern, D. , 1999. Aggregation and the role of energy in the economy. *Ecological Economics*.
- Cleveland, C., 2001. Net energy and the extraction of oil and gas in the United States. *Ecological Economics*.
- Cline, W., 2015. Testing the Modigliani-Miller theorem of capital structure irrelevance for banks. Working Paper Series WP15-8, Peterson Institute for International Economics.
- Cochrane, J.H, 2017. *Macro-Finance*, Review of Finance.
- Cohen J. E., 1988. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc
- Constanza, R. (ed.), 1991. *Ecological Economics: The science of management and sustainability*. Columbia University Press New York.
- Corgnet, B., DeSantis, M., Porter, D., 2020. The distribution of information and the price efficiency of markets. *Journal of Economic Dynamics and Control*.
- Cottrell, W. F., 1955. *Energy and Society*. McGraw-Hill New York.

- Danxia Xie, D., 2011. A Generalized Fact and Model of Long-Run Economic Growth: Kaldor Fact as a Special Case. Working Paper of the Peterson Institute for International Economics.
- Dasgupta, P., Heal, G., 1974. The Optimal Depletion of Exhaustible Resources. *The Review of Economic Studies*.
- Dasgupta, P., 2001. *Human Well-Being and the Natural Environment*. Oxford University Press.
- Fischbacher, U., 2007. z-tree: Zurich toolbox for ready-made economic experiments. *Experimental Economics*.
- Fizaine, F., Court, V., 2016. Energy expenditure, economic growth, and the minimum EROI of society. *Energy Policy*.
- Fizaine, F., Court, V., 2017. Long-Term Estimates of the Energy-Return-on-Investment (EROI) of Coal, Oil, and Gas Global Productions. *Ecological Economics*.
- Frank, M., Goyal, V., 2005. Trade-off and pecking order theories of debt. In: *Handbook of Corporate Finance: Empirical Corporate Finance (Handbooks in Finance Series, Elsevier/North-Holland) Spring, Chapter 7*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.670543>
- Frank, M., Goyal, V., 2009. Capital structure decisions: Which factors are reliably important? *Financial Management*.
- Gabaix, X., 2020. A Behavioral New Keynesian Model, *American Economic Review*.
- . García-Santana, M., Moral-Benito, E., Pijoan-Mas, J., Ramos, R., 2016. Growing like Spain: 1995-2007. *International Economic Review*.
- Gelb, A., Kaiser, K., Viuela, L., 2011. How Much Does Natural Resource Extraction Really Diminish National Wealth? The Implications of Discovery. Center for Global Development Working Paper (No. 290).

- Gennaioli, N., Shleifer, A., 2018. A Crisis of Beliefs: Investor Psychology and Financial Fragility. Princeton University Press.
- Gerst, M.D., 2008. Revisiting the Cumulative Grade-Tonnage Relationship for Major Copper Ore Types. Economic Geology.
- Goeke, A., Walcher, S., 2013. Quasi-steady state: Searching for and utilizing small parameters in Recent Trends in Dynamic Systems.. Springer Verlag.
- Georgescu-Roegen, N., 1971. The Law of Entropy and the Economic Process. Harvard University Press: Cambridge Massachusetts.
- Georgescu-Roegen, N., 1975. Energy and economic myths. Southern Economic Journal.
- Grossman, S.J., Stiglitz, J.E., 1980. On the impossibility of informationally efficient markets. The American Economic Review.
- Gurkaynak, R., Tille, C., 2017. DSGE Models in the Conduct of Policy: Use as intended, Vox EU e-book.
- Hall, C.A.S, Tharakan, P., Hallock, J., Cleveland, C., Jefferson, M., 2003. Hydrocarbons and the evolution of human culture. Nature.
- Hall, C., Balogh, S., Murphy, D., 2009. What is the minimum EROI a sustainable society must have?. Energies.
- Hall, C.A.S., 2011. Introduction to Special Issue on New Studies in EROI (Energy Return on Investment). Sustainability.
- Harvey, C.R., Graham, J., 2001. The theory and practice of corporate finance: Evidence from the field. Journal of Financial Economics.
- Heckemeyer, J.H., 2012. The effects of corporate taxes on business behavior Microsimulation and meta-analyses. University of Heidelberg Ph.D. Thesis.

- Hendrickson, C. T., Lave, L. B., Matthews, H. S., 2006. Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach. Resources for the Future Press.
- Henshaw P.F., King, C., Zarnikau, J., 2011. System Energy Assessment (SEA), Defining a Standard Measure of EROI for Energy Businesses as Whole Systems. Sustainability.
- Hirsch, R., Bezdeck, R., Wendling, R., 2005. Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation and Risk Management. US Department of Energy.
- Hirshleifer, J., 1966. Investment decisions under uncertainty: Applications of the state-preference approach. Quarterly Journal of Economics.
- Ho, J., Robinson, J., 1994. The Relevance of Financial Policy in Perfect Capital Markets. International Review of Financial Analysis Volume 3, Issue 2.
- Hong, L., 2007. Evaluating the effects of embodied energy in international trade on ecological footprint in China. Ecological Economics.
- Hotelling, H., 1931. The economics of exhaustible resources. The Journal of Political Economy.
- Huang, Y-F., Gan, X-J., Chiueh, P-T., 2017. Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems. Renewable Energy.
- Hubbert, M.K., 1956. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. American Petroleum Institute.
- Jevons, S., 1865. The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of Our Coal Mines. Macmillan and Co, Ed..
- Kaplan, G., Moll, B., Violante, G.L., 2018. Monetary Policy According to HANK , American Economic Review.

- Karadi, P., Schmidt, S., Warne, A., 2018. The New Area-Wide Model II: An Extended Version of the ECB's Micro-Founded Model for Forecasting and Policy Analysis with a Financial Sector, ECB Working Paper No. 2200.
- Kaufmann, R., 1994. The relation between marginal product and price in US energy markets. *Energy Economics*.
- Kemfert, C., 1998. Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany. *Energy Economics*.
- Kemfert, C., Welsch, H., 2000. Energy-Capital-Labor Substitution and the Economic Effects of CO₂ Abatement: Evidence for Germany. *Journal of Policy Modeling* .
- Kenny, R., Law, C., Pearce, J.M., 2010. Towards Real Energy Economics: Energy Policy Driven by Life-Cycle Carbon Emission. *Energy Policy*.
- Kiyotaki, N., Moore, J., 1997. Credit Cycles. *Journal of Political Economy*.
- Koetse, M.K., Groot, H.L.F., Florax, R.J.G.M., 2008. Capital-Energy Substitution and Shifts in Factor Demand: a Meta-Analysis. *Energy Economics*.
- Koopmans, T., 1965. On the concept of optimal economic growth. *Econometric Approach to Development Planning* chap. 4 pp. 225–87. North-Holland Publishing Co. Amsterdam.
- Kraus, A., Litzenberger, R., 1973. State-preference model of optimal financial leverage. *Journal of Finance*.
- Kubiszewski, I., Cleveland, C.J., Endres, P.K., 2010. Meta-analysis of net energy return for wind power systems. *Renewable Energy*.
- Lackman, C.L., 1976. The Classical Base of Modern Rent Theory. *American Journal of Economics and Sociology*.
- Leamer, E.E., 2007. Housing IS the Business Cycle. NBER Working Paper No. 13428.

- Lenzen, M., 2008. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of nuclear energy: A review. *Energy Conversion and Management*.
- Lesourd, J-B, Gousty, Y., 1981. Bases économiques et thermodynamiques des techniques de comptabilité de l'énergie. *Revue d'économie industrielle*.
- Levati, M.V., Qiu, J., Mahagaonkar, P., 2012. Testing the Modigliani-Miller theorem directly in the lab. *Experimental Economics*.
- Lintner, J., 1969. The aggregation of investor's diverse judgments and preferences in purely competitive security markets. *Journal of Financial and Quantitative Analysis*.
- Long, J.B., Plosser, C., 1987. Sectoral vs. Aggregate Shocks in the Business Cycle. *American Economic Review*.
- Lotka, A. J., 1924. *Elements of Physical Biology*. Williams and Wilkins Baltimore.
- Lucas, R. E., 1976. Econometric policy evaluation: a critique. *Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy*.
- Macias, A.P., Matilla, M., 2015. Net energy analysis in a Ramsey–Hotelling growth model. *Energy Policy*.
- Malaczewski, M., 2018. Complementarity between energy and physical capital in a simple model of economic growth. *Economic Research-Ekonomska Istraživanja*.
- Manne, A. S., 1974. Waiting for the Breeder. *Review of Economic Studies* (Symposium).
- Manno, J., 2011. Looking for a Silver Lining: The Possible Positives of Declining Energy Return on Investment (EROI). *Sustainability*.
- Mas-Collel, A., Whinston, M.D., Green, J.R., 1995. *Microeconomic Theory* (Chapter 5). Oxford University Press.
- Mayumi, K., 2001. *The Origins of Ecological Economics: The Bioeconomics of Georgescu-Roegen*. Routledge.

- Merton, R., 1974. On the pricing of corporate debt: The risk structure of interest rates. *Journal of Finance*.
- Modigliani, F., Miller, M., 1958. The cost of capital, corporation finance and the theory of investment. *The American Economic Review*.
- Modigliani, F., Miller, M., 1963. Corporate income taxes and the cost of capital: A correction. *The American Economic Review*.
- Mudd, G. M., 2009. Historical Trends in Base Metal Mining: Backcasting to Understand the Sustainability of Mining. Proc. “48th Annual Conference of Metallurgists”, Canadian Metallurgical Society.
- Muellbauer, J., 2016. Macroeconomics and consumption: Why central bank models failed and how to repair them, Vox EU website.
- Mulder, K., Hagens N.J., 2008. Energy Return on Investment: Towards a Consistent Framework. *Ambio*.
- Murphy, D.J., Hall, C.A.S., 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Annals of the New York Academy of Science*.
- Murphy, D.J., Hall C.A.S, Dale, M., Cleveland, C., 2011. Order from Chaos: A Preliminary Protocol for Determining the EROI of Fuels. *Sustainability*.
- Musgrave, J.C., 1992. Fixed Reproducible Tangible Wealth in the United States, Revised Estimates. *Survey of Current Business*.
- Myers, S., 1984. The capital structure puzzle. *The Journal of Finance*.
- Myers, S., 2001. The capital structure puzzle. *The Journal of Economic Perspectives*.
- Nadiri M.I., Prucha, I.R., 1996. Estimation of the Depreciation Rate of Physical and R&D Capital in the US Manufacturing Sector. *Economic Inquiry*.

- Neugebauer, T., Shachat, J., Szymczak, W., 2020. A Test of the Modigliani-Miller Theorem, Dividend Policy and Algorithmic Arbitrage in Experimental Asset Markets. Working Paper, Chapman University, Economic Science Institute
- Nordhaus, W., 1973. The Allocation of Energy Resources. Brookings Papers on Economic Activity .
- Nordhaus, 2006. Principles of National Accounting For Non-market Accounts. NBER.
- North, D.C., Wallis, J.J., Weingast, B.R., 2009. Violence and Social Orders: A Conceptual Framework for Interpreting Recorded Human History. Cambridge University Press.
- Odum, H. T., Odum, E. C., 1976. Energy Basis for Man and Nature. McGraw-Hill, New York.
- Odum, H. T., Odum, E. C., 1983. Systems Ecology. Wiley-Interscience New York.
- Palmer, G., Floyd, J., 2017. Energy Storage and Civilization. Springer Verlag.
- Page, L., Siemroth, C., 2020. How Much Information is Incorporated in Financial Asset Prices? Experimental Evidence. Review of Financial Studies.
- Pearce, J.M., 2008. Limitations of Greenhouse Gas Mitigation Technologies Set by Rapid Growth and Energy Cannibalism. Klima.
- Persson, T., Tabellini, G., 2000. Political Economics: Explaining Economic Policy. MIT Press.
- Phillips, W. G. B., Edwards, D. P., 1976. Metal prices as a function of ore grade. Resources policy.
- Pimentel, D., 2008. Biofuels, Solar and Wind as renewable energy systems. Springer.
- Plott, C., Sunder, S., 1982. Efficiency of Experimental Security Markets with Insider Information: An Application to Rational Expectations Models. Journal of Political Economy 90, 663-698.

- Plott, C., Sunder, S., 1988. Rational Expectations and the Aggregation of Diverse Information in Laboratory Security. *Econometrica* 56, 1085-1118.
- Rajan, R.G., Zingales, L., 1995. What do we know about capital structure? Some evidence from international data. *The Journal of Finance*.
- Ramsey, F.P., 1928. A Mathematical Theory of Saving. *Economic Journal*.
- Raugei, M., Sgouridis, M., Murphy, D. et al., 2017. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation: A comprehensive response. *Energy Policy*.
- Reister, T., Spengel, C., Finke, K., Heckemeyer, J.H., 2008. ZEW Corporate Taxation Microsimulation Model (ZEW TaxCoMM), ZEW Discussion Paper.
- Reynolds, D. B., 1999. The mineral economy: how prices and costs can falsely signal decreasing scarcity. *Ecological Economics*.
- Ricardo, D., 1817. *On the Principles of Political Economy and Taxation*. Jhon Murray Ed..
- Roemer, J., 1986. *Analytical Marxism*. Cambridge University Press.
- Robelius, F., 2007. *Giant Oil Fields: The highway to oil*. Ph.D Thesis. Uppsala University.
- Rye, C.D., Jackson, T., 2018. A review of EROEI-dynamics energy-transition models. *Energy Policy*.
- Shahnazarian, H., 2011. A dynamic micro-econometric simulation model for firms. *International Journal of Microsimulation*.
- Shinkuma, T., Nishiyama, T., 2000. The grade selection rule of the metal mines an empirical study on copper mines. *Resources Policy*.
- Smith, V., Suchanek, G., Williams, A.W., 1988. Bubbles, crashes, and endogenous expectations in experimental spot asset markets. *Econometrica*.

- Solow, R., 1957. Technical change and the aggregate production function. *Review of Economics and Statistics*.
- Solow, R.M., 1974. Intergenerational Equity and Exhaustible Resources. *Review of Economic Studies* (Symposium).
- Stern, D.I., 1997. Limits to substitution and irreversibility in production and consumption: a neoclassical interpretation of ecological economics. *Ecological Economics*.
- Stern, D.I., Kander, A., 2010. The Role of Energy in the Industrial Revolution and Modern Economic Growth. *CAMA Working Paper Series*.
- Stern, D.I., 2010. Energy Quality. *Ecological Economics*.
- Stiglitz, J., 1969. A Re-Examination of the Modigliani-Miller Theorem. *American Economic Review*.
- Stiglitz, J., 1974. Growth with Exhaustible Natural Resources: Efficient and Optimal Growth Paths. *The Review of Economic Studies*.
- Stock, J.H., Watson, M.W., 2002. Has the Business Cycle Changed and Why?, *NBER Working Papers* 9127.
- Strasing, R., Lindenberger D., Kümmel, R., 2008. Cointegration of Output, Capital, Labour and Energy. *Institute of Energy Economics at the University of Cologne*.
- Stürmer, M., Schwerhoff, G., 2012. Non-Renewable but Inexhaustible – Resources in an Endogenous Growth Model. *Preprints of the Max Planck Institute*.
- Sweeney, J.L., 1984. The response of energy demand to higher prices: what have we learned?. *The American Economic Review*.
- Sweeney, J., 1984. The response to energy demand to higher prices. *The American Economic Review*.

Thomas, J.A.G., 1977. Energy Analysis. Westview Press Boulder.

Titman ,S., 2002. The Modigliani and Miller Theorem and the Integration of Financial Markets. Financial Management.

van Tongeren, F.W.,1995.Microsimulation Modelling of the Corporate Firm: Exploring Micro-Macro Economic Relations.Springer-Verlag.

Zimmerman, M., 1977. Modelling depletion in a mineral industry: the case of coal. The Bell Journal of Economics.