

Innovación tecnológica inducida: un análisis bibliométrico de la investigación en energía solar, 1960-2018

Induced technological innovation: a bibliometric analysis of solar energy research, 1960-2018

(Esta versión: 18/febrero/2020; aceptado: 04/mayo/2020)

*Andrés Felipe Rúa-Ortiz**

*Humberto Merritt***

*Alejandro Valencia-Arias****

RESUMEN

En años recientes ha crecido el número de desastres naturales causados por el calentamiento global. A raíz de estos desastres se ha criticado el uso de combustibles fósiles para satisfacer la demanda mundial de energía, planteándose la alternativa de sustituir petróleo por energías más limpias como la solar, la eólica y la hidráulica. Sin embargo, la adopción e implementación de este tipo de energías alternativas enfrenta ventajas y desventajas, tanto de carácter económico como estructural. Entre las primeras están las crecientes innovaciones tecnológicas que aumentan su atractivo en términos de los costos de oportunidad, y en las segundas están la baja competitividad económica que aún ofrecen las tecnologías alternativas (o limpias) en comparación con el petróleo. Este artículo aborda el origen de la sustitución desde un marco histórico, al postular que el auge tecnológico de las energías alternativas, en particular la energía solar, se vio inducido por el embargo petrolero que sufrieron los Estados Unidos en 1973 y que sirvió de aliciente para disparar la investigación en estas tecnologías. Siguiendo una metodología

* Departamento de Ciencias Administrativas, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Correo electrónico: andresrua14318@correo.itm.edu.co

** Centro de Investigaciones Económicas, Administrativas y Sociales (CIECAS), Instituto Politécnico Nacional, México. Correo electrónico: hmerritt@ipn.mx

*** Departamento de Ciencias Administrativas, Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia. Correo electrónico: jhoanyvalencia@itm.edu.co

de búsqueda bibliométrica, se separa el análisis en seis etapas para demostrar que la subida del precio del petróleo detonó el auge de energías alternativas, pero conforme fue creciendo el número de artículos publicados, se logró consolidar el área de investigación, separándose del efecto precio.

Palabras clave: energía solar; innovación tecnológica; tecnologías alternativas; petróleo; bibliometría;

Clasificación JEL: E30; K32; O33; O44; Q32; Q43

ABSTRACT

In recent years the number of natural disasters caused by global warming has grown. Following these disasters, the use of fossil fuels to meet global energy demand has been criticized by considering the alternative of replacing oil with cleaner energy such as solar, wind and hydraulic. However, the adoption and implementation of alternative energies face both economic and structural advantages and disadvantages. Among the former are the growing technological innovations that increase its attractiveness in terms of opportunity costs, and in the latter are the low economic competitiveness that alternative (or clean) technologies still offer compared to oil. This article addresses the origin of the substitution from a historical framework by postulating that the technological boom of alternative energies, in particular solar energy was induced by the oil embargo that the United States suffered in 1973 and served as an incentive to fire research in these technologies. Following a bibliometric search methodology, the analysis is divided into six stages to demonstrate that the rise in the price of oil triggered the rise of alternative energy but as the number of published articles grew, the research area was consolidated, separating from the effect price.

Keywords: solar energy, technological innovation; alternative technologies, oil; bibliometrics.

JEL Classification: E30; K32; O33; O44; Q32; Q43.

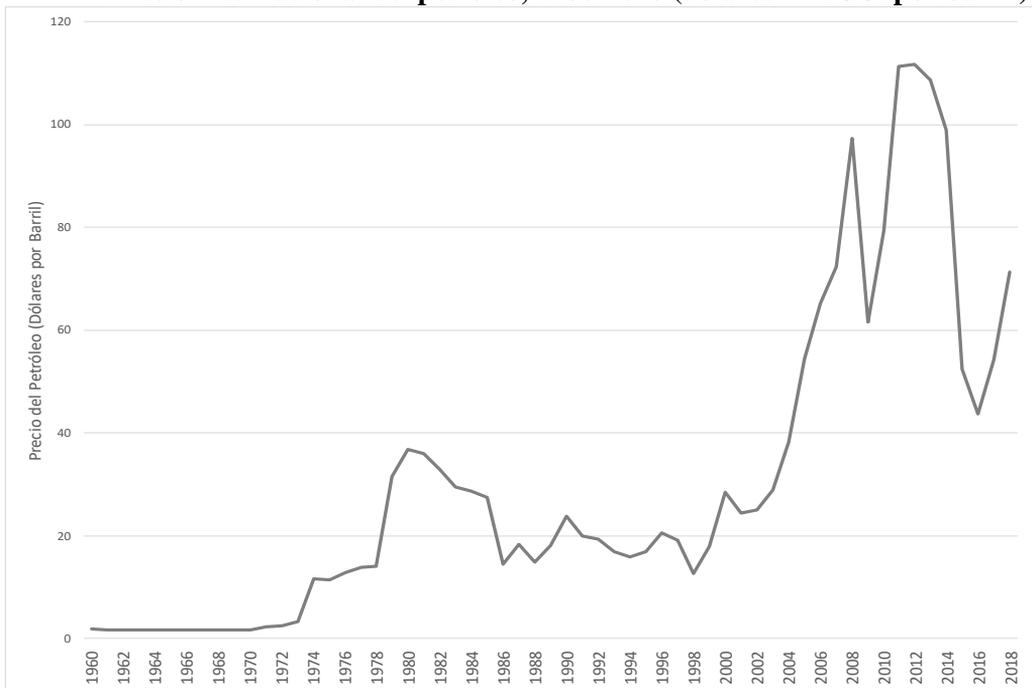
INTRODUCCIÓN

Las fuentes alternativas de energía, como la cogeneración, biomasa, geotérmica, energía hidroeléctrica, eólica y solar, nacieron a partir de las crisis energéticas de la década de 1970 (Weesner y Whiting, 1987). La promulgación de la Ley Nacional de Energía de 1978 en los Estados Unidos (EE. UU.) jugó un papel clave en su impulso, al establecer que los productores de energía independientes estuvieran exentos de cumplir la regulación como empresas de servicios, siempre que emplearan métodos no tradicionales para producir electricidad (Lakhani, 1980). Sin embargo, la fluctuación en los precios internacionales del petróleo, un fenómeno que caracterizó el período 1970-1980, desestimó los argumentos originales en favor de las energías alternativas (Weesner y Whiting, 1987). Además, el esquema de incentivos fiscales que el gobierno

de los EE. UU. puso en marcha para promover las inversiones eólicas, solares y de biomasa expiraron a fines de 1985, liquidando el atractivo económico de estos esquemas (Durham, Colby y Longstreth, 1988).

Es importante señalar que los precios del petróleo habían mantenido un comportamiento relativamente estable desde finales de la segunda guerra mundial y hasta principio de la década de los setenta, pero cuando estalló la guerra del Yom Kippur en octubre de 1973 la situación cambió, pues empezó el uso del petróleo como elemento de presión, haciendo que los precios del energético comenzaran a subir de manera desproporcionada (Weale, 2008). La gráfica 1 muestra el comportamiento de los precios internacionales del petróleo en el período 1960-2018.

Gráfica 1
Precio internacional del petróleo, 1960-2018 (dólares EE. UU. por barril)

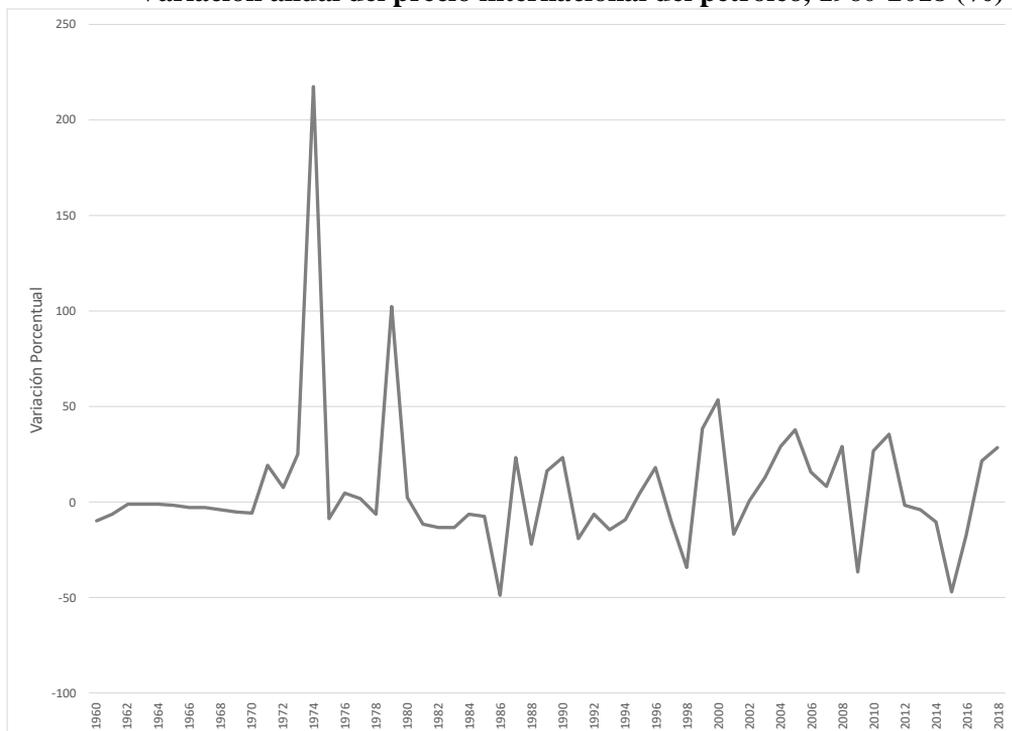


Fuente: Elaboración de los autores con base en datos de British Petroleum Energy and Oil Prices [disponible en <https://on.bp.com/2CyOoxF>]

El rápido incremento del petróleo provocó la intervención del gobierno estadounidense para tratar de contrarrestar los efectos negativos del alza, alentando también a otros productores a incrementar su oferta debido al súbito crecimiento de las ganancias, contrarrestando así la subida en el precio. No obstante, el mundo entró en una etapa de alta volatilidad de precios. Como lo señala Weale (2008), el mercado del petróleo reacciona a tres factores: 1) el precio máximo observado, 2) la tasa de apreciación esperada (condición de arbitraje) y 3) la demanda efectiva (a cualquier precio dado). Weale sugiere tres razones por las cuales el precio del petróleo es errático. En primer lugar, el suministro total es incierto. En segundo lugar, si la curva de demanda internacional se mueve hacia arriba, entonces el precio tiene que subir para alcanzar un equilibrio entre el intervalo necesario para alcanzar el precio máximo que agote las existencias; y en tercer lugar está la cuestión de la tecnología de reemplazo. El razonamiento de Weale indica que es poco probable que el mercado ofrezca un reemplazo más barato con algún grado de certeza a causa de que las tecnologías alternas no son susceptibles de ser planeadas, como tampoco se puede saber cómo afectarán el precio una vez que existan (Weale, 2008: 5).

En este trabajo se propone la siguiente hipótesis: los incesantes incrementos en el precio internacional del petróleo estimularon la investigación en el campo de la energía solar como fuente alterna al petróleo. Esta conjetura se apoya en las grandes fluctuaciones en el precio del petróleo, especialmente entre los años 1970 y 1990, que explicarían el crecimiento en la investigación en fuentes alternativas de energía. Para documentar este punto, la gráfica 2 muestra las variaciones en el precio internacional del petróleo en el período 1960-2018.

Gráfica 2
Variación anual del precio internacional del petróleo, 1960-2018 (%)



Fuente: Elaboración de los autores con base en datos de British Petroleum Energy and Oil Prices [disponible en <https://on.bp.com/2CyOoxF>]

I. CAMBIO CLIMÁTICO Y EFICIENCIA EN EL USO DE ENERGÍA

En los últimos 15 años han sucedido un número creciente de fenómenos climatológicos que han causado desastres de gran magnitud. Incluso ha habido un aumento de 1.4°C en la temperatura entre los años 1910 y 2016, cifra que se ha ido incrementando como resultado probable de la actividad humana. Estos registros además indican un aumento de 0.5° C con respecto a mediciones del siglo anterior, lo que representa un incremento cercano al 40%, haciendo urgente poner en práctica técnicas más eficientes para controlar los llamados «gases de efecto invernadero» (Field et al., 2014).

De esta manera, las mejoras en la eficiencia energética y el uso de tecnologías más limpias empiezan a tener mayor relevancia en países con alto grado de desarrollo, resaltando sus ventajas a nivel social, económico y ambiental (Chávez et al., 2019).

Siendo urgente aplicar también este tipo de procesos en países con menor grado de desarrollo, tomando en cuenta elementos como la estructura económica y los recursos y metodologías que respondan a cada una de las necesidades identificadas (Sánchez-Juárez, 2018).

II. ENERGÍAS RENOVABLES

La adopción de energías renovables debe contextualizarse con base en las múltiples opciones existentes, como es el caso de la energía solar, la energía eólica y la biomasa (Roy y Ragunath, 2018). Hoy día la humanidad hace un uso casi exclusivo de combustibles fósiles convencionales (petróleo, carbón y gas natural). Según la British Petroleum (BP) (2017) el 85.5% del consumo mundial proviene de los hidrocarburos, mientras que el 6.9% proviene de la hidroelectricidad y un 3.2% de las fuentes renovables.

Dado que los efectos del cambio climático son cada vez más costosos y frecuentes, se ha intentado acordar mecanismos que fomenten la generación de energía limpia, aprovechando mejor los recursos naturales existentes (Guangul y Chala, 2019). Destaca el caso de la energía solar, la cual se ha convertido en una de las fuentes alternativas más atractivas debido a la gran disponibilidad de luz solar en todo el planeta, por lo que el desarrollo de sistemas basados en la energía solar se está volviendo una alternativa cada vez más viable (Guangul y Chala, 2019).

III. EL DESARROLLO DE LA ENERGÍA SOLAR

La tecnología de energía solar fotovoltaica es relativamente joven, ya que en 1995 se producían solamente alrededor de 1 TWh en el mundo. A partir de entonces el crecimiento acumulado anual promedio de la capacidad de energía ha sido sustancial, yendo de 22% en la década de 1990, hasta 150% actualmente (EIA, 2019).

En la década de los setenta, la relación precio/rendimiento de la energía solar la confinaba a satisfacer solo algunos segmentos pequeños del mercado, como relojes, calculadoras y algunas aplicaciones de bajo rendimiento, pero el avance tecnológico basado en celdas solares volvió atractiva esta fuente de energía para segmentos de mercado más grandes, especialmente los relacionados con las redes de alimentación eléctrica (Madsen y Hansen, 2019).

Sin embargo, la difusión a gran escala de celdas fotovoltaicas se ha visto obstaculizada por su baja eficiencia y elevado costo, aunque la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos depende del tipo de material semiconductor. Así, la eficiencia de los

primeros módulos fotovoltaicos disponibles comercialmente promedió menos del 10% a mediados de la década de 1980, para subir a alrededor del 15% en 2015, teniendo actualmente una eficiencia cercana al 20%; y en el caso de los satélites espaciales, las celdas han logrado casi un 50% de eficiencia¹.

En este trabajo se argumenta que el desarrollo científico y tecnológico de fuentes alternativas de energía, especialmente la solar, surgió a partir de los incentivos generados por el súbito incremento del precio del petróleo en la década de los setenta, lo que impulsó el crecimiento de publicaciones dando lugar, posteriormente, a la consolidación de esta rama del conocimiento. Es pertinente apuntar que esta hipótesis aparentemente no había sido explorada en la literatura sino hasta hace poco por Guillouzouic (2018), quien encuentra que las grandes fluctuaciones del precio del petróleo entre 1985 y 2000 provocaron una ola de innovaciones en el sector de los biocombustibles medidas a través de las patentes solicitadas.

IV. LA RELACIÓN PRECIO DEL PETRÓLEO-DESARROLLO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS

En la literatura sobre cambio tecnológico destaca el trabajo del profesor John Richard Hicks, quien en 1932 publicó el libro *The Theory of Wages*², donde argumenta que un cambio en el precio relativo de los factores podría influir en la naturaleza de la invención, creando así la llamada “teoría de la innovación inducida” (Ahmad, 1966). Ahmad observa, sin embargo, que durante muchos años el argumento de Hicks no fue seriamente cuestionado, al menos en el terreno analítico, pero a mediados de los años sesenta varios economistas criticaron la existencia de mecanismos que relacionaran los precios de los factores con el proceso de innovación. Ahmad, comenta que W. E. G. Salter, por ejemplo, negó por completo que un cambio en el precio relativo de los factores pudiera influir en la naturaleza de la invención (Ahmad, 1966: 344).

La perspectiva sobre los determinantes de la innovación enfatiza la creación de oportunidades a partir de las publicaciones científicas. En este trabajo se hace una inspección histórica al acervo de artículos publicados en revistas científicas entre 1960 y 2018 con la finalidad de comparar el patrón de publicaciones con el precio vigente del petróleo. La metodología se explica a continuación.

¹ Para mayores detalles sobre la eficiencia energética de las celdas fotovoltaicas, véase la información disponible en la página web de la oficina de información de energía de los EEUU, disponible en la URL: <https://bit.ly/32SQMKs>.

² Existe una traducción al español de la obra del profesor Hicks publicada en México en 1989 por el Fondo de Cultura Económica, bajo el título *Dinero, Interés y Salarios*.

V. METODOLOGÍA

El análisis bibliométrico es una metodología ampliamente utilizada en la literatura relacionada con el cambio tecnológico. Este enfoque requiere que la información esté disponible y que las fuentes de información sean confiables y adecuadas para realizar de manera eficiente cada fase del análisis bibliométrico. Por estas razones la elección de las fuentes de información es un asunto de extrema importancia (Buenechea, 2017). Diversos autores han propuesto que la evaluación de las fuentes dependa de criterios como la cobertura, la cantidad de citas disponibles, la accesibilidad y la flexibilidad de los operadores de búsqueda, entre otros (Cadavid, Awad y Franco, 2012). Bases de datos como *Web of Knowledge* de Thomson-Reuters, y *Scopus* de Elsevier cubren estos criterios ampliamente; haciéndolas fuentes de acceso confiables y de uso frecuente.

Aquí se desarrolla un análisis bibliométrico basado en *Scopus*³ para validar el desarrollo de alternativas tecnológicas de sostenibilidad energética. La búsqueda se basó en un mapeo de las publicaciones científicas registradas en *Scopus* entre los años de 1960 y 2018.

Scopus permite que las búsquedas se realicen de manera manual o mediante algoritmos. Este último método permite realizar de forma más ágil varios tipos de búsqueda. Debido a que la investigación se centra en explorar el efecto que tuvieron los incentivos aplicados por el gobierno de los EEUU como resultado del súbito incremento en el precio del petróleo, la búsqueda se centró únicamente en aquellos artículos que contenían las palabras (en inglés) «Solar», «Photovoltaic», «Energy» y «Petroleum» en el título, y las palabras «Price», «Technological» y «Alternatives», ya fuera en el título, el resumen o las palabras clave, restringiendo la búsqueda al periodo 1960-2018.

El algoritmo de búsqueda arrojó 27,841 resultados que se relacionan con contenido científico basado en periodos de diez años con la finalidad de comparar los totales publicados en cada año contra el precio del petróleo en ese mismo tiempo; obteniéndose seis gráficas que relacionan las publicaciones con las variaciones del precio nominal del petróleo.

Asimismo, se examinaron los resúmenes (*abstract*) de los artículos en estos mismos seis grupos de 10 años empleando el software Wordle⁴ para conocer las palabras

³ El acceso a *Scopus* se realiza a través de la URL <https://www.scopus.com/home.uri>

⁴ Wordle es un software de acceso en línea para generar “nubes” de palabras contenidas en un texto, visualizándolas por tamaño en función de su frecuencia. Esta herramienta es útil para identificar la importancia relativa de ciertos términos dentro de un conjunto de documentos. El acceso se realiza a través de la URL <http://www.wordle.net/>

con mayor frecuencia en cada periodo, identificando así el énfasis preponderante en las investigaciones realizadas.

VI. ANÁLISIS DE LOS PERIODOS

Periodo 1960-1969

En los sesenta, Landsberg (1961) estudió la intensidad solar en más de 300 ubicaciones alrededor del mundo con la finalidad de explorar las posibilidades para generar energía eléctrica a partir del impacto de la luz solar en la superficie terrestre, ubicando zonas con registros óptimos de temperatura entre 22° C y 35° C. Pero estas investigaciones no despertaron mayor entusiasmo, debido a que la industria y el transporte cubrían sus necesidades energéticas a través de energías convencionales como el petróleo, el gas y el carbón, disminuyendo el interés por alternativas energéticas efectivas (Daniels, 1962). La tabla 1 presenta el número de artículos publicados entre 1960 y 1969 alrededor del tema de energía solar y el precio anual del petróleo para ese mismo intervalo.

Tabla 1
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 1960-1969

Año	Número de artículos	Precio del petróleo
1960	10	2.91
1961	8	2.85
1962	15	2.85
1963	11	2.91
1964	5	3.00
1965	11	3.01
1966	14	3.10
1967	23	3.12
1968	25	3.18
1969	60	3.32
Total de artículos publicados		182
Coeficiente de correlación		0.816

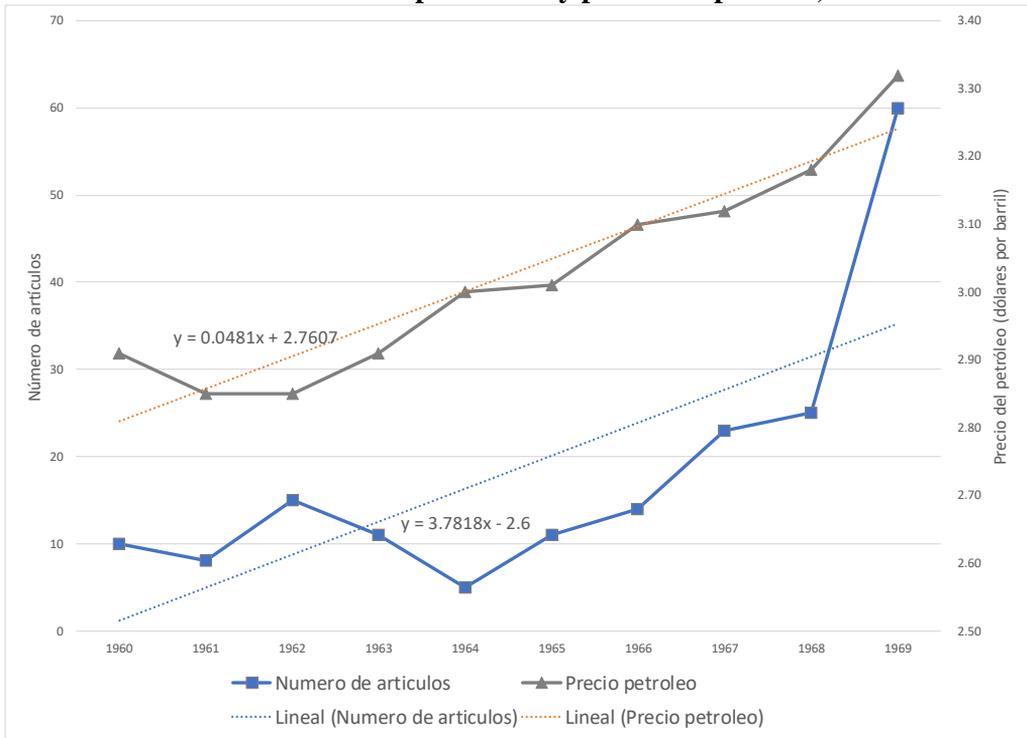
Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

La tabla 1 plasma una elevada correlación entre el número de artículos publicados y el precio internacional del petróleo (0.81). Este patrón es más de ver en la

gráfica 3, donde se hace evidente un incremento leve, pero sostenido, del precio del petróleo. Cabe señalar que el precio nominal en el año de 1960 fue de 2.91 dólares por barril, mientras que para los dos siguientes años se nota un decremento de seis centavos de dólar, para retornar en los demás años a un crecimiento cercano a una tasa de 0.0481 anual, representando un promedio de crecimiento de siete centavos en los 10 años.

Por otro lado, la tasa de crecimiento de publicaciones en *Scopus* fue de 3.78% entre los años de 1960 y 1964, fluctuando posteriormente cuando las investigaciones relacionadas con energías renovables, principalmente en el tema de la energía fotovoltaica, crecen considerablemente.

Gráfica 3
Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 1960-1969



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

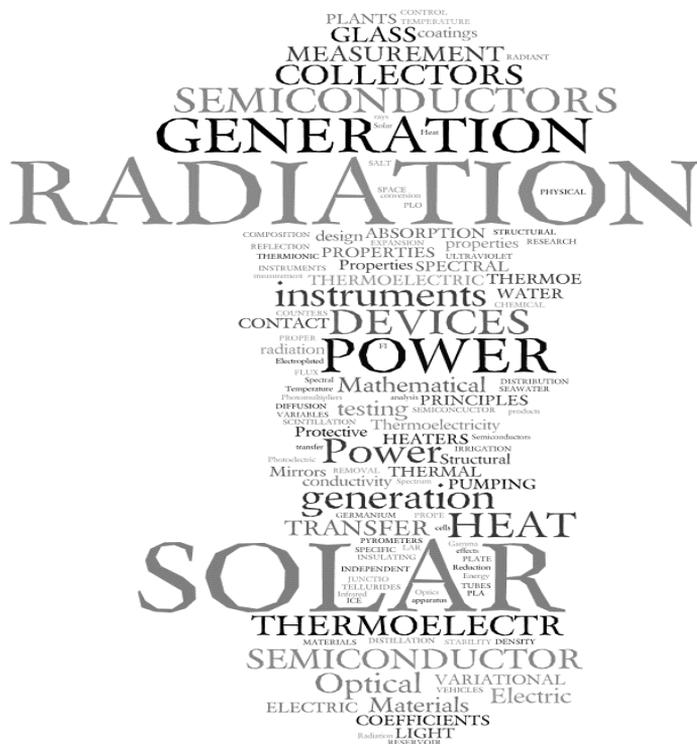
Los datos permiten identificar una relación creciente entre ambas variables, siendo la tasa de crecimiento de las publicaciones mayor al precio del petróleo. Para

medir este efecto se realizaron análisis de tendencias parciales en cada periodo. Se debe señalar que los valores de las ecuaciones reportadas en todas las gráficas indican únicamente los parámetros de la tendencia, por lo que no se muestran los valores del estadístico *t*, por no ser estadísticamente representativos. Se observa, no obstante, que las líneas de tendencia son crecientes, siendo mayor el crecimiento de las publicaciones que el crecimiento del precio del petróleo (3.78 vs. 0.04).

La figura 1 relaciona las palabras más empleadas en los resúmenes (*abstracts*) de los artículos publicados en el decenio 1960-1969.

Figura 1

Mapa de palabras relevantes en los artículos entre 1960 y 1969



Fuente: Elaboración de los autores a partir del software Wordle

De la figura 1 se colige que las publicaciones de esta etapa comenzaban a relacionar la radiación solar con la generación de energía eléctrica, lo que se comprueba

mediante la prevalencia de palabras como SOLAR, RADIATION, GENERATION, POWER, INSTRUMENT, TRANSFER, DEVICES, SEMICONDUCTORS, TRANSFER, OPTICAL, MATERIALS, ELECTRIC, GENERATION, MATHEMATICAL, Etc. La figura anterior indica la importancia relativa de los resúmenes analizados.

Periodo 1970-1979

Para la década de los setenta, las tecnologías en sostenibilidad energética comenzaron a tener un mayor impacto, pues pasan de solo ser modelos matemáticos, a buscar aplicaciones reales (Terjung, 1970). La tabla 2 presenta la evidencia de un incremento continuo del petróleo en los años 1970 y 1979, a partir de un precio nominal de 3.39 dólares. Posteriormente se observa un aumento considerable pasando de 3.60 a 4.75 y luego a 9.35, hasta llegar a 25.10. La gráfica 4 identifica una tasa de crecimiento de 20.4% para la publicación de artículos en *Scopus*, siendo 16.6% más que el periodo anterior, lo que sugiere una fuerte relación entre el aumento del precio del petróleo y el fomento a la investigación en energía solar.

Tabla 2
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 1970-1979

Año	Número de artículos	Precio del petróleo
1970	39	3.39
1971	51	3.6
1972	56	3.6
1973	69	4.75
1974	63	9.35
1975	83	12.21
1976	124	13.1
1977	168	14.4
1978	206	14.95
1979	210	25.1
Total de artículos publicados		1,069
Coeficiente de correlación		0.893

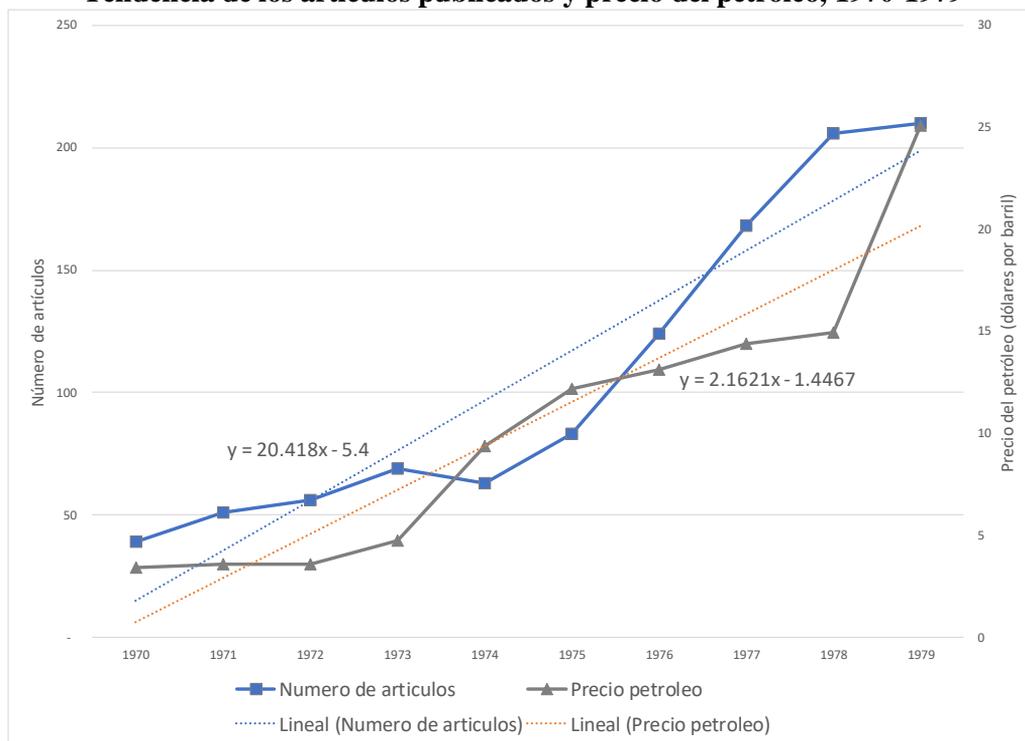
Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

Los datos muestran una alta correlación (0.89) entre el número de artículos publicados y el precio internacional del petróleo para el periodo 1970-79. Es relevante

mencionar que la tasa de crecimiento de las publicaciones reportadas en *Scopus* fue de 438.4%, al pasar de 39 artículos publicados en 1970 a 210 en 1979. Este patrón se puede apreciar mejor en la gráfica 4, donde se hace evidente un incremento más pronunciado del precio del petróleo.

Gráfica 4

Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 1970-1979



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

La gráfica 4 sugiere una tendencia creciente entre ambas variables, siendo la tasa de crecimiento de las publicaciones mayor a la del petróleo. Las ecuaciones de las líneas de tendencia confirman que el crecimiento de las publicaciones fue mayor que el precio del petróleo (20.4 vs. 2.16).

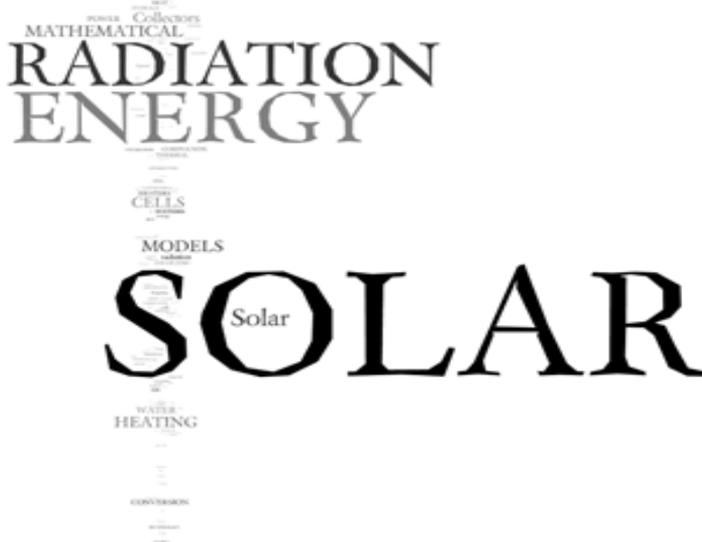
De acuerdo con la interpretación de Leder y Shapiro (2008), siendo el petróleo un recurso finito tendrá que alcanzar su cúspide en algún punto del tiempo. Esta

condición comenzó a verse reflejada en 1974 por el crecimiento en la tendencia por publicar investigaciones científicas en el campo de la energía solar.

La figura 2 presenta la «nube» de palabras claves extraída de los resúmenes de los artículos recopilados de *Scopus* entre 1970 y 1979. El análisis indica la importancia de la investigación de nuevas tecnologías basadas en los modelos matemáticos de la época a partir de palabras como RADIATION, ENERGY, MATHEMATICAL, SOLAR, MODELS, CELLS, HEATING, POWER y COLLECTORS.

Figura 2

Mapa de palabras relevantes en los artículos entre 1970 y 1979



Fuente: Elaboración de los autores a partir del software Wordle

Periodo 1980-1989

Los años ochenta se caracterizaron por avances tecnológicos notables en la producción y consumo eficiente de petróleo. Las investigaciones se centraron en modelos matemáticos sofisticados para representar aspectos técnicos complejos, tales como el comportamiento geológico de los terrenos de perforación, a través del análisis de la propagación de ondas sísmicas, con la intención de incrementar la tasa de extracción de petróleo (McQuillin et al., 1984).

No obstante, el ritmo de crecimiento de la economía mundial generó que los patrones de oferta y demanda apuntaran hacia un posible agotamiento del petróleo a nivel global, provocando que los EEUU aceleraran la brecha tecnológica para buscar reemplazar el uso de hidrocarburos, mediante fuentes alternas de energía (Santini, 1988). A partir de estos avances comenzaron a despuntar tecnologías, tales como películas de contacto eléctrico que permitieron regular el rendimiento energético en superficies dependientes del factor VO₂⁵ (Babulanam et al., 1987). La tabla 3 presenta el número de artículos publicados entre 1980 y 1989 con la misma perspectiva que las tablas anteriores.

Tabla 3
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 1980-1989

Año	Número de artículos	Precio del petróleo
1980	437	37.42
1981	439	35.75
1982	384	31.83
1983	283	29.08
1984	537	28.75
1985	379	26.92
1986	269	14.44
1987	483	17.75
1988	322	14.87
1989	325	18.33
Total de artículos publicados		3,858
Coeficiente de correlación		0.429

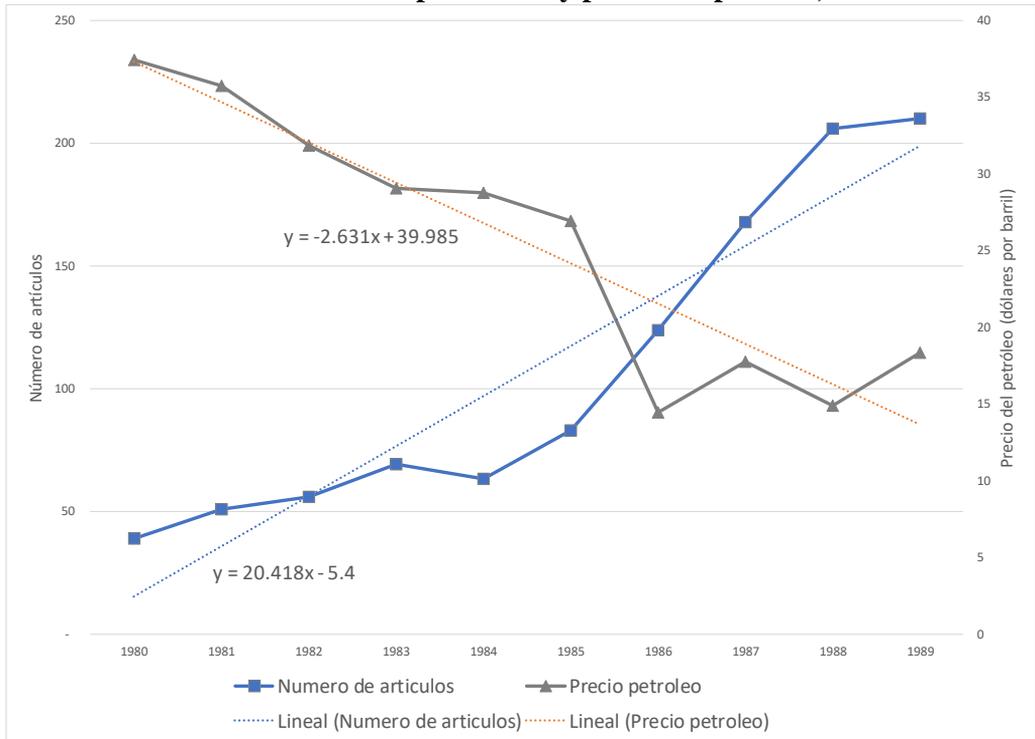
Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

En este período destaca la caída del precio del petróleo, que pasó de 37.42 dólares por barril en 1980, a 14.4 en 1986 (una tasa de -2.63%), situación que aparentemente afectó el ritmo de publicación de artículos científicos, al presentar una tasa del -9.28 para el periodo. Los datos de la tabla 3 muestran una correlación mucho menor entre el número de artículos publicados y el precio internacional del petróleo (0.42). La gráfica 5 muestra la drástica caída en el precio del petróleo entre 1980 y 1989. Por su parte, la publicación de artículos en *Scopus* creció sustancialmente a una tasa de

⁵ El VO₂ es la cantidad máxima de oxígeno que un organismo puede absorber, transportar y consumir en un tiempo determinado.

20.4% anual, mostrando indicios de un fuerte despegue en el ritmo e intensidad de la investigación en el campo de la energía solar, especialmente a partir de 1984.

Gráfica 5
Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 1980-1989



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

Al respecto, Cook (1981) argumenta que las investigaciones a gran escala en el campo de la energía solar han llevado a tomar decisiones para sustituir el consumo de petróleo, lo que permitiría nivelar las cargas en el consumo diario de energía en todo el mundo.

La frecuencia de palabras (en inglés) usadas en los resúmenes de los artículos registrados por *Scopus* entre 1980 y 1989 resalta la combinación de palabras como POWER, ENERGY, THERMICAL, SOLAR, HEAT, RADIATION, COLLECTOR y COMPOUNDS, indicando un auge en la investigación de nuevas tecnologías.

Tabla 4
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 1990-1999

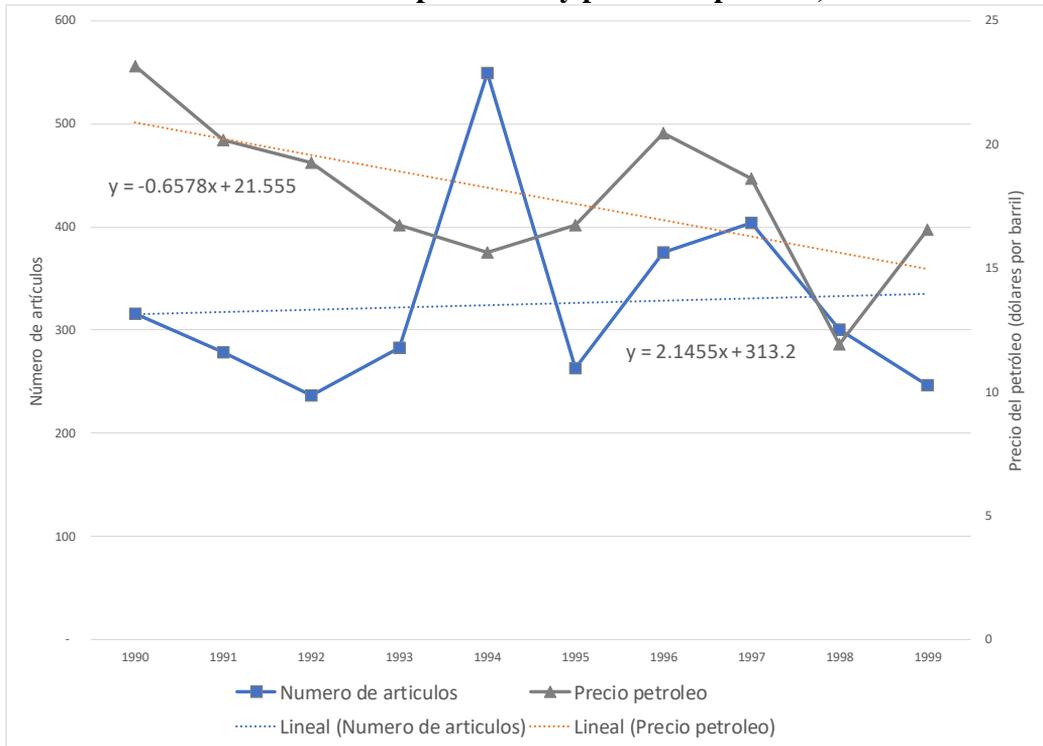
Año	Número de artículos	Precio del petróleo
1990	316	23.19
1991	278	20.20
1992	236	19.25
1993	283	16.75
1994	549	15.66
1995	263	16.75
1996	375	20.46
1997	404	18.64
1998	300	11.91
1999	246	16.56
Total de artículos publicados		3,250
Coeficiente de correlación		-0.081

Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

La tabla anterior muestra que el precio del petróleo siguió teniendo grandes fluctuaciones, con caídas significativas en 1994 y 1998, mientras la tasa de publicación de artículos científicos pareció estabilizarse. Los datos indican una correlación negativa entre el número de artículos publicados y el precio internacional del petróleo (-0.08), sugiriendo un desacoplamiento entre el comportamiento del precio del petróleo y las publicaciones científicas sobre energía solar.

La gráfica 6 muestra que el precio tuvo una fuerte depreciación, pasando de 23.19 dólares por barril en 1990 a 16.56 en 1999. Esto representa una tasa negativa de crecimiento de 0.65, mientras que el número de publicaciones en *Scopus* conservó una tendencia relativamente estable en casi todos los años, excepto en 1994 cuando se publicaron 549 artículos de investigación. Estos patrones sugieren el inicio de la desvinculación entre el precio y las publicaciones. Es decir, la tendencia al alza del precio del petróleo había cesado, llevando al mercado mundial a mantener a la baja los precios de referencia. Así, el factor que habría servido de acicate para la exploración de fuentes alternas de energía dejó de tener efecto. Por consiguiente, el interés en la energía solar aparentemente dejó de reaccionar a las subidas en el precio de los hidrocarburos, desvinculando los resultados del trabajo científico del comportamiento del mercado de petróleo. Estos patrones se pueden observar a continuación.

Gráfica 6
Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 1990-1999



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

Los datos de 1990 a 1999 muestran un cambio en la tendencia de las publicaciones sobre energía solar, pues el ritmo prácticamente se estancó alrededor de los 300 artículos por año, mientras que el petróleo seguía bajando a causa del incremento en la producción de países como Rusia, Irán, Venezuela y Nigeria, a la par que el consumo se estancaba. Este periodo también es interesante debido a que el deterioro del medio ambiente comienza a ser evidente. Hasta los ochenta, la industria dependía de procesos intensivos en energía, poniendo muy poco énfasis en el impacto medioambiental o en el desarrollo de fuentes alternas de energía (Jacobsson y Johnson, 2000); y es justo cuando los ecologistas inician campañas para la preservación de los ecosistemas del planeta. Cleveland (1993) señala que los registros de costos económicos y biofísicos iniciados en la década de 1960 marcaron la transición de una base de

empleando como recurso la disponibilidad de sensores remotos capaces de capturar organismos microbianos y botánicos que biodegradan contaminantes del petróleo (Gallegos et al., 2000).

La tabla 5 muestra el comportamiento de las publicaciones y el precio del petróleo en el periodo. Cabe destacar el marcado aumento en el precio del energético, pues pasa de 27.39 dólares por barril en 2000 hasta alcanzar un valor de 91.48 en 2009, lo que hizo regresar la volatilidad al mercado y con ello la reactivación de la búsqueda de alternativas de sostenibilidad energética. Este patrón se observa en el notable crecimiento en el índice de publicaciones de *Scopus*, que alcanza un récord de 1,167 entradas en 2007.

Tabla 5
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 2000-2009

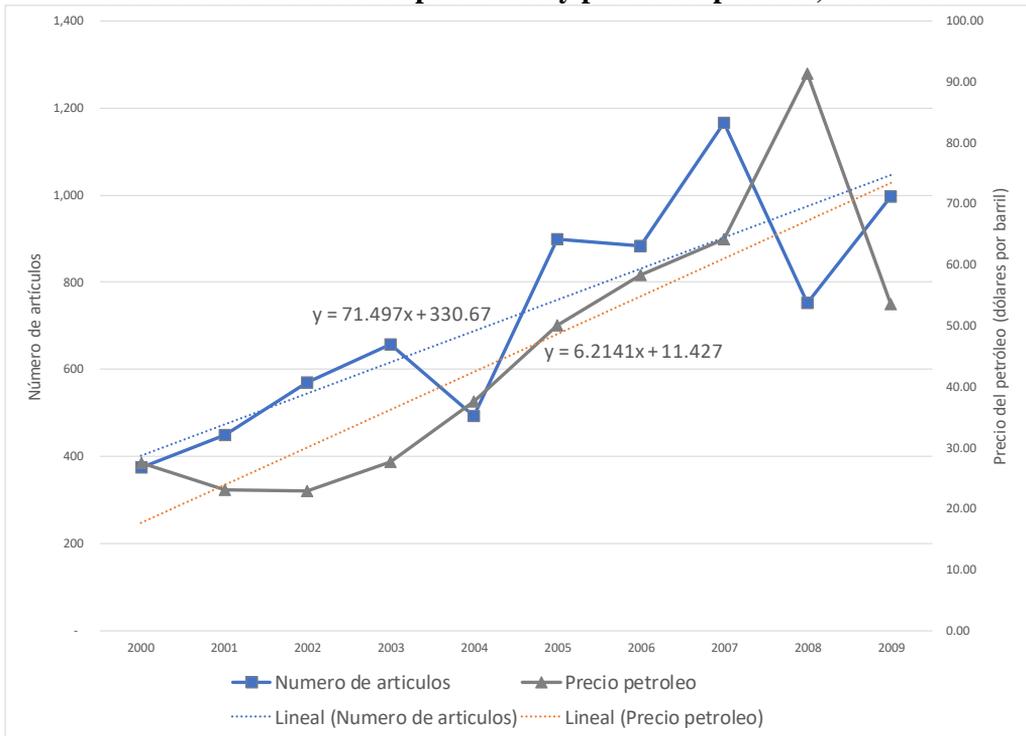
Año	Número de artículos	Precio del petróleo
2000	374	27.39
2001	448	23.00
2002	570	22.81
2003	657	27.69
2004	492	37.66
2005	900	50.04
2006	883	58.30
2007	1,167	64.20
2008	752	91.48
2009	996	53.48
Total de artículos publicados		7,239
Coeficiente de correlación		0.647

Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

Los datos muestran que la correlación entre el precio del petróleo y el número de publicaciones vuelve a ser positiva (y relativamente elevada: 0.64). Este efecto no es de sorprender, dado que en 2002 el precio del petróleo era de 27.69 dólares, año a partir del cual comenzaría a incrementarse sustancialmente hasta 2008, para bajar nuevamente un año después. Si bien los precios se dispararon casi sin control, el mundo ya contaba con tecnologías alternas para disminuir el impacto de los combustibles fósiles, tales como el cilindro parabólico para energía solar que fue probado en California con posibilidades de generación entre 14-80 MW, 354 MW de capacidad instalada y durabilidad de 18 años (Price et al., 2002). En ese tiempo también cobran fuerza áreas

tecnológicas cruciales como la biotecnología y la nanotecnología, cuyo desarrollo comienza a reforzar el uso de energías limpias, ayudando a estabilizar el mercado de energía, y con ello la preservación del medio ambiente (Montiel et al., 2009). La gráfica 7 detalla el comportamiento de las dos variables en ese periodo.

Gráfica 7
Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 2000-2009



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

La gráfica muestra un alineamiento entre ambas variables, confirmando la influencia que ejercen los precios de petróleo en los incentivos para investigar posibles alternativas energéticas. Es preciso señalar que la tasa de crecimiento de artículos es mayor que la del petróleo, lo que sugiere que la investigación solar pudo haber alcanzado la «mayoría de edad» para esa década.

La figura 5 presenta las palabras más frecuentes en los resúmenes de los artículos recabados para el periodo, resaltando la eficiencia de las celdas fotovoltaicas

aplican transferencia de calor por medio centrales termo solares entre 400° C y 700° C ha dado como resultado altas potencias y grandes eficiencias (Fereret et al., 2018). Con relación a la asociación precios-publicaciones encontramos que la tasa de crecimiento de los artículos ha superado las épocas previas con un ritmo cercano al 140%. Por su parte, el precio del petróleo se ha mantenido estable, aunque bajo un panorama poco alentador. La tabla 6 resume esta información.

Tabla 6
Artículos publicados y precio internacional del petróleo, 2010-2018

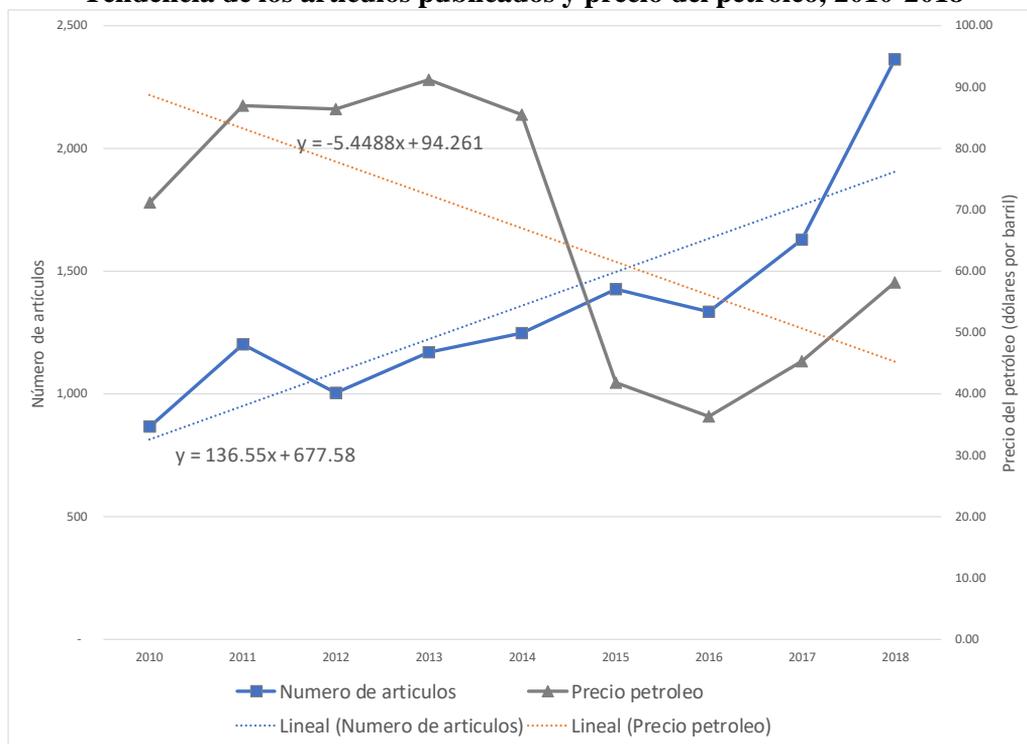
Año	Número de artículos	Precio del petróleo
2010	865	71.21
2011	1,202	87.04
2012	1,003	86.46
2013	1,170	91.17
2014	1,249	85.60
2015	1,427	41.85
2016	1,336	36.34
2017	1,628	45.33
2018	2,363	58.15
Total de artículos publicados		12,243
Coeficiente de correlación		-0.450

Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

En este periodo la correlación entre artículos publicados y precio del petróleo se volvió negativa y relativamente significativa (-0.45), lo cual sugiere que la investigación en el área de energía solar ha logrado cierto grado de madurez, permitiéndole ignorar el comportamiento del mercado petrolero. Sin embargo, la dinámica de los precios del petróleo crudo, el gas y el carbón sigue afectando a la economía global, ya que los combustibles fósiles aún influyen en la satisfacción de las necesidades básicas de una enorme proporción de la población, por lo que aspectos como la inversión y el riesgo económico de su explotación siguen siendo cruciales (Kenzhetayeva y Fleming, 2017).

Se puede ver entonces que entre 2010 y 2018 se perdió la conexión precio-publicaciones, ya que la evolución de las fuentes alternas de energía (aparentemente) ya no dependen del precio del petróleo, cuya desvinculación se observa más claramente en la gráfica 8.

Gráfica 8
Tendencia de los artículos publicados y precio del petróleo, 2010-2018



Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos recabados

Las líneas de tendencia de la gráfica 8 confirman la desvinculación entre ambas variables, pues el número de artículos tiene una pendiente positiva de 136.5, lo que representa un aumento de 36.6%, mientras que el precio del petróleo exhibe una pendiente negativa de -5.44, lo que representa una caída general del precio para este periodo.

Con todo, y dejando de lado que los ciclos en el precio del petróleo no favorecen a la economía, principalmente cuando el precio es bajo y se presenta un mayor impacto en el medio ambiente, es necesario pensar en incorporar algún tipo de regulación, como lo sugiere Debnath et al. (2017), para atenuar estos efectos, al tiempo que se disminuye la dependencia del petróleo como fuente principal de todo el planeta.

Finalmente, el último análisis muestra que las palabras más representativas se relacionan con la aplicación de tecnologías renovables para mejorar la calidad de vida,

Una de las tecnologías beneficiadas de este proceso fue la solar, la cual comenzó a aprovechar los subsidios del gobierno norteamericano para servir de sustituto energético del petróleo. Sin embargo, el rápido deterioro del antaño estable mercado petrolero creó más conmociones que certidumbres, con lo que las fuentes alternativas de energía gozaron de dos estímulos en esa época: los apoyos gubernamentales directos y las presiones del mercado para salir de la crisis del petróleo.

Este trabajo presenta un análisis histórico del efecto de las variaciones en el precio del petróleo y la introducción de alternativas tecnológicas amigables con el ambiente a partir de la hipótesis de que el incremento del precio del petróleo estimuló la investigación en el campo de la energía solar como fuente alterna de energía.

Se dividió el análisis en seis décadas, que van de 1960 a 2018, debido a que los cambios en el precio del petróleo fueron más atendibles de explorar en periodos cortos que en un único periodo. Se utilizó un método comparativo para revisar el comportamiento de las publicaciones científicas sobre energía solar contra las fluctuaciones en el precio del petróleo durante sesenta años.

Los resultados obtenidos indican que en los sesenta la publicación de artículos científicos sobre energía solar era prácticamente inexistentes y el mercado petrolero era muy estable, pero las cosas cambiaron a partir de 1973 cuando el número de artículos científicos comenzó a crecer en coincidencia con el incremento de los hidrocarburos. No obstante, este efecto fluctuó con el tiempo pues, al principio (décadas de 1970 y 1980) el precio del petróleo pareció tener una influencia más marcada sobre las tasas de publicación que en décadas posteriores. Así, entre 1980 y 2000, el interés por aprovechar la energía solar decayó, atemperando el esfuerzo global de investigación.

Una interpretación es que el atractivo de la energía solar fue creciendo con el tiempo, convirtiéndose en un área muy promisoriosa y dinámica. Es decir, la investigación en energía solar tuvo un incentivo inicial inusitado en el precio del petróleo, para volverse posteriormente una alternativa viable al cambio climático.

Debemos reconocer, sin embargo, dos limitaciones principales en el enfoque propuesto. En primer lugar, el trabajo es exploratorio en esencia, porque se analizó únicamente la relación precio-publicaciones sin considerar el comportamiento de factores como el fomento de la investigación en otras fuentes alternas de energía, o el papel de los subsidios gubernamentales, por ejemplo.

En segundo lugar, el estudio no pudo aplicar herramientas econométricas más robustas y sofisticadas como el modelo de causalidad de Granger (1969), ya que no se tuvo acceso a datos de publicaciones de forma más desagregada, lo que hubiera permitido validar estadísticamente casi todas las relaciones reportadas en el trabajo. Podemos argumentar, no obstante, que este análisis puede servir de base para conocer

la influencia que ejercen factores económicos y sociales en el interés de la comunidad científica y tecnológica por abrir nuevos campos de investigación.

Finalmente, el rápido deterioro del entorno ambiental justifica el empleo de enfoques alternos para reforzar el análisis del impacto de factores normalmente no considerados como causantes de dicho cambio, tales como el aflojamiento de los esfuerzos de investigación derivados de la falta de incentivos y de los apoyos gubernamentales a campos específicos del conocimiento, como la energía solar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen las observaciones producidas por dos revisores anónimos, las cuales contribuyeron a mejorar el enfoque del trabajo. Por su parte, Humberto Merritt agradece el apoyo proporcionado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) de México mediante el proyecto de investigación SIP-20190098. Por otra parte, Andrés Rúa-Ortiz y Alejandro Valencia-Arias agradece el apoyo proporcionado por la Vicerrectoría de Investigación en el programa de jóvenes investigadores del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM) y a DCRI por permitir la movilidad al IPN-México.

REFERENCIAS

- Agista, M. N., Guo, K., & Yu, Z. (2018). A state-of-the-art review of nanoparticles application in petroleum with a focus on enhanced oil recovery. *Applied Sciences* (Switzerland), 8(6). <https://doi.org/10.3390/app8060871>
- Ahmad, S. (1966). On the Theory of Induced Invention. *Economic Journal*, 76(302): 344-357.
- Ahmed, F. E., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2019). Solar powered desalination – Technology, energy and future outlook. *Desalination*, 453(December 2018), 54–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.002>
- Babulanam, S. M., Eriksson, T. S., Niklasson, G. A., & Granqvist, C. G. (1987). Thermo-chromic VO₂ films for energy-efficient windows. *Solar Energy Materials*, Vol. 16(5), November, pp. 347–363. [https://doi.org/10.1016/0165-1633\(87\)90029-3](https://doi.org/10.1016/0165-1633(87)90029-3)
- British Petroleum (BP) (2017). *A year of strong delivery and growth*, London: BP
- Buenechea, M. (2017). Structured Literature Review About Intellectual Capital and Innovation. *Journal of Intellectual Capital*, Vol. 18(2): 262-285. <https://doi.org/10.1108/JIC-07-2016-0069>

- Cadavid, L., Awad, G., & Franco, C. J. (2012). Análisis Bibliométrico del Campo Modelado de Difusión de Innovaciones. *Estudios Gerenciales*, 28 (Edición Especial): 213-235.
- Chávez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. (2019). Methodology developed for the construction of an urban-energy diagnosis aimed to assess alternative scenarios: An intra-urban approach to foster cities' sustainability. *Applied Energy*, no. 237 (December 2018), 751–778. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.037>
- Cleveland, C. J. (1993). An exploration of alternative measures of natural resource scarcity: the case of petroleum resources in the U.S. *Ecological Economics*, vol. 7(2), 123–157. [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(93\)90050-G](https://doi.org/10.1016/0921-8009(93)90050-G)
- Cook, B. (1981). Cost hinders shale moves (petroleum sources). *Petroleum Review*, 35(413), 12–13.
- Daniels, F. (1962). Energy storage problems. *Solar Energy*, 6(3), 78–83. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(62\)90031-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(62)90031-2)
- Debnath, D., Whistance, J., Thompson, W., & Binfield, J. (2017). Complement or substitute: Ethanol's uncertain relationship with gasoline under alternative petroleum price and policy scenarios. *Applied Energy*, no. 191, 385–397. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.028>
- Durham, C. A., Colby, B. G., & Longstreth, M. (1988). The Impact of State Tax Credits and Energy Prices on Adoption of Solar Energy Systems. *Land Economics*, vol. 64(4): 347-355.
- EIA - U.S. Energy Information Administration. (2019). *International Energy Outlook 2019*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Fereres, S., Prieto, C., Giménez-Gavarrell, P., Rodríguez, A., Sánchez-Jiménez, P. E., & Pérez-Maqueda, L. A. (2018). Molten carbonate salts for advanced solar thermal energy power plants: Cover gas effect on fluid thermal stability. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, no. 188(August), 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.028>
- Field, C., Barros, V., Dokken, D., Mach, K., & Mastrandrea, M. (2014). *Cambio Climático 2014*. Quinto Informe de Evaluación Del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre El Cambio Climático. Accesado de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_es.pdf
- Gallegos, M., Gomez, A., Gonzalez, L., Montes De Oca, M. A., Yáñez, L., Zermeño, J. A., & Gutiérrez-Rojas, M. (2000). Diagnostic and resulting approaches to restore petroleum-contaminated soil in a Mexican tropical swamp. *Water Science and Technology*, 42(5–6), 377–384. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0538>

- Granger, C. W. J. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-spectral Methods. *Econometrica*, 37(3): 424-438.
- Guangul, F. M., & Chala, G. T. (2019). Solar energy as renewable energy source: SWOT analysis. *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City*, ICBDS 2019, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2019.8645580>
- Guillouzuic, A. (2018). Did Oil Prices Trigger an Innovation Burst in Biofuels? *Energy Economics*, no. 75: September, Pages 2547-2559. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2018.08.031>
- Hicks, John R. (1989). *Dinero, Interés y Salarios*. México, D.F: Fondo de Cultura Económica.
- Jacobsson, S., & Johnson, A. (2000). The Diffusion of Renewable Energy Technology: An Analytical Framework and Key Issues for Research. *Energy Policy*, 28(9): 625-640. [10.1016/S0301-4215(00)00041-0]
- Kay, A., & Grätzel, M. (1996). Low cost photovoltaic modules based on dye sensitized nanocrystalline titanium dioxide and carbon powder. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 44(1), 99–117. [https://doi.org/10.1016/0927-0248\(96\)00063-3](https://doi.org/10.1016/0927-0248(96)00063-3)
- Kayabasi, E., Ozturk, S., Celik, E., Kurt, H., & Arcaklioğlu, E. (2018). Prediction of nano etching parameters of silicon wafer for a better energy absorption with the aid of an artificial neural network. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 188(August), 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.08.027>
- Kenzhetayeva, Z., & Fleming, R. (2017). Building synergies, strengthening fundamentals, and driving leadership in investment decision process within petroleum fields. *Society of Petroleum Engineers - SPE Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2017*, 2017-Janua, 2019. <https://doi.org/10.2118/188665-ms>
- Lakhani, H. (1980). Forecasting the Economic, Energy, and Environmental Impacts of National Energy Plans, 1990-2000. *Technological Forecasting and Social Change*, 18(4): 301-320. [10.1016/0040-1625(80)90093-1]
- Landsberg, H. E. (1961). Solar radiation at the earth's surface. *Solar Energy*, 5(3), 95–98. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(61\)90051-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(61)90051-2)
- Leder, F., & Shapiro, J. N. (2008). This time it's different. An inevitable decline in world petroleum production will keep oil product prices high, causing military conflicts and shifting wealth and power from democracies to authoritarian regimes. *Energy Policy*, 36(8), 2850–2852. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.04.015>
- López, K. L. (2013). *INNOVACIÓN Casos de estudio sobre sectores productivos*. México, D.F.: Miguel Ángel Porrúa.

- Madsen, D. N., & Hansen, J. P. (2019). Outlook of solar energy in Europe based on economic growth characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 114 (July), 109306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109306>
- McQuillin, R., Bacon, M., & Barclay, W. (1984). *An Introduction to Seismic Interpretation: Reflection Seismics in Petroleum Exploration*. Second Edition, 2019.
- Montiel, C., Quintero, R., & Aburto, J. (2009). Petroleum biotechnology: Technology trends for the future. *African Journal of Biotechnology*, 8(25), 7228–7240. <https://doi.org/10.5897/AJB2009.000-9306>
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Stewart, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 44(5), 271–289. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- Pérez, M. del P., Merritt, H., & Isunza, G. (2015). Los desafíos del desarrollo local. México: Miguel Ángel Porrúa.
- Price, H., Lüpfert, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., & Mahoney, R. (2002). Advances in parabolic trough solar power technology. *Journal of Solar Energy Engineering*, Transactions of the ASME, 124(2), 109–125. <https://doi.org/10.1115/1.1467922>
- Roy, S. & Raganath, S. (2018). Emerging membrane technologies for water and energy sustainability: Future prospects, constraints and challenges. *Energies*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/en11112997>
- Sánchez-Juárez A. T. (2018). *Propuesta metodológica para evaluación de riesgos de tecnologías energéticas en etapa de diseño*, Editorial Jus, Medellín.
- Santini, D. J. (1988). Past and future of the petroleum problem: the increasing need to develop alternative transportation fuels. *Transportation Research Record*, (1175), 1–14.
- Terjung, W. H. (1970). A global classification of solar radiation. *Solar Energy*, 13(1), 67–81. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(70\)90008-3](https://doi.org/10.1016/0038-092X(70)90008-3)
- Wang, Z., & Fingas, M. (1996). Separation and characterization of petroleum hydrocarbons and surfactant in orimulsion dispersion samples. *Environmental Science and Technology*, 30(11), 3351–3361. <https://doi.org/10.1021/es960248h>
- Weale, M. (2008). High Oil Prices: Implications and Prospects. *National Institute Economic Review*, 205(1): 4-7. [10.1177/0027950108096579]
- Weesner, J. D., & Whiting, M. (1987). Have Falling Oil Prices Wiped Out the Alternative Energy Market? Paper presented at the *9th World Energy Engineering Congress: Strategies for Energy Efficient Plants and Intelligent Buildings*, Atlanta GA, USA.