

El efecto invernadero: descripción y descubrimiento

David QUINTERO PLAZA

AEMET, Delegación Territorial en Canarias
dquinterop@aemet.es

Resumen: Como es sabido, el efecto invernadero es la causa del calentamiento global. Siguiendo la tradición filosófica escolástica se puede hablar de una «causa primera» (la causa de la causa) que origina el efecto invernadero, esta sería la acumulación del dióxido de carbono (CO₂) producido por la actividad humana. Puede trazarse el origen de la idea de lo que es el efecto invernadero a hace más de doscientos años, cuando el sabio francés Joseph Fourier sugirió que la atmósfera retiene parte del calor. Tras él vinieron otros momentos clave, como los experimentos de John Tyndall y de la recientemente recuperada del olvido Eunice Foote. Las colaboraciones de Arrhenius y Callendar, junto a otros, contribuyeron a apuntalar el concepto. En este artículo se explicará lo que es el efecto invernadero de forma accesible y se tratará la historia del término, con especial énfasis en su descubrimiento.

Palabras clave: efecto invernadero; cambio climático; calentamiento global; clima; historia.

1. EL EFECTO INVERNADERO: DESCRIPCIÓN SUCINTA

1.1. Explicación del efecto invernadero

La Tierra recibe radiación del Sol. Parte de esta radiación es absorbida por diversos componentes del planeta (la superficie, las nubes...) y parte es emitida de nuevo al espacio. Cuanta más radiación se emite al espacio, más se enfría la Tierra. Ciertos gases, llamados gases de efecto invernadero, tienen la propiedad de ser casi transparentes para la radiación solar incidente, pero en cambio bloquean bien la radiación emitida por la propia Tierra, impidiéndola escapar. Esto es debido a que la radiación emitida por la Tierra está sobre todo en el rango del infrarrojo, mientras que la solar viene en el visible y el ultravioleta, en su mayor parte. El funcionamiento es similar al de un invernadero que no deja escapar el calor porque el techado de plástico bloquea la radiación saliente infrarroja.

La explicación anterior, que describe lo básico, omite aspectos como los flujos no solo de radiación, sino también de convección, o las transferencias de calor latente. Se puede ser más preciso siguiendo a BENESTAD (2017). Para este autor, el efecto invernadero puede definirse como la explicación a la discrepancia entre la temperatura que debiera tener un planeta en base a la energía recibida del Sol y la temperatura observada. En el caso de la Tierra, atendiendo a la energía que recibe del Sol y a la que refleja, la temperatura debiera ser de unos $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, lo observado en la superficie, en promedio, es de unos $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hay una diferencia de más de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, que sería explicada por los gases de efecto invernadero, demostración clara de su importancia.

En la troposfera, la temperatura desciende con la altura (salvo en algunas situaciones, llamadas inversiones, que son capas de extensión limitada). Con un perfil vertical típico de la atmósfera puede hallarse la altura a la que se encontraría la temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, que es de unos 6,5 km sobre el nivel del mar. A esta altura tiene la Tierra la temperatura «que debiera tener» según el modelo basado en el equilibrio de flujos de energía entrantes y salientes. Se dice (BENESTAD, 2017) que es a esa altura donde se emite el grueso del calor excedente que hay en superficie, y de hecho las medidas realizadas así lo confirman.

Hasta llegar a esa altura de emisión, la radiación, de tipo infrarrojo, rebota, es absorbida, cambia de dirección, etcétera. Cuando hay más gases de efecto invernadero, estos fenómenos se incrementan, dando lugar a un exceso de radiación infrarroja que calienta la atmósfera. Esto produce un aumento de la altura efectiva de la isoterma de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, por encima de los 6,5 km. Por lo tanto, todo lo que queda debajo, superficie incluida, está a mayor temperatura.

Una ventaja que tiene esta forma de pensar el efecto invernadero es que, siendo esquemática, no reduce todo a una cuestión de radiación, sino que incluye implícitamente los fenómenos de convección y advección. Esto es debido a que, en una atmósfera con más gases de efecto invernadero, el flujo de energía térmica avanza hacia la altura de emisión no solo por radiación sino también por convección. De hecho, la radiación tiene ciertas dificultades para avanzar debido a los continuos procesos de rebote, absorción, redirección, etc. antes mencionados. (A esto se lo conoce técnicamente como un camino óptico más reducido). Por tanto, la convección juega un papel para el transporte de esta energía.

Otra de las ventajas de esta descripción es que también de forma implícita incluye el comportamiento de las bandas de emisión y absorción de las moléculas de CO_2 , algo que en última instancia queda descrito por la mecánica cuántica. El modelo conceptual propuesto (BENESTAD, 2017) incluye el paradigma de las propiedades moleculares.

Hay muchos gases de efecto invernadero, el vapor de agua es el más importante, pero sus flujos se ajustan de manera natural ya que hay un límite a la cantidad de vapor de agua que puede captar el aire (de lo contrario, tiende a precipitar). Los otros gases más relevantes son el CO_2 (dióxido de carbono) y el CH_4 (metano, que es algo más de veinte veces más intenso que el CO_2 generando el efecto invernadero, aunque afortunadamente hay menos cantidad de él que de CO_2). En la figura 1 se aprecian las regiones de infrarrojo en las que el vapor de agua y el CO_2 absorben.

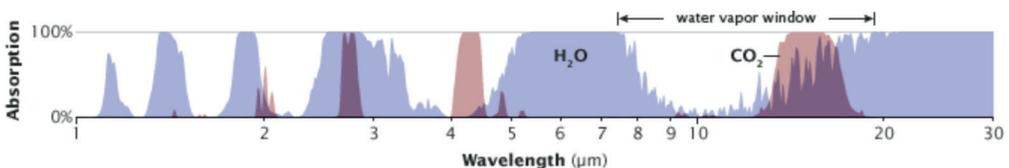


Figura 1. Regiones de absorción del vapor de agua (azul) y del CO_2 (rosa).
La escala de la longitud de onda (eje horizontal) es logarítmica.

[De NASA, Robert Robde; <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page7.php>,
NASA Earth Observatory, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=32288093>].

Se dice que el CO_2 cierra parte de la ventana del vapor de agua, una región entre 12 y 15 μm de longitud de onda donde el vapor de agua es transparente al infrarrojo pero el CO_2 no. Y es justo en esa zona donde la Tierra emite el grueso de su radiación infrarroja. Cuanto más CO_2 , más efectivo es el cierre de la ventana del vapor de agua.

1.2. La estratosfera ante el incremento del CO_2 y refutación de algunos argumentos negacionistas

El calentamiento, por tanto, tiene lugar en la troposfera, que llega a unos 18 km de altura en los trópicos, y a unos 9 km en los polos, en promedio. En la estratosfera, en cambio, se produce un enfriamiento. Las dos principales características de la estratosfera son su muy baja densidad y que, a diferencia de la troposfera, la temperatura asciende con la altura, debido a la absorción de energía ultravioleta por parte de la capa de ozono, la cual se sitúa en la estratosfera.

Las moléculas de CO_2 llegan también a la estratosfera; sin embargo, allí su comportamiento es diferente al de la troposfera. Como se mencionaba, en la estratosfera la densidad es muy baja, así que los continuos rebotes, absorciones y reemisiones de infrarrojos apenas suceden. En cambio, las moléculas de CO_2 presentes en la estratosfera, calentadas en su paso por la troposfera, pueden irradiar la energía térmica sin apenas obstáculos. Por lo tanto, cuanto más CO_2 haya en la estratosfera, más irradian estas moléculas y más se enfría esta capa.

Este efecto fue predicho en los años setenta por los modelos climáticos de Suki Manabe y Richard Wetherald (PALMER, 2022). Estas predicciones fueron confirmadas experimentalmente. El hecho de que la troposfera se caliente y la estratosfera se enfríe es una refutación de la postura de que el cambio climático se debe al Sol, ya que de ser así toda la atmósfera en su conjunto se calentaría; solo mediante la acción de gases de efecto invernadero se explica lo que se observa. (Además de que desde mediados de los ochenta la actividad solar ha ido en contra del incremento de la temperatura en la Tierra (LOCKWOOD y FRÖHLICH, 2007)). Los gases de efecto invernadero han aumentado progresivamente desde el comienzo de la actividad industrial humana (figura 2).

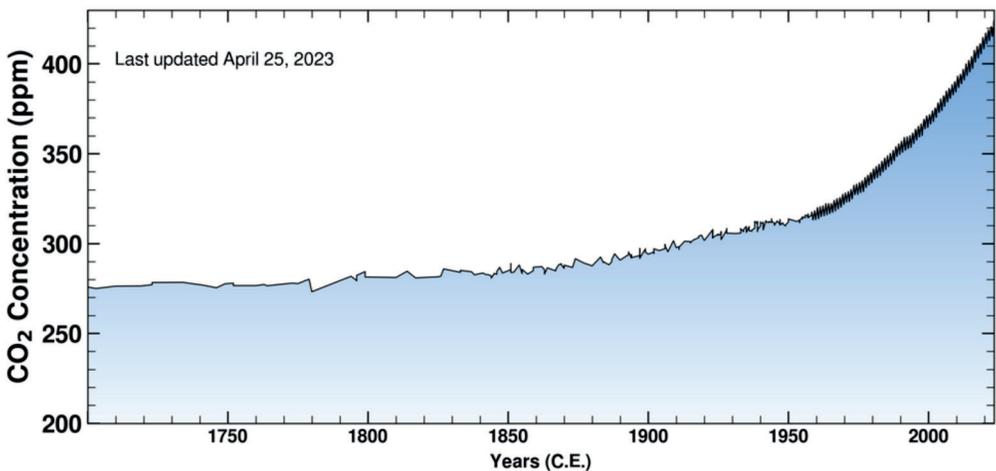


Figura 2. Evolución de la concentración de CO_2 en partes por millón desde 1700 hasta la actualidad.

La curva en negrita es la curva de Keeling, las mediciones del CO_2 en Mauna Loa desde finales de los años cincuenta del pasado siglo. Los demás valores están reconstruidos en base a los cores de hielo. [De <https://keelingcurve.ucsd.edu/>, CC4.0, Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego.

Cores de hielo reconstruidos por (RUBINO et al., 2019)].

2. LA INTUICIÓN DE JOSEPH FOURIER

Jean Baptiste Joseph Fourier nació en Francia en 1768 y tuvo una infancia difícil, marcada por el fallecimiento de seis de sus trece hermanos y una temprana orfandad, a los ocho años. Fue adoptado y pudo acceder a una adecuada formación académica, en la que destacó en física y matemáticas. Tuvo como profesores a Lagrange y Laplace y se convirtió él mismo en docente. Sin embargo, su vida distó mucho de la del típico académico tranquilo. Acompañó a Napoleón (de quien era amigo) en la expedición a Egipto, territorio del que llegó a ser gobernador. Fourier fue también miembro de la policía secreta, obtuvo los títulos de barón y prefecto y estuvo dos veces en prisión por sus ideas. Como afirma (FLEMING, 1999) su fortuna «ascendía y bajaba con las mareas políticas».

Su gran contribución es lo que hoy se conoce como series de Fourier, que permiten descomponer funciones en sumas de senos y cosenos, herramienta analítica de gran potencia. En física encontró la ecuación diferencial que rige la difusión del calor y la resolvió con su método de serie de Fourier. De Egipto se trajo la piedra Rosetta, elemento clave usado por Jean François Champollion para descifrar los jeroglíficos.

Según refiere (FLEMING, 1999), Fourier conocía los experimentos de Horace Benedict de Saussure con un instrumento llamado helietermómetro, una caja con varios vidrios separados por aire que medía las temperaturas producidas por la radiación solar, sin que afectara la ventilación. Se pudo comprobar que la temperatura era más alta en los espacios más interiores de la caja (más pegados al fondo). Esto parece que le dio a Fourier la idea de que la atmósfera terrestre podría ser como un gran helietermómetro, en el que la radiación del Sol y las estrellas atravesaba fácilmente los vidrios, pero el calor reemitido tenía dificultades para escapar. Aunque Fourier no compara directamente el efecto con el de un invernadero, sí parece que captó la esencia básica del comportamiento de la atmósfera con relación al calor.

3. JOHN TYNDALL Y EUNICE FOOTE

La historia del descubrimiento y refinamiento del concepto del efecto invernadero es más larga y compleja de lo que este breve artículo cuenta (figura 3). En la historia de la Física ha habido veces en que una única persona lo hace todo, como pudo ser el caso de Einstein y la Relatividad, pero estas coyunturas son la anomalía. Habitualmente, es el trabajo de muchas personas el describir con precisión un fenómeno desconocido. Fueron bastantes los actores implicados en el desarrollo del efecto invernadero, dos de los que destacan son John Tyndall y Eunice Foote.

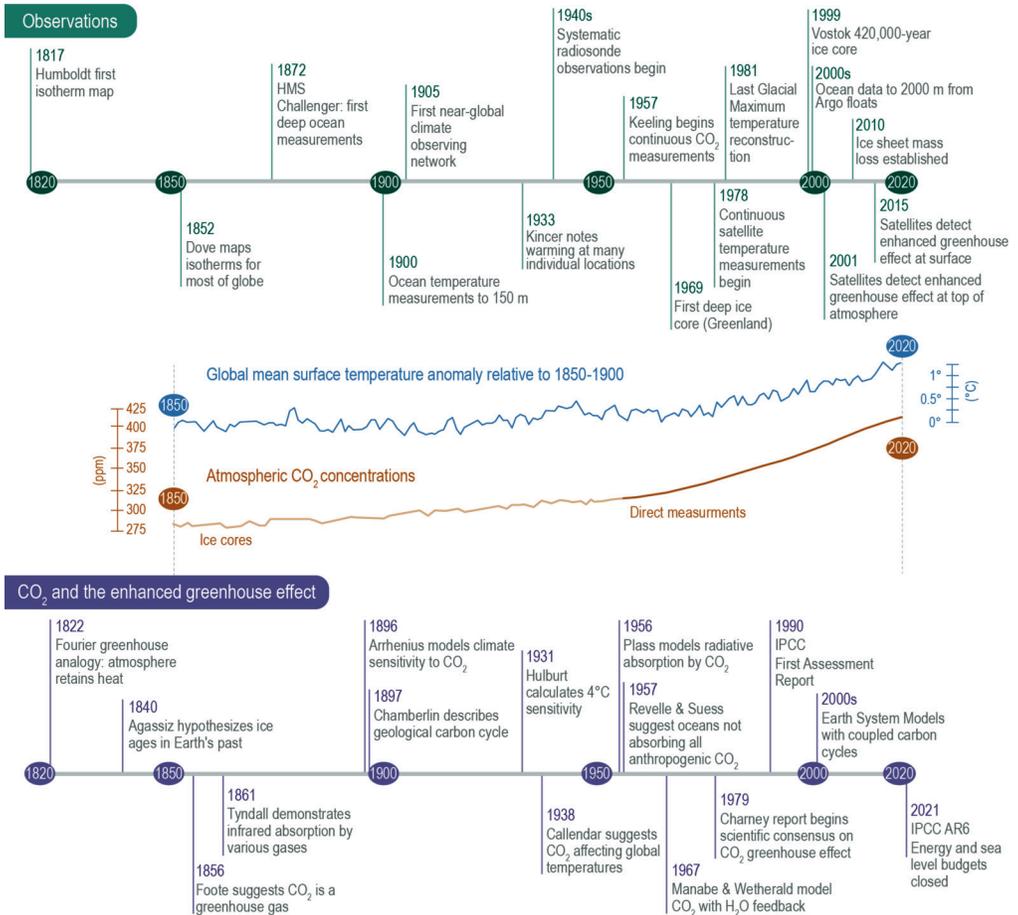


Figura 3. Resumen histórico de las observaciones del cambio climático, tanto del ascenso de temperaturas como de la concentración del CO₂, incluyendo los principales actores históricos. [De IPCC AR6 WG1, capítulo 1, figura 1.6: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-1/figure-1-6/>].

Eunice Foote fue la primera persona en sugerir que el CO₂ era un gas de efecto invernadero. Realizó unos experimentos, con material casero, en el que aisló algunos de los gases constituyentes de la atmósfera y los colocó tanto en exposición directa al sol como a la sombra, midiendo luego su temperatura. Comprobó que por su capacidad de retener el calor destacaba especialmente el CO₂. Estos resultados se presentaron en un congreso de la AAAS (Asociación Americana para el Avance de la Ciencia) en 1856, aunque no los expuso la propia Foote, sino un profesor amigo suyo, Joseph Henry. El descubrimiento de Foote se publicó en un breve artículo de *The American Journal of Science and Arts* de la AAAS, con el mismo título que en la conferencia: *Circumstances affecting the heat of the sun's rays* (figura 4).

Foote incluso aventuró la explicación de que si en épocas pasadas, como algunos pensaban, la cantidad de CO₂ hubiese sido mayor, necesariamente eso habría llevado a que la Tierra estuviese más caliente.

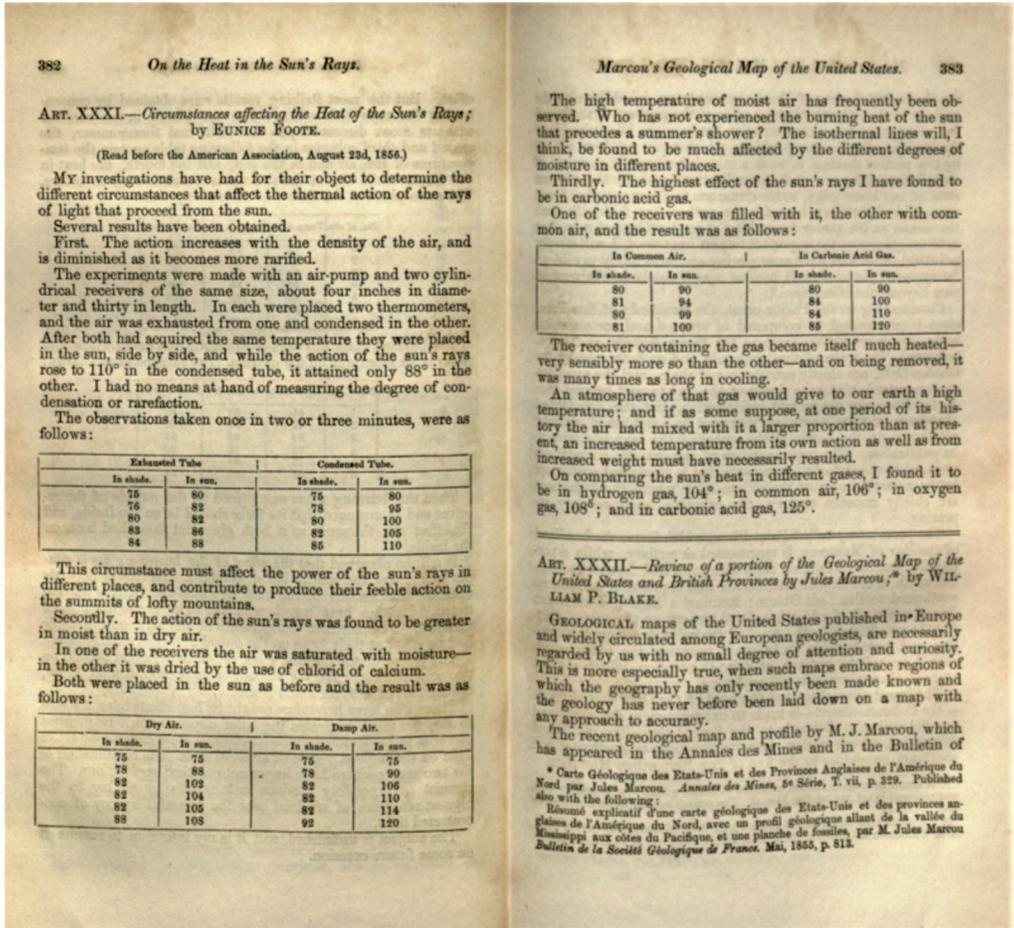


Figura 4. El breve artículo de Eunice Foote presentando sus resultados sobre la absorción del calor por parte del CO₂. [De Eunice Newton Foote; <https://archive.org/details/mobot31753002152491/page/381/mode/2up?view=theater>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=113756736>].

El trabajo de Foote quedó relegado al olvido pronto, en gran parte por su condición de mujer; era habitual que las mujeres tuvieran restringida su actividad científica y que se las citase menos. Además, no era una profesional, sino que había realizado sus experimentos en casa. La figura de Foote comenzó a reivindicarse a finales del pasado siglo, y ha adquirido fuerza en tiempos recientes. Además de su actividad científica, Foote fue una de las primeras feministas, una activa defensora de los derechos de las mujeres y una de las impulsoras de la Convención de Seneca Falls de 1848, donde se exigían más derechos para las mujeres, como el poder votar, afiliarse a un partido o presentarse a cargos públicos.

Los experimentos de John Tyndall, tres años después de los de Foote, fueron esencialmente iguales, aunque más precisos (también disponía de más medios). El gran avance de Tyndall fue el apelar, de forma correcta, a la radiación infrarroja como la transmisora de esa energía térmica que algunos gases retenían de forma efectiva. Tyndall comprobó la importancia del vapor de agua como gas capaz de retener la radiación infrarroja (figura 1). Como Foote, Tyndall también se dio cuenta de las implicaciones de su descubrimiento para describir el clima de la Tierra.

Tyndall fue un brillante físico experimental que realizó contribuciones originales en campos diversos que abarcan el magnetismo, la espectroscopía o la acústica, entre otros. Como estudiante tuvo la oportunidad de formarse con Robert Bunsen y Heinrich Gustav Magnus (el de la fórmula semiempírica de Magnus para calcular la tensión de vapor de saturación, usada en meteorología), dos de los grandes físicos experimentales del siglo XIX. El trabajo de Tyndall se consolidó con las deducciones teóricas de Svante Arrhenius.

4. SVANTE ARRHENIUS Y GUY CALLENDAR

Se dice que fue el sueco Svante Arrhenius, premio Nobel de Química, quien creó el término «efecto invernadero». Lo hizo en un artículo de 1896, en el que no solo trazaba la analogía con un invernadero que acumula calor, sino que calculó de forma teórica el incremento de temperatura cuando se duplicaba la concentración de CO₂. Arrhenius calculó primero lo que se conoce como forzamiento radiativo, esto es, el desequilibrio entre la radiación incidente y la saliente, que tiene la forma

$$\Delta F = \alpha \ln (C/C_0).$$

Donde ΔF indica el cambio en el forzamiento radiativo en W/m², C es la nueva concentración de CO₂ y C_0 la concentración de partida, α es una constante (WALTER, 2010). De aquí se puede calcular el incremento de temperatura usando una ley física llamada ley de Stefan-Boltzmann.

Sin embargo, el sistema climático es más complejo y no solo influye el aumento de la temperatura calculado tras duplicar la concentración de CO₂ y aplicar la ley de Stefan-Boltzmann. También intervienen las realimentaciones o *feedbacks*, es decir, que no solo hay que calcular el incremento de temperatura debido a doblar el CO₂, sino también los efectos que este incremento de temperatura tiene en otras variables que a su vez influyen en la temperatura. De forma general, se escribe una relación lineal entre forzamiento y aumento de temperatura, $\Delta F = (1/\lambda) \Delta T$, donde a λ se le llama «sensibilidad climática». (Hay que tener en cuenta que en muchas ocasiones se define la sensibilidad climática de otra forma: como el incremento, en grados, de la temperatura cuando se duplica la concentración de CO₂ con respecto a niveles preindustriales).

Arrhenius calculó que doblar el CO₂ desde los niveles casi preindustriales en los que él vivió conllevaría un incremento de 5 a 6 °C (WALTER, 2010), aunque luego lo redujo un poco. El IPCC da un rango de aumento de temperaturas de entre 2 y 5 °C, con unos 3 °C como el valor más probable (IPCC, 2021). Los números de Arrhenius son admirablemente buenos para la época; además, fue Arrhenius quien señaló de manera clara que el ser humano tenía la capacidad de incrementar el CO₂ atmosférico, calentando el planeta.

Desde entonces, varios científicos midieron el CO₂ y las temperaturas, pero fue un meteorólogo aficionado, Guy Stewart Callendar, quien, en palabras del climatólogo Ed Hawkins, «juntó las piezas del puzzle» (HAWKINS, 2013). Callendar reunió los datos de temperatura y de CO₂ de varios años de muchos de lugares del mundo. Conocía el trabajo de Arrhenius, así que pudo calcular los incrementos de temperatura asociados al incremento de CO₂. En 1938 escribió un artículo en el que afirmaba que en los últimos 50 años la Tierra se había calentado 0,3 °C (HAWKINS, 2013), y vinculaba este incremento con el aumento de las emisiones de CO₂ de origen humano.

Como en el caso de Arrhenius, los cálculos de Callendar eran muy precisos para la época. Sus resultados fueron en general bien acogidos, aunque tampoco se los consideró la última palabra sobre el tema. Tuvo alguna notable oposición, como el presidente de la *British Meteorological Society* en aquel entonces, pero sus resultados calaron en la comunidad meteorológica y climatológica; todo ello, unido a los trabajos de científicos anteriores, como los mencionados en este artículo, contribuyó a tomar muy en serio la influencia humana en el clima.

5. CONCLUSIÓN

Callendar siguió recopilando datos y trabajando en refinar y extender sus cálculos sobre el aumento de temperatura. Más científicos se sumaron al estudio de la influencia humana en el clima, como Charles Keeling (el de la curva Keeling que aparece en la figura 2), quien en 1958 comenzó a tomar medidas sistemáticas de la concentración de CO₂ en el observatorio de Mauna Loa, en Hawái; la serie de datos llega hasta hoy en día y es todo un símbolo de la ciencia climática.

En la figura 3 se aprecian más actores en el descubrimiento y descripción del efecto invernadero: nuevos cálculos de la sensibilidad climática (Hurlburt), los estudios de cuánto CO₂ pueden absorber de la atmósfera los océanos, el gran éxito del modelo climático de Manabe y Wetherald, la creación del IPCC... La figura 3 es un fresco ejemplar de trabajo científico colaborativo y gradual, con hombres y mujeres de todo el mundo recopilando datos, proponiendo hipótesis, realizando cálculos y comprobando sus resultados. Y haciendo avanzar el conocimiento humano.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- BENESTAD, R. E., 2017. A mental picture of the greenhouse effect. *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 128, pp. 679-688. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1732-y>.
- FLEMING, J. R., 1999. Joseph Fourier, the 'greenhouse effect', and the quest for a universal theory of terrestrial temperatures. *Endeavour*, vol. 23, issue 2, pp. 72-75. [https://doi.org/10.1016/S0160-9327\(99\)01210-7](https://doi.org/10.1016/S0160-9327(99)01210-7).
- HAWKINS, Ed, 2013. A brief history of climate science. *The conversation*, <https://theconversation.com/a-brief-history-of-climate-science-18578>.
- IPCC, 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>.
- LOCKWOOD, M. F. y FRÖHLICH, C., 2007. Recent oppositely directed trends in solar climate forcings and the global mean surface air temperature. *Proceedings of the Royal Society, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 463 (2086): 2447. <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1880>.
- PALMER, T., 2022. The Primacy of Doubt: From Quantum Physics to Climate Change, How the Science of Uncertainty Can Help Us Understand Our Chaotic World. Basic Books.
- RUBINO, M., ETHERIDGE, D., THORNTON, D., ALLISON, C., FRANCEY, R., LANGENFELDS, R., STEELE, P., TRUDINGER, C., SPENCER, D., CURRAN, M., VAN OMMEN, T. y SMITH, A., 2019. Law Dome Ice Core 2000-Year CO₂, CH₄, N₂O and δ¹³C-CO₂. v1. CSIRO. Data Collection. <https://doi.org/10.25919/5bfe29ff807fb>.
- WALTER, M. E., 2010. Earthquakes and Weatherquakes: Mathematics and Climate Change. *Notices of the AMS*, vol. 57, no. 10. <http://www.ams.org/notices/201010/rtx101001278p.pdf>.