

*Este documento ha sido traducido por la **Biblioteca del Congreso de la República** con fines meramente informativos para los usuarios de la institución. Esta versión en español no es una traducción oficial de la revista ni de los autores, ni la traducción ha sido revisada por estos; por tanto, ellos no son responsables del contenido ni de los errores que pudiera contener la traducción.*

Título del documento:

Inglés: «On Hens, Eggs, Temperatures and CO₂: Causal Links in Earth's Atmosphere».

Nº de páginas: 33

Enlace: <https://www.mdpi.com/2413-4155/5/3/35?fbclid=IwAR1ubhLNNm6jfwQ9IMimUH-pDYFInsuZyVExVSLkqNovkPyGLnI OtG4kQF8>

Fecha de documento: 13 de setiembre del 2023

Español: «Sobre huevos, gallinas, temperaturas y CO₂: Vínculos causales en la atmósfera terrestre»

Nº de páginas: 37

Fecha de documento: 17 de enero del 2024*

Autores: Demetris Koutsoyiannis, Christian Onof, Zbigniew W. Kundzewicz y Antonis Christofides

Institución: *Sci es una revista internacional de acceso abierto, revisada por pares, sobre todos los campos de investigación y publicada trimestralmente en línea por MDPI.*

Derechos de autor: © 2023 por los autores. Licenciario MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* N.T.: Esta traducción ha sido realizada por la Biblioteca del Congreso de la República (traductora: MPZ).

Sobre huevos, gallinas, temperaturas y CO₂: Vínculos causales en la atmósfera terrestre

Demetris Koutsoyiannis^{1*}, Christian Onof², Zbigniew W. Kundzewicz³ y Antonis Christofides¹

¹ Departamento de Recursos Hídricos e Ingeniería Ambiental, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Técnica Nacional de Atenas, 15778 Zographou, Grecia; anthony@itia.ntua.gr

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Imperial College de Londres, Londres SW7 2BX, Reino Unido; c.onof@imperial.ac.uk

³ Laboratorio de Meteorología, Departamento de Construcción y Geoingeniería, Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Mecánica, Universidad de Ciencias de la Vida de Poznan, 60-637 Poznan', Polonia; kundzewicz@yahoo.com

* Correspondencia: dk@itia.ntua.gr

Resumen: El interés científico, y muy generalizado, por la relación entre la temperatura atmosférica (T) y la concentración de dióxido de carbono ($[\text{CO}_2]$) ha sido enorme. Según la relación de causalidad comúnmente asumida, el incremento de $[\text{CO}_2]$ provoca un aumento de T . Sin embargo, los últimos avances ponen en duda esta suposición al demostrar que esta relación es del tipo del dilema *el huevo o la gallina*, o incluso unidireccional, pero de sentido opuesto a lo que comúnmente se piensa. Estos desarrollos incluyen un marco teórico avanzado para probar la causalidad basado en la evaluación estocástica de un vínculo potencialmente causal entre dos procesos a través de la noción de función de respuesta al impulso. En este estudio hemos utilizado, por un lado, este marco y lo hemos ampliando aún más y, por el otro, las series temporales modernas más largas disponibles de T y $[\text{CO}_2]$ promediadas globalmente, lo que ha permitido arrojar luz sobre la causalidad potencial entre estos dos procesos. Todas las pruebas resultantes de los análisis sugieren un vínculo unidireccional, potencialmente causal, con T como causa y $[\text{CO}_2]$ como efecto. Este vínculo no está representado en los modelos climáticos, cuyos resultados también se examinan utilizando el mismo marco, lo que da como resultado un vínculo opuesto al que se encuentra cuando se utilizan las mediciones reales.

Palabras clave: causalidad; sistemas causales; estocástica; función de respuesta al impulso; geofísica; hidrología; clima.

Cita: Koutsoyiannis, D.; Onof, C.; Kundzewicz, Z.W.; Christofides, A. On Hens, Eggs, Temperatures and CO₂: Causal Links in Earth's Atmosphere. *Sci* **2023**, 5, 35. <https://doi.org/10.3390/sci5030035>.

Editores académicos: Anthony R. Lupo, João Miguel Dias, Claus Jacob y Ahmad Yaman Abdin.

Texto recibido: 17 de marzo, 2023
Revisado: 24 de mayo, 2023
Aceptado: 5 de setiembre, 2023
Publicado: 13 de setiembre, 2023

La ciencia se genera y se dedica a la libre indagación: por ello, prevalece la idea de que cualquier hipótesis, por extraña que sea, merece ser considerada por sus méritos. La eliminación de ideas incómodas puede ser habitual en la religión y la política, pero no es el camino hacia el conocimiento; no tiene cabida en el quehacer científico. No sabemos de antemano quién descubrirá nuevos conocimientos fundamentales.

Carl Sagan [1]



Copyright: © 2023 por los autores. Licenciataro MDPI, Basilea, Suiza. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

Un estudio reciente (2020) [2] en el que se analizaban datos de mediciones de la temperatura (T) y la concentración atmosférica de dióxido de carbono ($[\text{CO}_2]$) puso en tela de juicio la creencia convencional, y muy generalizada, de que el aumento de $[\text{CO}_2]$ provoca un aumento de la temperatura. El estudio examinó si la cadena causal comúnmente asumida está respaldada por datos o, alternativamente, si es más plausible una relación causal *el huevo o la gallina*. La frase «*el huevo o la gallina*» (originalmente en griego, ὄρνις ἢ ᾠόν) fue utilizado por primera vez en un contexto filosófico por Plutarco [3] para describir situaciones en las que no está claro cuál de dos sucesos o procesos interrelacionados es la causa y cuál el efecto.

El estudio examinó un caso en el que el vínculo causal no se da entre dos sucesos, sino entre dos procesos, representados como procesos estocásticos. Estos procesos se denominan $\underline{x}(t)$ e $\underline{y}(t)$ (donde seguimos la convención notacional holandesa de subrayar las variables estocásticas), en un sistema causal típico, denotado como $x \rightarrow y$, realizaciones anteriores de $\underline{x}(t)$ afectan a la realización actual de $\underline{y}(t)$. En un sistema causal de «el huevo o la gallina», las realizaciones anteriores de $\underline{x}(t)$ afectan a la realización actual de $\underline{y}(t)$, pero también realizaciones anteriores de $\underline{y}(t)$ afectan a la realización actual de $\underline{x}(t)$.

En cuanto a sus aplicaciones, el estudio utilizó datos globales de temperatura procedentes de satélites (Universidad de Alabama en Huntsville-UAH) y terrestres (CRUTEM.4.6.0.0 global T 2 m temperatura terrestre) y datos de $[\text{CO}_2]$ en varios sitios (Mauna Loa, HI, EE.UU.; Barrow, AK, EE.UU.; Polo Sur; media global) con pasos temporales mensuales para el periodo 1980-2019. Un elemento innovador de este estudio fue que explicaba las razones por las que utilizar las series de datos originales de T y $[\text{CO}_2]$ arrojaba resultados espurios y proponía utilizar en su lugar los cambios (diferencias en el tiempo) de estas. Observamos que la diferenciación es de uso muy común en la literatura económica (por ejemplo, [4,5]). En particular, para el $[\text{CO}_2]$ propuso tomar el logaritmo antes de diferenciar (algo parecido a las técnicas utilizadas en economía [5]) y, por tanto, las series temporales que estaban correlacionadas eran ΔT y $\Delta \ln [\text{CO}_2]$, donde las diferencias se toman a lo largo de 12 meses. Al estudiar las correlaciones retardadas de ambas, el estudio afirmó que, aunque existen ambas direcciones de causalidad, los resultados apoyan la hipótesis de que la dirección dominante es $T \rightarrow \text{CO}_2$. Los cambios en $[\text{CO}_2]$ siguen a los cambios en T en aproximadamente seis meses a escala mensual o en aproximadamente un año a escala anual. A su vez, el estudio trató de interpretar este mecanismo haciendo referencia a reacciones bioquímicas, ya que a temperaturas más elevadas aumenta la respiración del suelo y, por tanto, la emisión de CO_2 .

En un estudio posterior (2022) de dos artículos, Koutsoyiannis *et al.* [6,7] se desarrolló un marco teórico más completo revisando la causalidad en todo el árbol del conocimiento, desde la filosofía hasta la ciencia, y la aplicación científica y tecnológica. Al revisar diversos enfoques de la causalidad, el estudio localizó varios problemas en la identificación de vínculos causales. De ahí que el estudio desarrollara los fundamentos teóricos de un enfoque estocástico de la causalidad, con el objetivo de formular

condiciones necesarias que sean operacionalmente útiles para identificar o falsificar afirmaciones de causalidad. También desarrolló un algoritmo eficaz aplicable a sistemas abiertos a gran escala, que no son controlables ni repetibles. El marco propuesto se ilustró y mostró en una serie de casos prácticos, algunos de los cuales eran ejemplos sintéticos controlados y otros del mundo real derivados de interesantes problemas científicos de la geofísica y, en particular, de la hidrología y la climatología. La relación de la temperatura media mundial con la concentración de $[\text{CO}_2]$ (de nuevo en términos de diferencias ΔT y $\Delta \ln [\text{CO}_2]$ a lo largo de 12 meses) se incluyó en los treinta estudios de caso presentados. En resumen, los análisis relacionados apuntaban a lo siguiente (citando a [7]):

Claramente, los resultados [...] sugieren un sistema potencialmente causal (mono-direccional) con T como causa y $[\text{CO}_2]$ como efecto. Por lo tanto, la percepción común de que el aumento de $[\text{CO}_2]$ provoca un aumento de T puede excluirse, ya que viola la condición necesaria para esta dirección de causalidad.

[...] en otras palabras, es el aumento de la temperatura lo que ha provocado el aumento de la concentración de CO_2 . Aunque a primera vista esta conclusión pueda parecer contra-intuitiva, porque contradice la percepción común [...], en realidad es razonable. El aumento de la temperatura comenzó al final del Pequeño Periodo Glacial, a principios del siglo XIX, cuando las emisiones humanas de CO_2 eran insignificantes [...].

Sin embargo, el objetivo de ese estudio [6,7] era formular una metodología general para la detección de la causalidad —en particular, las condiciones necesarias para ello—, en lugar de estudiar en detalle un sistema específico. Por lo tanto, no se realizaron modelizaciones detalladas en los casos estudiados, incluidas las aplicaciones hidrológicas y climáticas. No obstante, dado el enorme interés que suscita la relación T - $[\text{CO}_2]$, aquí profundizaremos en ella.

En concreto, este trabajo, tras resumir la metodología (sección 2) y los datos utilizados (sección 3), se centra en esta última relación con los siguientes objetivos:

1. Ampliar el marco temporal de la investigación hacia atrás y hacia delante aprovechando las series de datos más largas disponibles (sección 4).
2. Comprobar si la estacionalidad, tal y como se refleja en las diferentes fases de las series temporales de $[\text{CO}_2]$ en diferentes latitudes, desempeña algún papel que pueda modificar o posiblemente invertir la relación de causalidad detectada (sección 5).
3. Proponer y aplicar un método para investigar el efecto de la escala temporal en la detección de causalidad (sección 6).
4. Ampliar la metodología para desambiguar los casos en los que el tipo de causalidad, el huevo o la gallina o unidireccional, no está del todo claro (sección 7).
5. Aprovechar la metodología para definir un tipo de análisis de datos que, independientemente de la detección de causalidad *per se*, pueda arrojar luz sobre el rendimiento de los modelos comparando los datos observacionales con los resultados de los modelos (sección 8).
6. Discutir posibles ampliaciones del alcance de la metodología, es decir, desde la detección de posibles causalidades hasta la construcción de un modelo más detallado de tipo estocástico (sección 9).
7. Proporcionar un apoyo lógico a las conclusiones revisando el balance de carbono en la atmósfera (apéndice A.1) e investigando procesos adicionales que puedan haber causado aumentos de temperatura (apéndices A.2-A.4).

2. Resumen del enfoque estocástico de la causalidad

La metodología de [6,7] se basa en la función de respuesta al impulso (IRF) entre dos procesos $x(t)$, $y(t)$, denotada como $g(h)$ donde h denota el desfase temporal, basada en la convolución

$$\underline{y}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} g(h)\underline{x}(t-h)dh + \underline{v}(t) \quad (1)$$

donde $\underline{v}(t)$ es otro proceso estocástico que representa la parte no explicada por el vínculo causal. Para ver que la función $g(h)$ es la función de respuesta al impulso (IRF) del sistema $(\underline{x}(t), \underline{y}(t))$, fijamos $\underline{v}(t) \equiv 0$ y $\underline{x}(t) = \delta(t)$ (la función delta de Dirac, que representa un impulso de amplitud infinita en $t = 0$ y alcanza el valor de 0 para $t \neq 0$), y obtenemos fácilmente $\underline{y}(t) = g(t)$.

Por otra parte, si fijamos $g(h) = b\delta(h-h_0)$ (con b constante y h_0), lo que significa que la IRF es cero para cada retardo excepto para el retardo específico h_0 , entonces la ecuación (1) se convierte en $\underline{y}(t) = b\underline{x}(t-h_0) + \underline{v}(t)$. Este caso especial equivale simplemente a correlacionar $\underline{y}(t)$ con $\underline{x}(t-h_0)$ en cualquier momento t . Es fácil encontrar (véase la regresión lineal) que en este caso la constante multiplicativa b es el coeficiente de correlación de $\underline{y}(t)$ y $\underline{x}(t-h_0)$ multiplicado por la razón de las desviaciones típicas de los dos procesos. En general, sin embargo, esperamos que la $g(h)$ real no sea una función delta de Dirac, sino una función continua en algún dominio. Así, la IRF es una herramienta mucho más potente que la correlación, ya que integra las correlaciones en todo el espectro de retardos.

Para cualesquiera dos procesos $\underline{x}(t)$ e $\underline{y}(t)$, la ecuación (1) tiene infinitas soluciones en términos de la función $g(h)$ y del proceso $\underline{v}(t)$. Una obvia y trivial es $g(h) \equiv 0$, $\underline{v}(t) \equiv \underline{y}(t)$. La solución buscada es la que corresponde a la varianza mínima de $\underline{v}(t)$, llamada solución de mínimos cuadrados. Equivalentemente, esta solución maximiza la relación de varianza explicada:

$$e := 1 - \frac{\gamma_v}{\gamma_y} \quad (2)$$

donde γ_v e γ_y denotan las varianzas de los procesos $\underline{v}(t)$ e $\underline{y}(t)$, respectivamente. (Esto es similar a lo que ocurre en la correlación con un solo desfase temporal). Si el máximo alcanzado e es próximo a cero, significará que los dos procesos no están correlacionados y, por tanto, no se puede aplicar ninguna condición de causalidad entre ellos (un sistema no causal).

En caso contrario, podemos suponer, sin pérdida de generalidad, que los procesos $\underline{x}(t)$ e $\underline{y}(t)$ están correlacionados positivamente (es decir, un aumento de $\underline{x}(t)$ provocaría un aumento de $\underline{y}(t)$). En el caso contrario (si los procesos están correlacionados negativamente), multiplicando uno de las dos series por -1 hacemos que la correlación sea positiva. Por lo tanto, imponemos una restricción de no negatividad para la IRF buscada,

$$g(h) \geq 0 \quad (3)$$

En la estimación de la IRF, también podemos imponer una restricción de rugosidad,

$$E \leq E_0 \quad (4)$$

donde E es la rugosidad de la IRF

$$E := \int_{-\infty}^{\infty} (g''(h))^2 dh \quad (5)$$

determinada en términos de la segunda derivada de $g(h)$:

En [6] se ofrece una justificación más detallada de las dos restricciones.

En las aplicaciones, la representación de tiempo continuo se sustituye por una de tiempo discreto, la IRF se convierte en una secuencia de valores g_j , donde j denota el desfase temporal, el intervalo infinito del desfase temporal h se convierte en una ventana finita del desfase temporal j , especificada en el intervalo $[-J, J]$, las integrales se sustituyen por sumas y los valores verdaderos de las estadísticas se sustituyen por estimaciones. Además, la rugosidad E se normaliza como:

$$\varepsilon := \frac{E}{8 \sum_{j=-J}^J g_j^2} \quad (6)$$

donde ε oscila entre (0.1) para g_j no negativo. La determinación de las ordenadas IRF g_j se formula así como un problema de optimización restringido, cuya solución numérica es siempre posible, sencilla y rápida, y puede alcanzarse incluso con solucionadores comúnmente disponibles, por ejemplo, en software de hojas de cálculo comercial o de código abierto.

Observamos que en las aplicaciones, cada una de las direcciones $x \rightarrow y$ e $y \rightarrow x$ se investiga por separado, ya que no hay simetría (o antisimetría) en las IRF producidas en las dos direcciones. Cuando nos referimos a la dirección $y \rightarrow x$ queremos decir que intercambiamos las series temporales x e y , y seguimos estimando la IRF de la misma manera, como se describe en nuestras ecuaciones en las que se supone la dirección $x \rightarrow y$.

En las aplicaciones que investigan la causalidad, empezamos por suponer un modelo causal potencialmente el-huevo-o-la-gallina con un número fijo de ponderaciones g_j , $j = -J, \dots, 0, \dots, J$, donde en la mayoría de los casos estudiados en [7] se adoptó el valor $J = 20$, que también se sigue aquí. En función de los resultados del procedimiento de estimación, si e no es despreciable, el sistema se considera:

- *Potencialmente causal el huevo o la gallina* si tenemos $g_j > 0$ tanto para algunos rezagos j positivos como negativos.
- *Potencialmente causal* si $g_j = 0$ para todo $j < 0$.
- *Potencialmente anticausal* si $g_j = 0$ para todo $j > 0$.

Obsérvese que «anticausal» significa que la dirección real de la causalidad es opuesta a la calculada. Estos tres casos se ilustran gráficamente en la figura 1. El adverbio «potencialmente» en las caracterizaciones anteriores subraya el hecho de que las condiciones probadas proporcionan condiciones necesarias, pero no suficientes para la causalidad.

En un sistema potencialmente causal (o anticausal), el orden temporal se refleja explícitamente en las caracterizaciones anteriores. En un sistema potencialmente causal «el huevo o la gallina», el orden temporal debe aclararse definiendo la dirección principal. Los índices más naturales para ello son (a) el desfase temporal hc maximizando el valor absoluto de la covarianza cruzada; (b) la media (promedio temporal) μh de la función $g(h)$, y (c) la mediana $h_{1/2}$ de la función $g(h)$. Observamos que hc , que era la base en el estudio original [2], es completamente independiente de la $g(h)$. Las otras dos, μh y $h_{1/2}$, dependen de la $g(h)$ que se determine. Sin embargo, extensos análisis en [7] mostraron que su estimación es bastante robusta; por ejemplo, el uso de la restricción de rugosidad, aunque afecta a la $g(h)$ resultante, prácticamente no afecta a los valores de μh y $h_{1/2}$. En general, los retardos característicos μh y $h_{1/2}$ no difieren sustancialmente entre sí, y podría elegirse cualquiera de ellos para su uso posterior. Aquí preferimos anotar ambos, así como hc , ya que todos ellos proporcionan información útil sobre la relación de los dos procesos (como en el caso de utilizar tanto la media como la mediana en la caracterización de la distribución de probabilidad de una única variable).

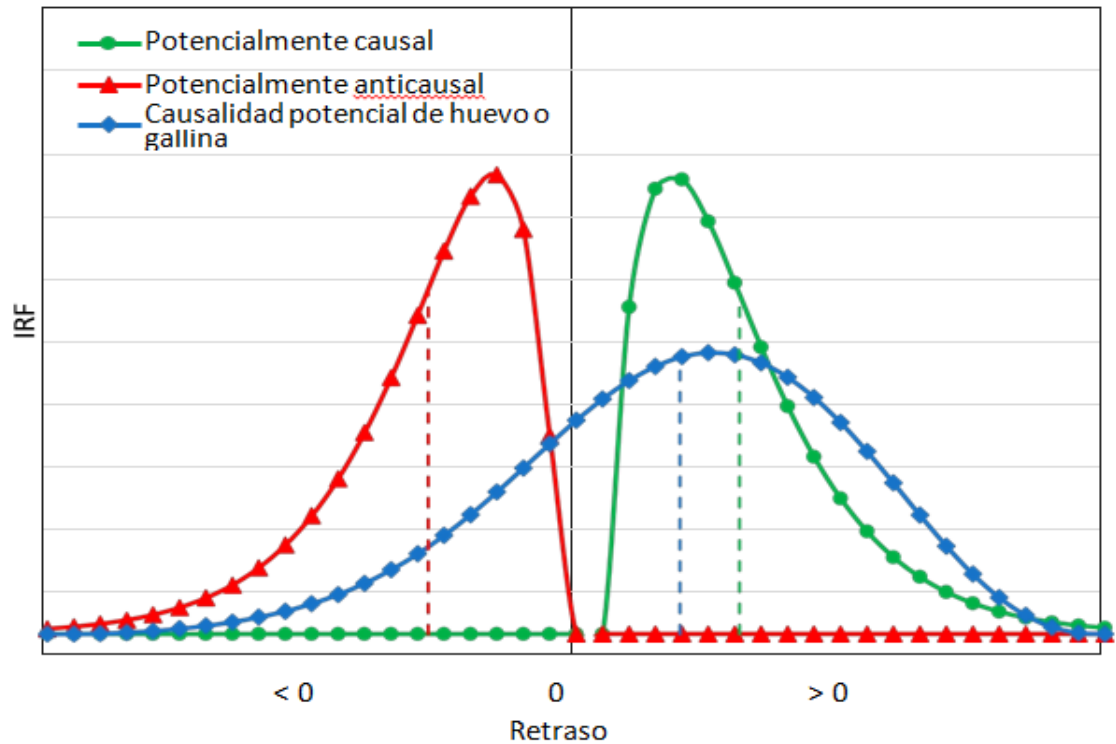


Figura 1. Esquema explicativo de la definición de los distintos tipos de causalidad potencial. En cada gráfico, la media μ_h también se representa con una línea discontinua.

Ni qué decir que la literatura ofrece un espectro de métodos alternativos para estimar una IRF, utilizando diferentes herramientas como funciones de autocorrelación y correlación cruzada [8,9], espectros de potencia y espectros cruzados basados en la transformada de Fourier [10] o en una transformada wavelet [11], así como el análisis de componentes principales [12]. El método descrito anteriormente tiene algunas ventajas sobre estas alternativas, ya que es un método directo que puede trabajar con series temporales de observaciones *per se*, en vez de con transformaciones de estas, siendo fácilmente comprensible y reproducible por cualquier lector utilizando medios computacionales sencillos. Además, es más fiable, ya que evita utilizar estimaciones inciertas de las funciones de autocorrelación o sus transformaciones más inciertas, como el espectro de potencia, es decir, la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. Nótese que aquí también utilizamos la autocorrelación, pero solo para validar y confirmar nuestros resultados, no en el procedimiento de estimación.

Además, como se detalla en [6], nuestro método difiere conceptual y computacionalmente de la llamada «causalidad de Granger» [13,14] (un término no apropiado, ya que el método no infiere causalidad sino predicción) y reformulado más recientemente en el estudio de Moraffah *et al.* [15], que también analiza otros métodos similares. Por último, nuestro método presenta diferencias sustanciales con respecto al marco propuesto por Pearl y colaboradores [16-18], que también se analiza en detalle en [6].

3. Datos y casos prácticos

Para explorar la relación T -[CO₂], los estudios de caso #23 y #24 en [7] utilizaron series de temperatura basadas en satélites (UAH) para la troposfera inferior y datos de [CO₂] de Mauna Loa. También se examinaron los datos de temperatura de los otros dos niveles de satélite para la tropósfera, donde los resultados fueron muy similares

a los comunicados para los estudios de caso #23 y #24.

Aquí presentamos estudios de caso adicionales, enumerados en la tabla 1. Además de las series de temperatura basadas en satélites [7], aquí utilizamos datos de superficie (a 2 m) del NCEP/NCAR reanalysis 1 de los National Centers for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) [19], que están a disposición del público. La cobertura temporal del NCEP/NCAR reanalysis 1 incluye datos recogidos cuatro veces al día para proporcionar valores diarios y mensuales desde 1948 hasta el presente con una resolución horizontal de 1.88° (~ 210 km en el ecuador). Utiliza un sistema de análisis y previsión de última generación para realizar la asimilación de datos utilizando observaciones y un modelo numérico de predicción meteorológica. La asimilación de datos y el modelo utilizado son idénticos al sistema global implementado operativamente en el NCEP, excepto por la resolución horizontal. Un amplio subconjunto de los datos está disponible en forma de medias diarias y mensuales.

Tabla 1. Principales estudios de caso e índices sintéticos resultantes. Δt es el paso temporal de la diferenciación; hc es el desfase temporal que maximiza la covarianza cruzada $c_{yx}(h)$ o equivalentemente a la correlación cruzada $r_{yx}(h) := c_{yx}(h)/\sqrt{c_{xx}(0)c_{yy}(0)}$; μ_h es la media (promedio temporal) de la función $g(h)$; $h_{1/2}$ es la mediana de la función $g(h)$; e es el ratio de varianza explicada; y ε es el ratio de rugosidad. Los estudios de caso n° 1 y n° 2 figuran en [7] como los estudios de caso n° 23 y n° 24 y se incluyen en la tabla solo a efectos comparativos.

Sistema de casos	#	Dirección	h_c	μ_h	$h_{1/2}$	$r_{yx}(hc)$	e	ε
<i>Escala de tiempo mensual, variando Δt</i>								
T: UAH; [CO ₂]: Mauna Loa, 1979-2020 (de [7]), $\Delta t = 1$ año	1	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	5	7.70	6.35	0.48	0.31	1.3×10^{-5} *
	2	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-5	-5.67	-5.49	0.48	0.23	7.3×10^{-4} *
T: NCEP/NCAR; [CO ₂]: Mauna Loa, 1958-2021, $\Delta t = 1$ año	3	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	8	7.75	6.86	0.56	0.34	3.1×10^{-4} *
	4	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-8	-6.31	-6.30	0.56	0.23	4.4×10^{-3} *
Como #3 y #4, $\Delta t = 2$ años.	5	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	8	8.19	7.08	0.57	0.31	3.4×10^{-4} *
	6	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-8	-6.31	-6.31	0.57	0.21	4.5×10^{-3} *
Como #3 y #4, $\Delta t = 4$ años	7	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	9	10.65	10.32	0.53	0.29	1.0×10^{-4} *
	8	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-9	-6.28	-6.28	0.53	0.14	3.8×10^{-3} *
Como #3 y #4, $\Delta t = 8$ años	9	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	8	11.00	11.00	0.47	0.27	5.6×10^{-5} *
	10	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-8	-6.55	-6.54	0.47	0.11	3.6×10^{-3} *
Como #3 y #4, $\Delta t = 16$ años	11	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	6	11.74	12.15	0.45	0.31	3.4×10^{-5} *
	12	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	6	9.98	11.13	0.45	0.33	7.6×10^{-6} *
	13	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-6	-6.33	-6.31	0.45	0.12	7.7×10^{-3} *
T: NCEP/NCAR; [CO ₂]: Polo Sur, 1975-2021, $\Delta t = 1$ año	14	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	10	9.76	8.91	0.40	0.35	2.0×10^{-4} *
	15	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	-10	-8.51	-8.35	0.40	0.18	1.1×10^{-3} *
<i>Escala temporal anual, $\Delta t = 1$ año</i>								
T: media CMIP6, SSP2-4.5; [CO ₂]: SSP2-4.5, 1850-2100, sin limitación de la rugosidad	16	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	0	-3.75	-6.20	0.36	0.90	0.095
	17	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	0	9.95	15.30	0.36	0.15	0.46
Como #16 y #17 pero para 1850-2021	18	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	0	-6.23	-8.58	0.31	0.72	0.10
	19	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	0	16.18	16.16	0.31	0.10	0.295
Como #16 y #17 pero con restricción de rugosidad	20	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	0	-3.65	-5.55	0.36	0.84	3.5×10^{-5} *
	21	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	0	6.86	1.63	0.36	0.13	7.7×10^{-3} *
Como #18 y #19 pero con restricción de rugosidad	22	$\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$	0	-7.34	-8.99	0.31	0.64	8.3×10^{-5} *
	23	$\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$	0	11.26	14.77	0.31	0.13	9.4×10^{-3} *

(*) La rugosidad se calculó sin considerar la segunda derivada en cero.

Para la concentración de CO₂, además del conjunto de datos de Mauna Loa, que actualizamos para incluir las últimas mediciones de más de un año, también añadimos el conjunto de datos del Polo Sur recopilados por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU. (NOAA). Las mediciones comenzaron en 1975 y se realizan en dos casos, en matraz e *in situ*, de los cuales utilizamos los primeros sobre una base media mensual, excepto en unos pocos casos de falta de datos, en los que los completamos con datos *in situ*.

Algunos de los análisis presentados aquí se refieren a los resultados de los modelos climáticos. Aquí utilizamos la media (media CMIP6) de las series de resultados del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP6) promediadas para todo el planeta. Las salidas de los modelos también se remontan al pasado, abarcando el periodo 1850-2100. Cuando estudiamos comportamientos pasados, utilizamos los datos hasta el 2021, como en los demás estudios de caso, pero en algunos casos también utilizamos los datos completos hasta el 2100. En este último caso, entre los escenarios previstos, hemos utilizado el Escenario Compartido de Vías Socioeconómicas 245 (SSP2-4.5, [20]).

También se han recuperado y analizado las series temporales $[\text{CO}_2]$ utilizadas en los modelos climáticos para el escenario SSP2-4.5. No obstante, hay que señalar que estas series temporales se ofrecen en una escala temporal anual, a diferencia de todos los demás datos que se facilitan en una escala mensual.

Para comprobar si los resultados de nuestra metodología cambiarían si eligiéramos algún miembro concreto del conjunto en lugar de la media, también recuperamos los resultados de un único modelo, a saber, el Modelo del Sistema Terrestre del Reino Unido (UKESM1 [21]). En aras de la brevedad de este documento, presentamos este último análisis (cuyos resultados finalmente no difieren de los de la media CMIP6) en el documento: Información complementaria (y, por tanto, no lo enumeramos en la tabla 1). Los principales estudios de caso en los que se utilizaron estos datos se resumen en la tabla 1, junto con los índices resumidos de g_j que están relacionados con la causalidad potencial. Los detalles de los estudios de caso se ofrecen en las secciones siguientes. En todos ellos, empezamos suponiendo un modelo causal potencialmente el-huevo-o-la-gallina con un número fijo de ponderaciones g_j , a saber, 41 (es decir, $J = 20$, como en [7]).

También se han realizado otros estudios de caso que examinan conjuntos de datos adicionales, pero se mantienen fuera del cuerpo del documento y figuran en los apéndices A.2-A.4. Todos los datos utilizados están disponibles de forma gratuita en Internet y los enlaces correspondientes figuran en la sección «Disponibilidad de los datos».

4. Investigar el lapso de tiempo máximo que permiten los datos modernos

La serie temporal más larga de mediciones sistemáticas de $[\text{CO}_2]$ es la de Mauna Loa, que comenzó en 1958. La temperatura global a 2 m de la serie de reanálisis NCEP/NCAR se remonta a 1948 y permite, por tanto, estudiar la relación T - $[\text{CO}_2]$ para el periodo 1958-2022 (dos décadas adicionales de datos respecto a los estudiados en [7]).

Como se ve en la tabla 1, esto proporcionó mejores características que el caso UAH/Mauna Loa examinado en [7]: correlación cruzada máxima $r_{yx}(h_c) = 0.56$ frente a 0.48; varianza explicada $e = 34\%$ frente a 31%, con desfases temporales mayores o iguales que los de [7] (cerca de 8 meses). Como se ve en la figura 2, de nuevo, tenemos un sistema potencialmente causal con la direccionalidad siendo $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$, mientras que la posible causalidad $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$ puede excluirse por no satisfacer la condición necesaria de precedencia temporal.

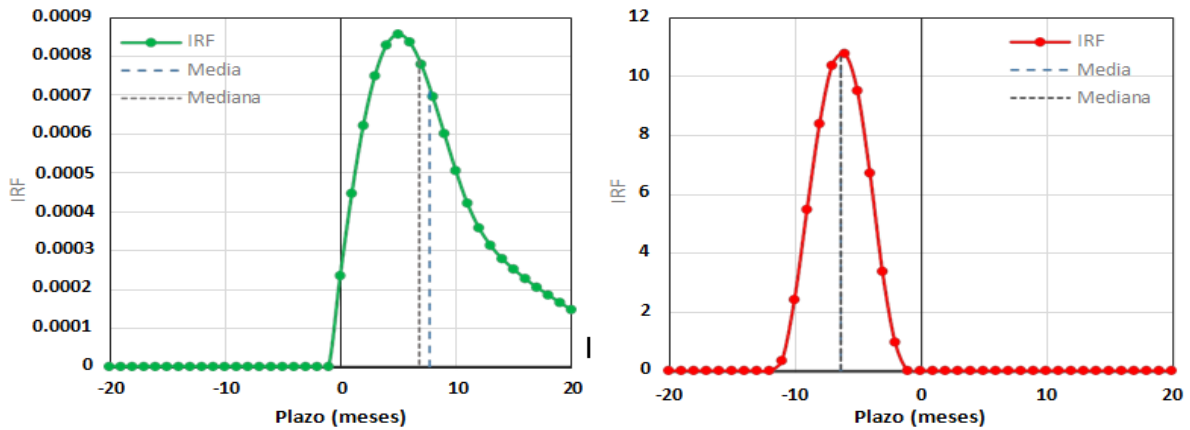


Figura 2. IRF para la concentración de temperatura-CO₂ basadas en las series temporales de temperatura a 2 m y Mauna Loa [CO₂] del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente; estudios de caso #3 (**izquierda**; $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$; sistema potencialmente causal) y #4 (**derecha**; $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$; sistema potencialmente anticausal).

5. Investigar el posible efecto de la estacionalidad

Para enriquecer nuestros resultados y comprobar también si la estacionalidad, reflejada en las diferentes fases de las series temporales de [CO₂] en distintas latitudes, podría modificar o posiblemente invertir la relación de causalidad detectada, hemos realizado un análisis adicional con las mediciones de [CO₂] del Polo Sur, que comenzaron en 1975.

Como se observa en la tabla 1, esto volvió a proporcionar mejores características que el caso UAH/Mauna Loa examinado en [7] en términos de varianza explicada ($e = 35\%$ frente a 31%) y desfases temporales superiores a los de [7] (cerca de los 10 meses). Como se ve en la figura 3, de nuevo tenemos un sistema potencialmente causal con la direccionalidad siendo $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$, mientras que de nuevo la posible causalidad $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$ puede excluirse por no satisfacer la condición necesaria de precedencia temporal.

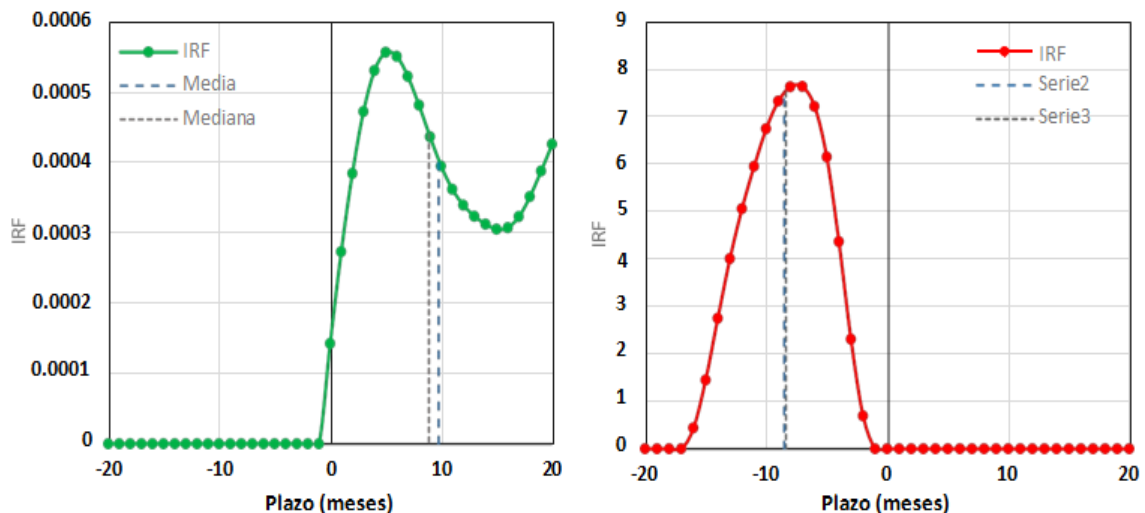


Figura 3. IRF para la concentración de temperatura-CO₂ basada en las series temporales de temperatura a 2 m y del Polo Sur del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente; estudios de caso #14 (**izquierda**; $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$; sistema potencialmente causal) y #15 (**derecha**; $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$; sistema potencialmente anticausal).

Resumiendo los dos estudios de caso de las secciones 4 y 5 –y de forma similar a lo que encontramos en [7]– observamos que:

- El sistema T -[CO₂] parece ser potencialmente causal (unidireccional) en la dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$, en lugar del causal el-huevo-o-la-gallina.
- Todos los desfases temporales característicos ($h_c, \mu_h, h_{1/2}$) son positivos en la dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ (que oscila entre unos 7 y unos 10 meses), y negativa en la dirección $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$.
- La proporción de varianza explicada es mayor en la dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ (alrededor de 1/3) que en la dirección $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$ (alrededor de 1/5).

6. Sobre el plazo de validez de los resultados

En general, los resultados de este artículo son los que permiten los datos disponibles en los periodos y escalas temporales resueltos por dichos datos (más de seis décadas a escala mensual). No podemos saber qué ocurriría en otros momentos o si los conjuntos de datos fueran más largos y resolvieran escalas temporales intermedias o incluso más largas. El sistema climático es demasiado complejo para permitir generalizaciones precipitadas.

No se puede excluir el caso de que la escala temporal del análisis sea importante en una relación de causalidad potencial detectada y que esta última cambie si cambia la escala temporal. Esto plantea la siguiente pregunta: ¿hasta qué escala temporal se mantiene la validez de determinados resultados? Ciertamente, esta escala temporal es una fracción (no superior a 1/2) de la longitud de la serie temporal. Se puede obtener una indicación examinando la función de covarianza cruzada empírica y comparándola con la teórica. Como se muestra en [6], esta última ($c_{yx}(h) := h \text{ i cov} [\underline{y}(t+h), \underline{x}(t)]$) para el retardo h , está relacionada con la función de autocovarianza de \underline{x} , $c_{xx}(h) := \text{cov}[\underline{x}(t+h), \underline{x}(t)]$, mediante:

$$c_{yx}(h) = \int_{-\infty}^{\infty} g(a)c_{xx}(h-a)da \quad (7)$$

Así, $c_{yx}(h)$ puede estimarse a partir de la IRF y la $c_{xx}(h)$ empírica a partir de los datos. La figura 4 muestra las funciones de autocorrelación y correlación cruzada (que son covarianzas normalizadas por desviaciones estándar). Para el caso $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ (es decir, el caso de estudio n° 3; paneles superiores de la figura 4), la función de correlación cruzada reconstruida, calculada a partir de la IRF (vista en la figura 2) y la función de autocorrelación empírica de la temperatura (vista en el panel superior izquierdo de la figura 4) utilizando la versión discretizada de la ecuación (7), concuerda bien con la función empírica para desfases temporales de hasta ± 10 años, es decir, que abarcan 20 años (1/3 de la longitud de la serie). Como el desfase temporal tiene una relación de equivalencia con la escala temporal [22], podemos concluir que la posible relación de causalidad detectada es válida para escalas temporales de dos décadas. A modo de comparación, los paneles inferiores de la figura 4 muestran el caso inverso, $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$, (estudio de caso n° 4), en el que ya no existe una buena concordancia entre la correlación cruzada empírica y la reconstruida, lo que proporciona un apoyo adicional a la afirmación de que la verdadera relación de causalidad es $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$.

Una última observación en la figura 4 es la aparición de seis picos en 20 años, lo que puede interpretarse como indicativo de un comportamiento cuasi periódico con un periodo medio de 3.33 años, es decir, muy distinto del anual. Sin embargo, esto no refleja periodicidad sino antipersistencia impuesta por la operación de diferenciación, que necesariamente da lugar a algunas autocorrelaciones negativas [23].

Una técnica más directa para tratar las escalas temporales consiste en promediar las series temporales en escalas temporales agregadas y volver a investigar las relaciones de causalidad en

estas escalas. Esta técnica podría detectar si se mantiene una relación similar para las escalas temporales mayores. En nuestro caso, puesto que estamos diferenciando el proceso, tomar la media en una escala temporal k es equivalente a tomar una diferencia para un paso temporal k (obsérvese que $(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + \dots + (x_{k+1} - x_k) = x_{k+1} - x_1$). Por lo tanto, para aumentar las escalas temporales basta con aumentar el paso temporal de la diferenciación. En la figura 2, era de 1 año. Ahora aumentamos el paso temporal de la diferenciación, sustituyendo el paso de 1 año por 2, 4, 8 y 16 años. Los resultados se muestran en la figura 5 y en la tabla 1 (estudios de caso n° 5 a 13). Son esencialmente los mismos, salvo que, a medida que aumenta el paso temporal de diferenciación, la varianza explicada disminuye ligeramente (de 0.34 a 0.27) en la dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ y vuelve a ser mucho mayor que en la dirección $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$. Los desfases aumentan en el primer sentido y vuelven a ser negativos en el segundo.

Un patrón característico es que, a medida que aumenta el paso de tiempo, también lo hace la ordenada más a la derecha del IRF, g_{20} . Este comportamiento, es decir, la extremidad creciente de g_j más allá de cierto desfase temporal, se ha explicado en [7] y es un artefacto de una ventana insuficiente (pequeña) de desfase temporal para determinar la IRF. Por lo tanto, sugiere que debería utilizarse un J más alto. Es bastante razonable esperar que si el paso de tiempo de diferenciación aumenta, también debería hacerlo el tamaño de la ventana. En particular, es interesante observar que en el panel inferior de la figura 5, correspondiente a un paso temporal de diferenciación de 16 años, mientras que la ventana temporal de la IRF es de solo 40 meses (algo más de 3 años), la IRF es una función monótonamente creciente. Al parecer, se trata de un artefacto debido a la ventana temporal de desfase demasiado pequeña. En tal caso, también es razonable esperar algunas estimaciones no negativas de las ordenadas de la IRF para rezagos negativos, incluso si el sistema es unidireccionalmente causal. De hecho, esto ha aparecido en el caso de un paso temporal de diferenciación de 16 años, aunque el panel inferior de la figura 5 muestra la versión puramente unidireccional de la IRF. Esto puede crear cierta ambigüedad en la identificación de la causalidad, que analizamos y resolvemos en la siguiente sección.

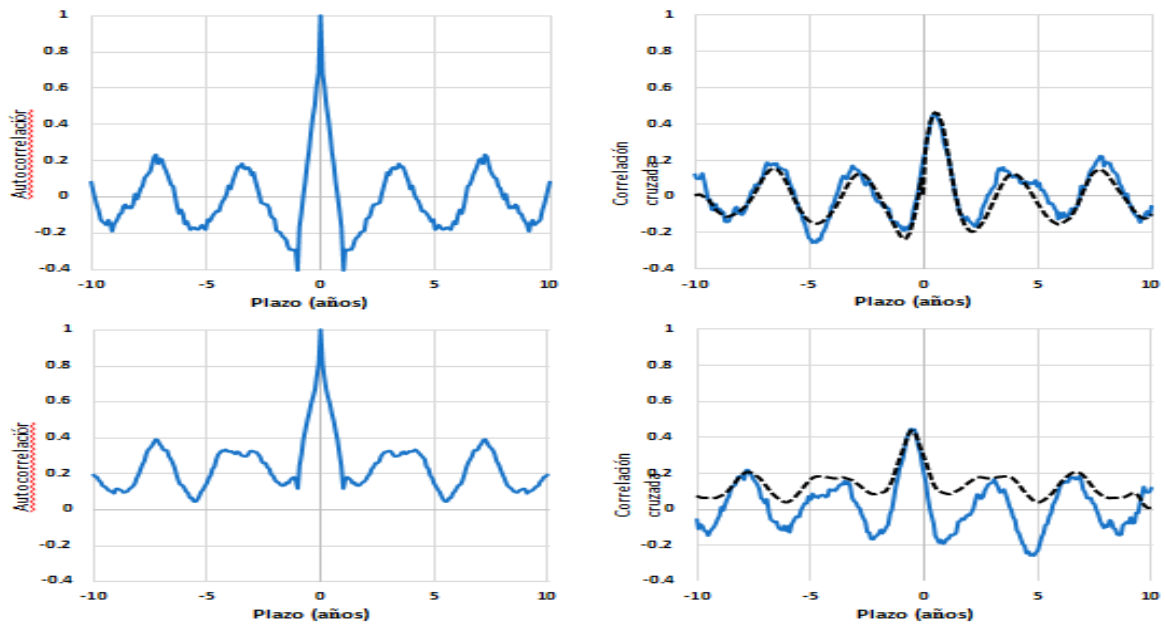


Figura 4. (Columna izquierda) Función de autocorrelación empírica para el periodo 1958-2021 y para la escala temporal mensual de (arriba) la serie temporal NCEP/NCAR ΔT y (abajo) la serie temporal $\Delta \ln[\text{CO}_2]$ para Mauna Loa. (Columna derecha) Función de correlación cruzada empírica de las dos series temporales (líneas continuas en azul), comparadas con las reconstruidas a partir de la IRF y la función de autocorrelación del panel izquierdo utilizando la versión discretizada de la ecuación (7) (línea discontinua), para los casos de estudio (**superior**) #3 e (**inferior**) #4.

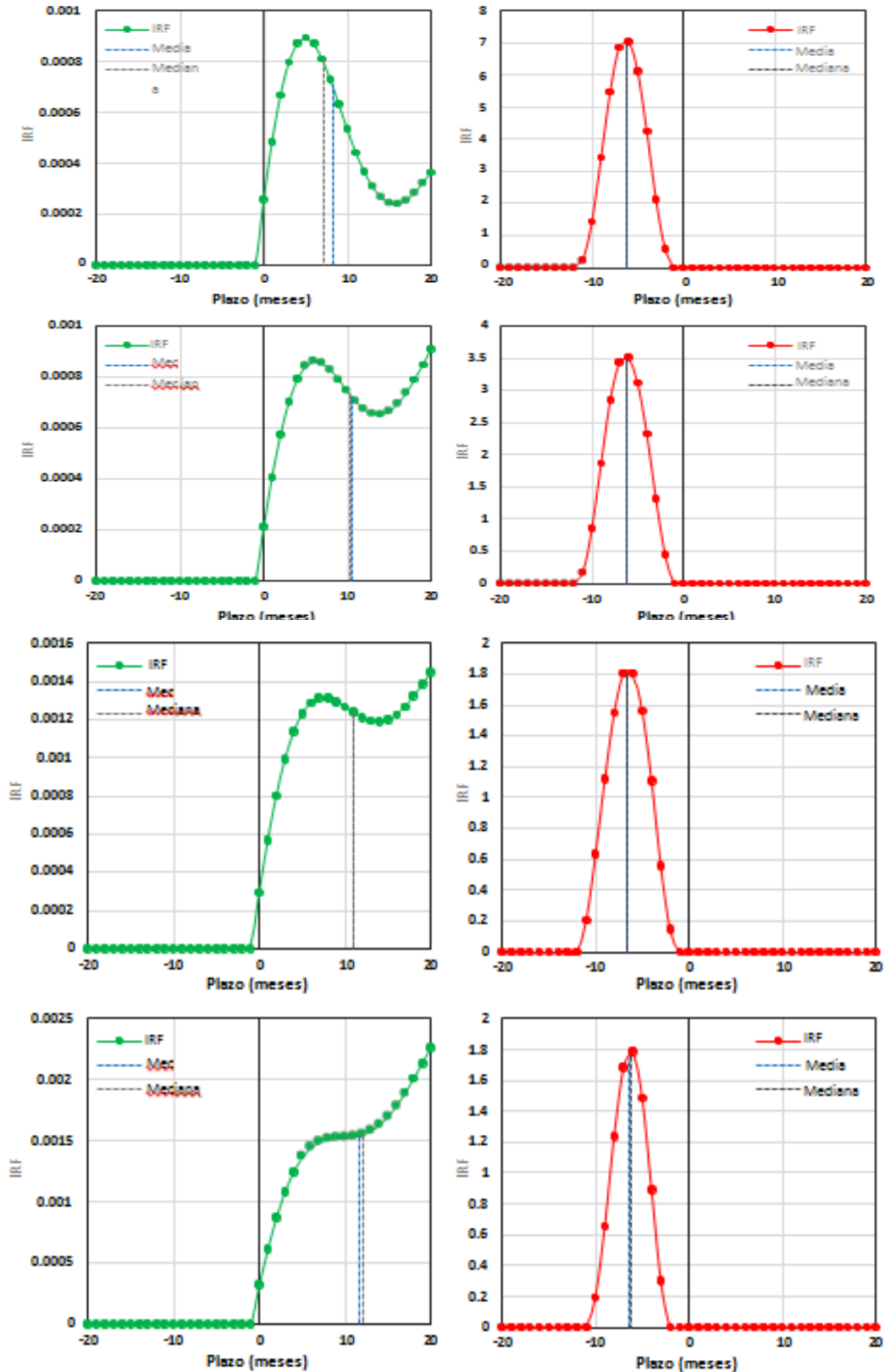


Figura 5. IRF para la concentración de temperatura- CO_2 basada en las series temporales de temperatura a 2 m y Mauna Loa del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente, como en la figura 2, pero para pasos temporales de diferenciación iguales (de superior a inferior) a 2, 4, 8 y 16 años; **izquierda:** $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ (sistema potencialmente causal); **derecha:** $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$ (sistema potencialmente anticausal).

7. Posibles ambigüedades y desambiguación

En algunas aplicaciones, la detección del tipo de causalidad, unidireccional o del tipo huevo-o-la gallina, es directa, pero en otros casos puede resultar más difícil. Esto se ilustra en la figura 6. El panel de la izquierda es equivalente al de la figura 2 (izquierda) pero sin despreciar algunas ordenadas g_j muy pequeñas que originalmente el algoritmo producía para j negativo. El panel de la derecha es equivalente al de la figura 5 (abajo a la izquierda), pero dejando que el algoritmo de optimización produzca g_j para j negativo, que en este caso concreto no parece despreciable. Ambos paneles de la figura se refieren a los mismos procesos con el paso temporal de diferenciación de 1 y 16 años para los paneles izquierdo y derecho, respectivamente. Para el paso de 16 años, en comparación con la IRF de la figura 5, que explica una fracción de 0.31 de la varianza, el de la figura 6 arroja una varianza explicada ligeramente superior, 0.325, mientras que tiene algunos pesos pequeños en los retardos negativos. ¿Debemos concluir entonces que indica una posible causalidad del tipo huevo-o-la-gallina, en lugar de unidireccional? Incluso si nuestra respuesta es afirmativa, es importante señalar que los rezagos característicos son de nuevo positivos, lo que sugiere una dirección principal $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$.

Sin embargo, la respuesta no es necesariamente afirmativa. La varianza explicada de 0.31 se asocia a 21 ordenadas IRF, mientras que la de 0.325 se asocia a 41 ordenadas IRF. ¿Es razonable aceptar 20 parámetros adicionales para un aumento de la varianza explicada de 0.015?

Podría decirse que en este caso es más razonable cambiar de una ventana simétrica a una no simétrica de desfase temporal. Por lo tanto, utilizamos una ventana de longitud 21 y la deslizamos de modo que el desfase temporal más bajo distinto de cero varíe de -20 a 0. Solo el caso en que es 0 denota una causalidad unidireccional potencial, mientras que los otros 20 casos corresponden a una causalidad del tipo huevo-o-la-gallina potencial. Los IRF resultantes se representan en la figura 7, mientras que la fracción de varianza explicada se representa en la figura 8 en función del desfase temporal más bajo distinto de cero. Puede observarse que la curva para el menor desfase temporal 0 es diferente de la de la figura 5 (abajo a la izquierda). En particular, la ordenada en 0 es mayor en la figura 7, lo que produce una forma cóncava de IFR. Esto se debe al hecho de que la longitud de la ventana es fija, mientras que la ordenada más baja ya no contribuye a la rugosidad (no se puede determinar una segunda derivada para el punto más bajo y, por tanto, el algoritmo puede aumentar la ordenada en 0 sin coste alguno). A su vez, la varianza explicada aumenta hasta 0.327.

Claramente, el resultado de esta investigación es una causalidad potencial unidireccional, en lugar de el-huevo-o-la-gallina, pues la varianza explicada alcanza su máximo cuando la j más baja es 0.

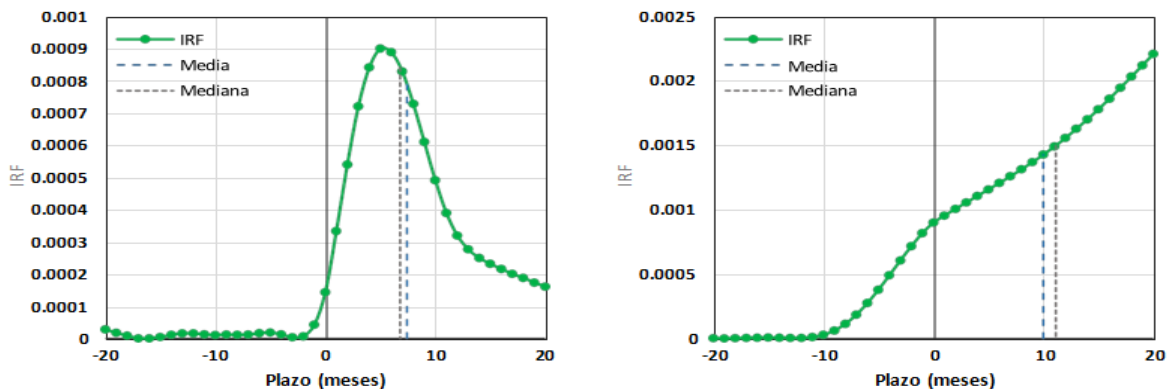


Figura 6. IRF para la concentración de temperatura-CO₂ basadas en las series temporales de temperatura a 2 m y Mauna Loa del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente, permitiendo también rezagos negativos

(el-huevo-o-la-gallina) para la dirección de causalidad $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ y para un paso de tiempo de diferenciación de 1 año (**izquierda**, correspondiente a la figura 2, izquierda) y 16 años (**derecha**, correspondiente a la figura 5, abajo a la izquierda).

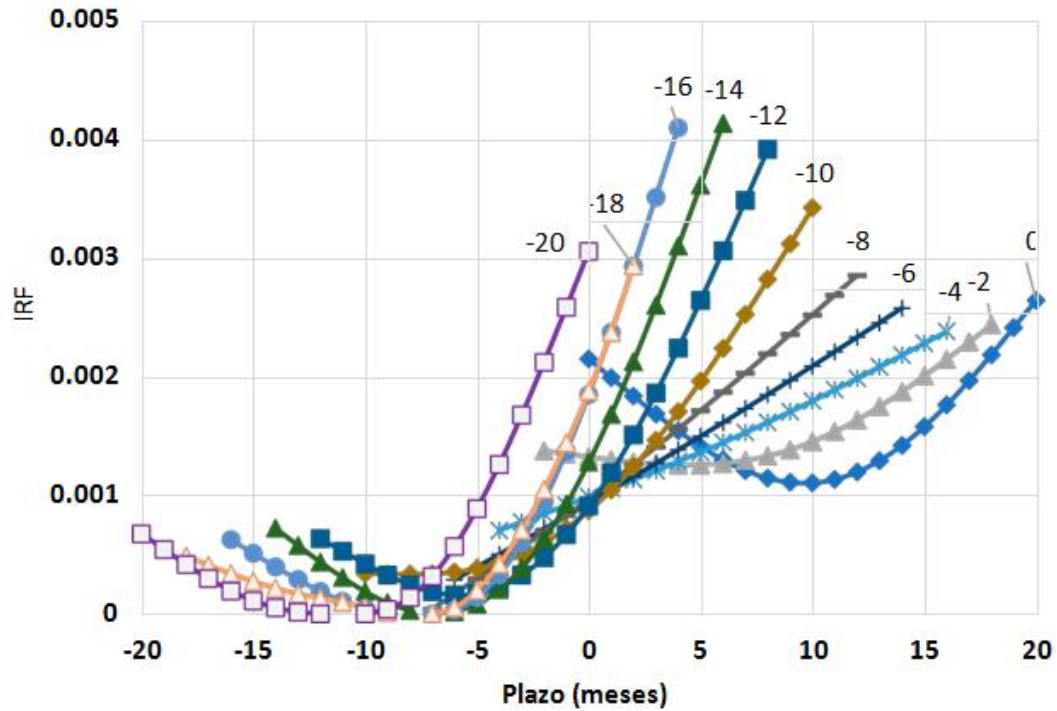


Figura 7. IRF para la concentración de temperatura-CO₂ basadas en las series temporales de temperatura a 2 m y Mauna Loa del reanálisis NCEP/NCAR, para 21 retardos temporales, paso temporal de diferenciación de 16 años y dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$. El menor retardo distinto de cero de cada IRF está marcado en el extremo superior derecho de su curva.

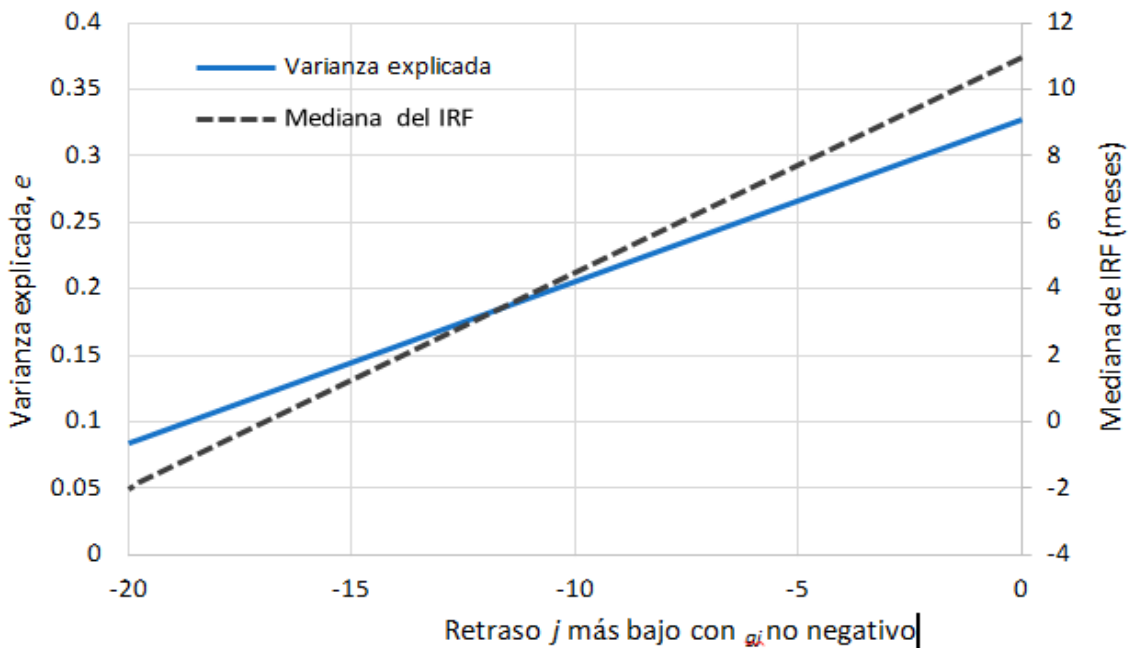


Figura 8. Varianza explicada y mediana de la IRF en función del menor desfase distinto de cero de las IRF de la figura 7 para la investigación de la sección 7.

8. Comparación de los datos de observación con los resultados de los modelos

La investigación de la causalidad en sistemas que pueden aislarse del entorno se basa generalmente en experimentos. Estos suelen realizarse en laboratorios y presuponen acciones de control (intervención) por parte del experimentador. En ausencia de tal intervención, hace tiempo que se considera que no podemos decir qué causa qué (Strotz y Wold, 1960 [24]). En los sistemas complejos, como el sistema climático de la Tierra, la experimentación es imposible. Sin embargo, está muy extendida la creencia de que los modelos climáticos son representaciones fieles del sistema climático y, por tanto, ofrecen la posibilidad de la llamada experimentación *in silico* (Hannart *et al.* [25]). Además, se ha afirmado (Hannart y Naveau [26]) que «la experimentación *in silico* [es] la única opción» y que «el creciente realismo de los modelos del sistema climático hace plausible este enfoque *in silico*». Tales afirmaciones son epistemológicamente problemáticas. Una «causalidad» hipotética incorporada a cualquier modelo, en particular de un sistema complejo, no es necesariamente idéntica a la causalidad natural. Además, se ha cuestionado la concordancia de los resultados de los modelos climáticos con la realidad (por ejemplo, [27-31]).

Nuestra metodología puede ayudar a resolver este problema epistemológico de dos maneras. En primer lugar, proporciona una opción diferente para probar la causalidad, mostrando que la llamada experimentación *in silico* no es la única opción como se afirma. En segundo lugar, puede probar adicionalmente si existe realismo en la representación de la causalidad del sistema climático por parte de los modelos climáticos. Como ya se indicó en la Introducción, nuestra metodología, independientemente de la detección de causalidad *per se*, puede definir un tipo de análisis de datos que podría arrojar luz sobre el rendimiento de los modelos comparando los datos observacionales con los resultados de los modelos. Esto es especialmente útil en el caso de la modelización climática. En otras palabras, podría ayudar a verificar o falsificar la teoría comúnmente aceptada, que se incorpora a los modelos climáticos.

Concretamente, podemos comprobar si los resultados del modelo climático son coherentes con las conclusiones de nuestro análisis de causalidad T -[CO₂], que se basa en mediciones. Para ello, utilizamos los resultados de los modelos climáticos especificados en la sección 3, en los estudios de caso nº 16 a nº 23 detallados en la tabla 1. Los resultados numéricos de nuestro análisis se muestran en la tabla 1 y las representaciones gráficas de las IRF se muestran en la figura 9 para los casos en los que no se utiliza ninguna restricción de rugosidad y en la figura 10 para los casos en los que se utiliza la restricción de rugosidad.

Lamentablemente, y a diferencia de las series temporales de mediciones de [CO₂], que están disponibles a escala mensual, las series de datos de [CO₂] del SSP2 se proporcionan a escala anual. Por lo tanto, los estudios de caso nº 16 a nº 23 tuvieron que hacerse a escala anual. Si hiciéramos el análisis para el periodo 1958-2021, como en los estudios de caso nº 3 y 4 (temperatura del reanálisis NCEP/NCAR en 2 m, y series temporales de Mauna Loa [CO₂]), los datos anuales serían demasiado escasos para apoyar la estimación de las IRF (63 valores de datos para estimar 41 coeficientes). Por lo tanto, en los estudios de caso nº 16 a nº 23 ampliamos el periodo hasta 1850, que está cubierto por los resultados del modelo climático. Realizamos análisis separados para los periodos 1850-2100 (todo el periodo cubierto por los modelos climáticos) y 1850-2021 (solo el pasado).

Los resultados de estos estudios de caso nos permiten hacer las siguientes observaciones:

1. No hay diferencias esenciales entre los resultados de los periodos 1850-2100 y 1850-2021.
2. Aunque, como era de esperarse, las IRF difieren si se calculan con o sin rugosidad de restricción, los retardos característicos son similares en los dos casos (con la excepción de $h_{1/2}$ en los casos nº 17 y nº 21).

3. En todos los casos, los rezagos son negativos en la dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$ y positivos en la dirección $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$, lo que sugiere una causalidad el-huevo-o-la-gallina con dirección principal $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$.
4. Claramente, la conclusión del punto 3, derivada de los resultados de los modelos climáticos, es opuesta a los resultados encontrados cuando se utilizan mediciones reales (temperatura del NCEP/NCAR reanálisis y series temporales de Mauna Loa $[\text{CO}_2]$).
5. Curiosamente, mientras que la dirección principal sugerida por los modelos es $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$, la varianza explicada es impresionantemente baja (10-15%) en esta dirección e impresionantemente alta (llegando al 90%) en la dirección opuesta, $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$.

Se puede argumentar que el principal resultado de este análisis, es decir, el punto 4 anterior, puede verse afectado por la diferencia en los periodos de estudio, es decir, 1958-2021 para las mediciones reales y 1850-2021 para las salidas del modelo. Para examinar si el origen del comportamiento diferente es el periodo de tiempo o la dinámica del sistema (real frente a modelado), realizamos un análisis adicional, representado gráficamente en las figuras 11 y 12.

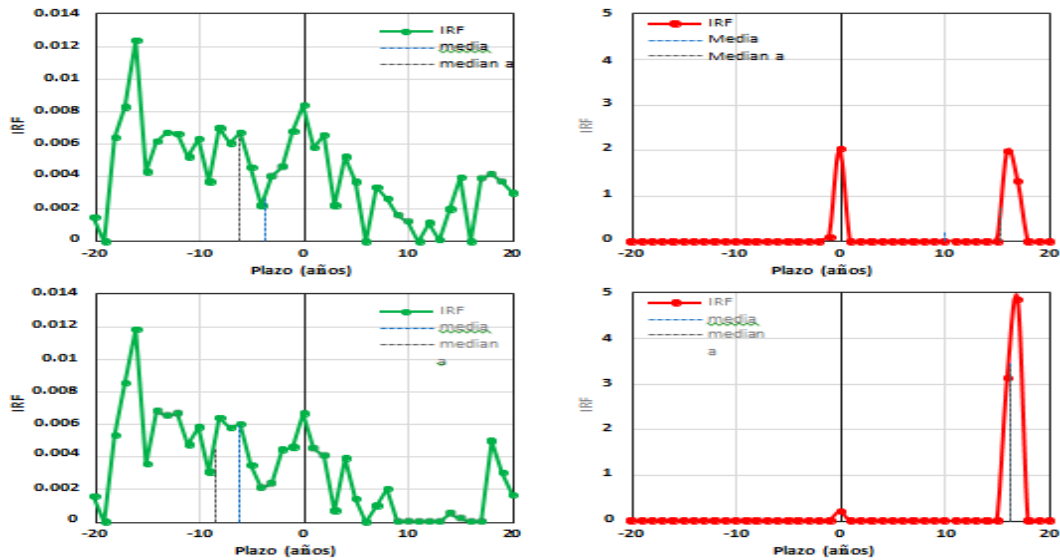


Figura 9. IRF para la concentración de temperatura- CO_2 basadas en las series temporales de temperatura media CMIP6 y SSP2-4.5 CO_2 , respectivamente, calculadas sin utilizar la restricción de rugosidad; **fila superior:** periodo 1850-2100-estudios de caso #16 (**izquierda;** $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$) y n° 17 (**derecha;** $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$); **fila inferior:** periodo 1850-2021, estudios de caso n° 18 (**izquierda;** $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$) y n° 19 (**derecha;** $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$).

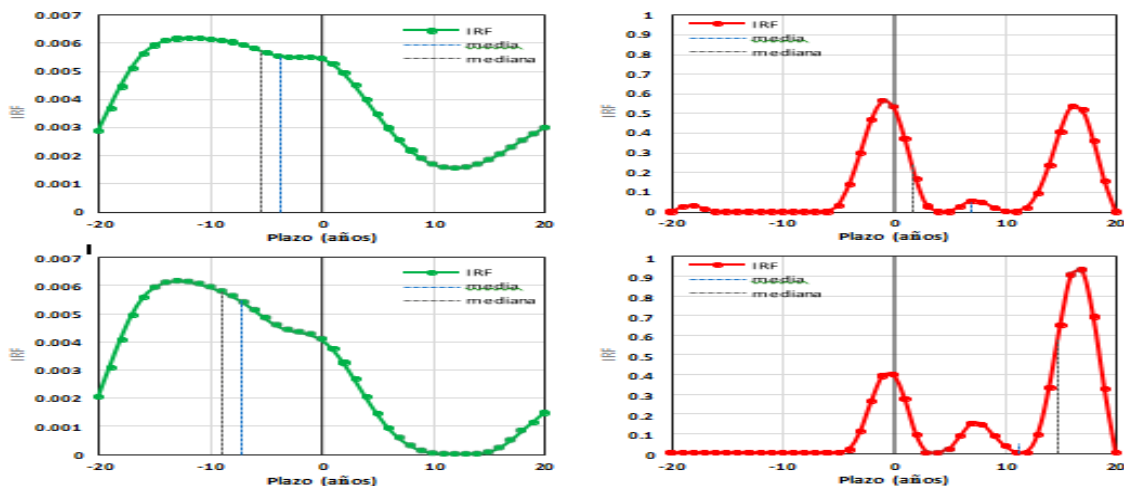


Figura 10. IRF para la concentración de temperatura- CO_2 basadas en las series temporales de temperatura media CMIP6 y SSP2-4.5 CO_2 , respectivamente, como en la figura 9, pero calculadas utilizando el concepto de rugosidad; **fila superior:** periodo 1850-2100-estudios de caso n° 20 (**izquierda;** $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$) y n° 21 (**derecha;** $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$); **fila inferior:** periodo 1850-2021-estudios de caso n° 22 (**izquierda;** $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$) y n° 23 (**derecha;** $\Delta \ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta T$).

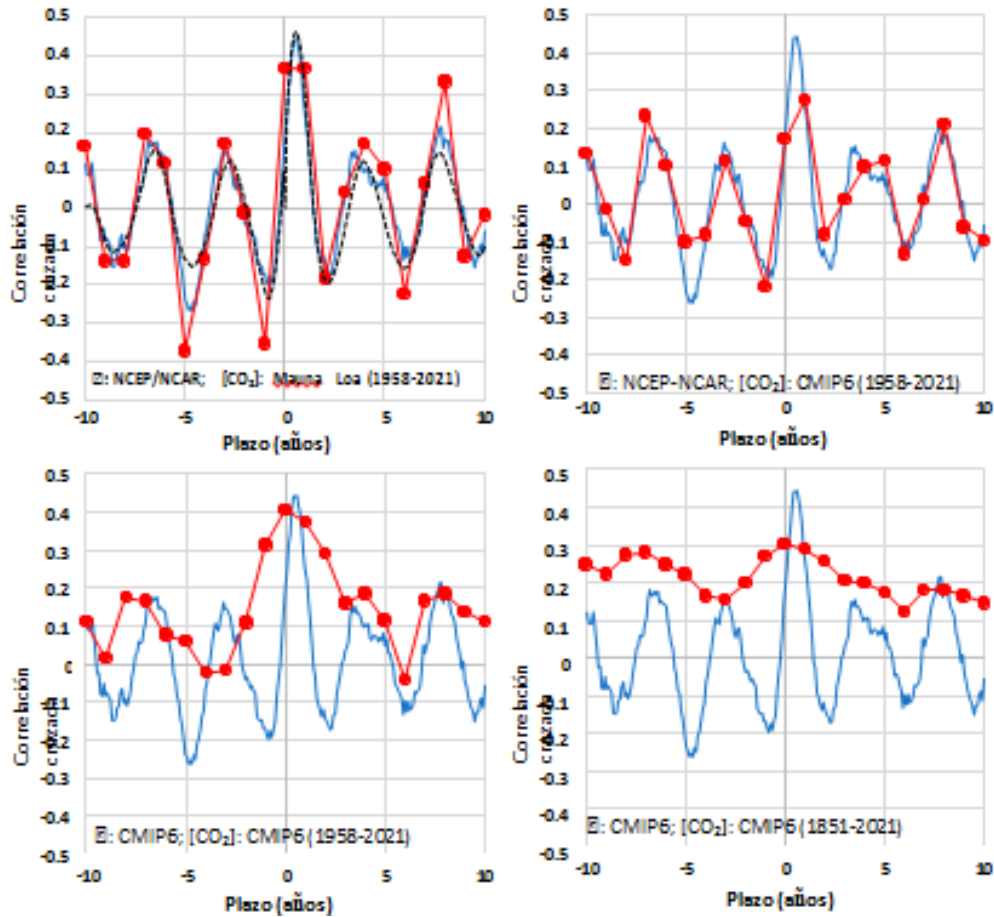


Figura 11. Funciones empíricas de correlación cruzada para escalas temporales mensuales y anuales (líneas continuas en azul sin marcas y líneas rojas con círculos, respectivamente) para los conjuntos de datos indicados en cada panel. En todos los paneles, el gráfico para la escala mensual es el de los datos NCEP/NCAR para T y los datos Mauna Loa para $[\text{CO}_2]$, para el periodo 1958-2021. El panel superior izquierdo muestra también la función de correlación cruzada reconstruida a partir del IRF y la función de autocorrelación utilizando la versión discretizada de la ecuación (7) (línea discontinua).

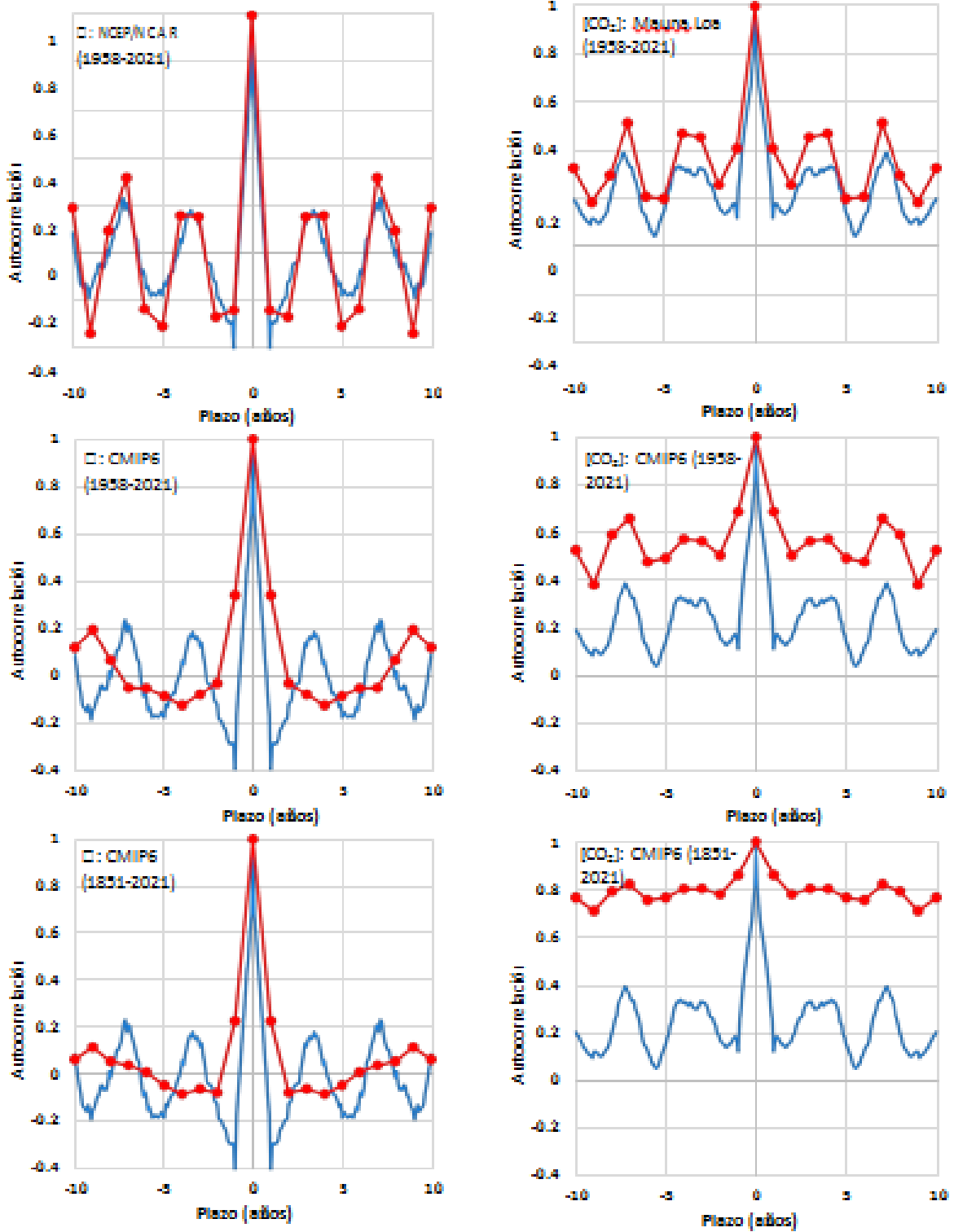


Figura 12. Funciones de autocorrelación empíricas para escalas temporales mensuales y anuales (líneas continuas en azul sin marcas y líneas rojas con círculos, respectivamente) para los conjuntos de datos indicados en cada panel. En todos los paneles, el gráfico para la escala mensual es el de los datos NCEP/NCAR para T y los datos Mauna Loa para $[\text{CO}_2]$, para el periodo 1958-2021.

El panel superior izquierdo de la figura 11 es similar al de la figura 4 (superior derecha), donde, además, hemos trazado la función de correlación cruzada empírica para los mismos datos, pero promediada a escala anual. Esto concuerda relativamente bien con la función empírica a escala mensual, lo que proporciona una base para las comparaciones que siguen.

La función empírica de correlación cruzada a escala mensual se copia en todos los demás paneles de la figura 11 y sirve de base para las comparaciones. En el panel superior derecho, en el que sustituimos la serie temporal de Mauna Loa para $[\text{CO}_2]$ por la serie temporal CMIP6 para el mismo periodo, 1958-2021, mientras mantenemos la serie temporal NCEP/NCAR para T , sigue habiendo concordancia de las correlaciones cruzadas anuales con las mensuales. Sin embargo, cuando también sustituimos la serie temporal NCEP/NCAR para T por la serie CMIP6 (gráfico inferior izquierdo), los dos gráficos se desacoplan. El desacoplamiento es aún más destacado si pasamos al periodo más largo 1850-2021 (panel inferior derecho).

Se pueden hacer observaciones similares sobre las autocorrelaciones en la figura 12. En particular, la autocorrelación de T del CMIP6 se desacopla de la real para los periodos 1958-2021 y 1850-2021, mientras que las dos últimas no difieren sustancialmente entre sí. Estas observaciones nos permiten afirmar que la principal causa de desacuerdo tiene que ver con problemas de modelización de la dinámica del sistema más que con el periodo de estudio.

9. Discusión y otros resultados

La hipótesis dominante de la dirección de causalidad $[\text{CO}_2] \rightarrow T$ constituye una narrativa convincente, ya que todo se achaca a una única causa, las emisiones humanas de CO_2 . De hecho, esta ha sido la narrativa popular durante décadas. Sin embargo, popularidad no significa necesariamente corrección, y aquí hemos proporcionado argumentos sólidos en contra de esta suposición. Dado que hemos identificado la temperatura atmosférica como la causa y la concentración atmosférica de CO_2 como el efecto, uno puede sentirse tentado a plantearse la pregunta: ¿Cuál es la causa del aumento moderno de la temperatura? Aparentemente, esta pregunta es mucho más difícil de responder, ya que no podemos atribuirlo todo a un único agente.

No pretendemos tener la respuesta a esta pregunta, cuyo estudio va mucho más allá del alcance del artículo. Tampoco creemos que la teoría climática dominante, centrada en las emisiones humanas de CO_2 como causa principal y que considera todo lo demás como retroalimentación de la única causa principal, pueda explicar lo ocurrido en la Tierra durante 4,500 millones de años de cambios climáticos.

No obstante, como producto secundario, en los apéndices del documento ofrecemos varias indicaciones al respecto:

1. La dependencia del ciclo del carbono con respecto a la temperatura es bastante fuerte y, de hecho, pueden producirse aumentos importantes de $[\text{CO}_2]$ como consecuencia del aumento de la temperatura. En otras palabras, demostramos que los cambios naturales de $[\text{CO}_2]$ debidos al aumento de la temperatura son mucho mayores (por un factor > 3) que las emisiones humanas (apéndice A.1).
2. Hay procesos, como el albedo de la Tierra (que está cambiando en el tiempo como cualquier otra característica del sistema climático), El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y el contenido de calor del océano en la capa superior (representado por la temperatura media vertical en la capa 0-100 m), que son causas potenciales del aumento de la temperatura, a diferencia de lo que se observa con $[\text{CO}_2]$, sus cambios preceden a los de la temperatura (apéndices A.2-A.4).

3. A gran escala temporal, el análisis de los datos paleoclimáticos apoya la primacía de la dirección causal $T \rightarrow [\text{CO}_2]$, aunque sigue habiendo cierta controversia sobre esta cuestión (apéndice A.5).

En el ciclo del carbono (punto 1 anterior) intervienen varios procesos físicos, químicos, bioquímicos y humanos. Las emisiones humanas de CO_2 debidas a la quema de combustibles fósiles han aumentado en gran medida desde el inicio de la era industrial. Sin embargo, el aumento de la temperatura global comenzó tras el Pequeño Periodo Glacial, en una época en la que las emisiones humanas de CO_2 eran muy bajas. Para arrojar luz sobre el problema, examinamos más a fondo la cuestión de las emisiones de CO_2 frente a la temperatura atmosférica en la «Información complementaria», donde aportamos pruebas de que no están correlacionadas entre sí. La desgasificación procedente del mar también se destaca a veces en la bibliografía entre los mecanismos relacionados con el clima. Por otra parte, se suele minimizar el papel de la biósfera y de las reacciones bioquímicas, además de la existencia de interacciones y retroalimentaciones complejas. Este papel puede resumirse en los siguientes puntos, examinados en detalle y cuantificados en el apéndice A.1.

- La respiración y la descomposición terrestre y marítima son responsables de la gran mayoría de las emisiones de CO_2 [32], figura 5.12.
- En conjunto, los procesos naturales de la biósfera contribuyen en un 96% al ciclo global del carbono, siendo el resto, un 4%, emisiones humanas (que eran incluso menores en el pasado [33]).
- La biósfera es más productiva a temperaturas más elevadas, ya que las tasas de reacciones bioquímicas aumentan con la temperatura, lo que conduce a un aumento de la emisión natural de CO_2 [2].
- Además, una mayor concentración atmosférica de CO_2 hace que la biósfera sea más productiva a través del denominado efecto de fertilización del carbono, lo que se traduce en un reverdecimiento de la Tierra [34,35], es decir, en una amplificación del ciclo del carbono, al que también contribuye el ser humano a través de los cultivos y la gestión del uso del suelo [36].

Además de la biósfera, existen otros factores que impulsan el clima de la Tierra de forma periódica y no periódica. Los parámetros orbitales de la revolución terrestre cambian de forma casi cíclica a escala multimilenaria (variaciones en la excentricidad, la inclinación axial y la precesión de la órbita terrestre), según la interpretación de Milankovic' [37-41], y los cambios en la geometría de la órbita influyen en la cantidad de insolación. Entre los impulsores no periódicos de la variabilidad climática de la Tierra se encuentran las erupciones volcánicas y las colisiones con grandes objetos extraterrestres, como los asteroides. Un factor climático importante es el agua en sus tres fases [33]. Otro factor evidente es la actividad solar (incluidos los ciclos solares) y la (in)estabilidad de la radiación solar en la Tierra (por ejemplo, los cambios en el albedo; véanse [33] y el apéndice A.2). En particular, un estudio reciente [42], mediante la evaluación de 20 años de observaciones directas de la inestabilidad energética desde satélites en órbita terrestre, demostró que los cambios globales observados proceden en gran medida de reducciones en la cantidad de luz solar dispersada por la atmósfera terrestre.

El ENSO y el calentamiento oceánico, que afectan la temperatura, se analizan en los apéndices A.3 y A.4, respectivamente. Los resultados de los apéndices A.2-A.4 se resumen en el esquema de la figura 13. Los cambios en los tres procesos examinados, albedo, ENSO y calor oceánico superior, preceden en el tiempo a los cambios en la temperatura y aún más a los de $[\text{CO}_2]$. En general, los desfases temporales mostrados en la figura 13 completan una imagen coherente de los posibles vínculos de causalidad entre los procesos climáticos y confirman siempre la dirección $T \rightarrow [\text{CO}_2]$.

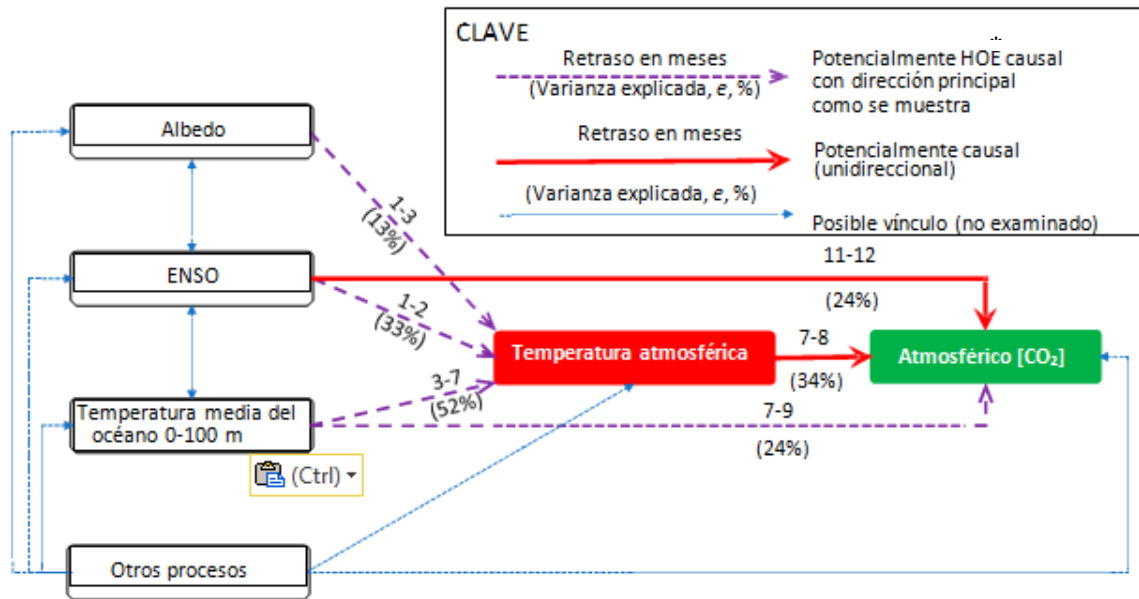


Figura 13. Esquema de los posibles vínculos causales examinados en el sistema climático, con los tipos señalados de causalidad potencial, huevo-o-la-gallina o unidireccional, y su dirección. Otros procesos, no examinados aquí, podrían ser internos del sistema climático o externos.

N.de la T.: HOE: abreviación de frase inglesa *hen or egg* (el huevo o la gallina)

Los procesos examinados en los apéndices son internos al sistema climático. Otros procesos que afectan a T , no examinados aquí, también podrían ser externos (por ejemplo, solares y astronómicos [43,44] y geológicos [45-49]). Por lo general, en los sistemas complejos, un nexo causal identificado, aunque dé alguna explicación de un fenómeno, plantea preguntas adicionales, por ejemplo, qué provocó el cambio en la causa identificada, etc. A su vez, los vínculos causales en los sistemas complejos pueden formar secuencias interminables. Por esta razón, es ingenuo esperar respuestas completas a los problemas relacionados con los sistemas complejos o suponer que un sistema complejo está en equilibrio permanente y que se necesita un agente externo para «sacarlo» del equilibrio y producir un cambio. Sin embargo, la investigación de un único vínculo causal entre dos procesos, como es el objeto de este documento, proporciona información útil, con posibles implicaciones científicas, técnicas, prácticas, epistemológicas y filosóficas significativas. Estas no se abordan en el presente documento. Los lectores interesados en los aspectos epistemológicos y filosóficos de la causalidad se remiten a Koutsoyiannis *et al.* [6], mientras que los interesados en los cambios perennes de los sistemas complejos se remiten a Koutsoyiannis [50,51].

Como ya se ha aclarado, el alcance de nuestro trabajo no es proporcionar una modelización detallada de los procesos estudiados, sino comprobar las condiciones de causalidad. Destacamos el hecho de que la relación que establecimos solo explica aproximadamente 1/3 de la varianza real de $\Delta \ln[\text{CO}_2]$. Esto no es despreciable para investigar la causalidad, pero también deja un margen para que actúen muchos otros factores climáticos.

No obstante, nuestros resultados pueden mejorarse sin duda si cambiamos nuestro alcance a un modelado más detallado. Para ilustrar esto, proporcionamos el siguiente modelo de juguete. Basándonos en nuestro resultado de que el sistema T -[CO₂] es potencialmente causal con dirección $\Delta T \rightarrow \Delta \ln[\text{CO}_2]$, estimamos $\Delta \ln[\text{CO}_2]$ como

$$\Delta \ln[\text{CO}_2] = \sum_{j=0}^{20} g_j \Delta T_{\tau-j} + \mu_v \quad (8)$$

y avanzamos un paso más, suponiendo que la media μ_v también depende de la temperatura pasada, promediada a escala temporal m , es decir,

$$\mu_v = \alpha(T_m - T_0) \quad (9)$$

donde T_m es la temperatura media de los m años anteriores, y α y T_0 son constantes (parámetros). Esta sencilla relación lineal se ve corroborada por los puntos anteriores relacionados con la productividad de la biósfera. La ecuación (9) dará como resultado valores negativos μ_v si $T_m < T_0$ y positivos en caso contrario.

Al reevaluar las coordenadas de la IRF g_j simultáneamente con los parámetros de la ecuación (9), encontramos la versión modificada de la IRF representada en la figura 14. Los parámetros adicionales optimizados son $m = 4$ (años), $\alpha = 0,0034$, $T_0 = 285,84$ K. De forma similar a [6], utilizamos una hoja de cálculo común para realizar la optimización, añadiendo los dos parámetros α y T_0 a las coordenadas desconocidas g_j de la IRF y realizando la optimización (no lineal) para todas las incógnitas (m se encontró por ensayo y error). En la figura 15 se ofrece una comparación gráfica de los valores reales $\Delta \ln[\text{CO}_2]$ y $[\text{CO}_2]$ con los simulados por el modelo de las ecuaciones (8) y (9). La varianza explicada para $\Delta \ln[\text{CO}_2]$ aumentó drásticamente del 34% al 55.5% y la de $[\text{CO}_2]$ es de un impresionante 99.9%.

Para comodidad de los lectores interesados en repetir los cálculos, damos también una expresión paramétrica de la IRF y resumimos el modelo de juguete como:

$$\Delta \ln[\text{CO}_2] = \sum_{j=0}^{20} g_j \Delta T_{\tau-j} + \mu_v, \quad (10)$$

$$g_j = 0.00076 j^{0.67} e^{-0.2j} / \text{K}, \mu_v = 0.0034 (T_4 / \text{K} - 285.84)$$

(donde K es la unidad de kelvin).

Subrayamos, sin embargo, que no explotamos el impresionante resultado de la varianza explicada del 99.9% para afirmar que hemos construido un modelo decente, aunque este modelo de juguete es a la vez preciso (en el panel inferior de la figura 15, la curva simulada es indistinguible de la real) y parsimonioso (la expresión del modelo en (10) contiene solo 5 parámetros ajustados). Preferimos destacar el hecho de que el sistema climático, enormemente complejo, conlleva una gran incertidumbre, y su estudio necesita datos fiables que sirvan de base para la modelización y la comprobación de hipótesis.

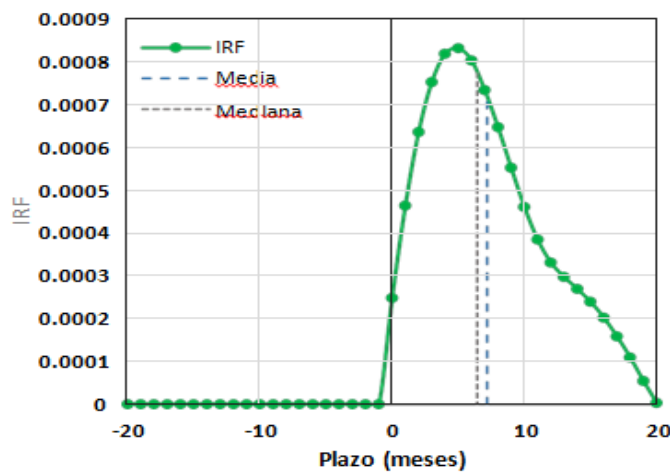


Figura 14. IRF modificada para la concentración de temperatura-CO₂ basada en las series temporales de temperatura a 2 m y Mauna Loa del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente, similar a la figura 2, pero con las coordenadas de la IRF optimizadas simultáneamente con los parámetros de la ecuación (9).

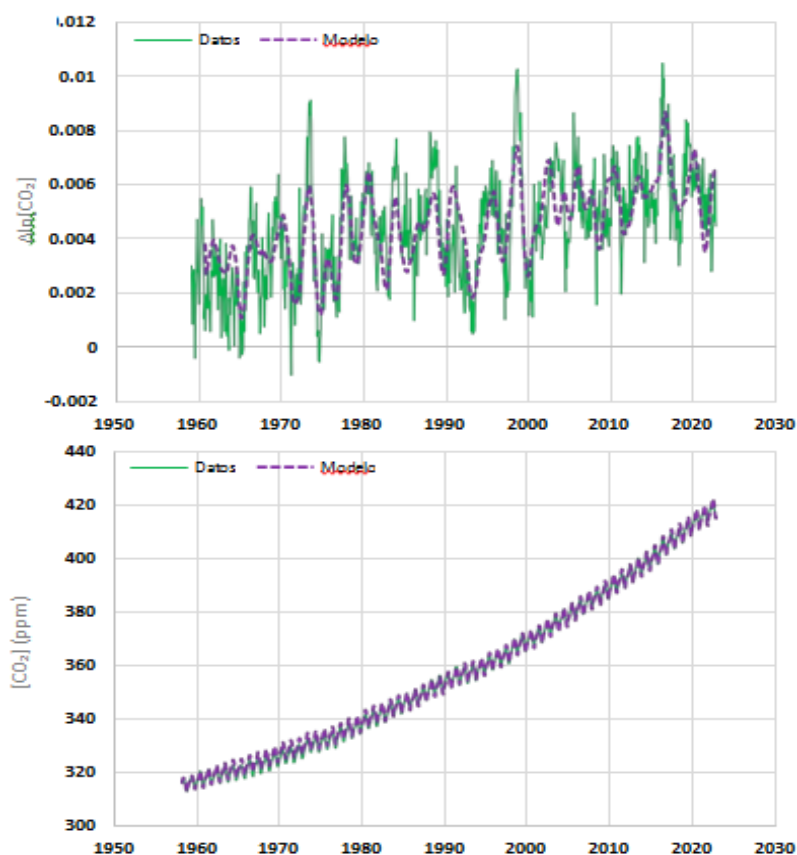


Figura 15. Comparación de los valores reales de $\Delta \ln[\text{CO}_2]$ (**superior**) y $[\text{CO}_2]$ (**inferior**) con los simulados por el modelo de las ecuaciones (8) y (9).

10. Conclusiones

En relación con los puntos 1-7 de la Introducción, que establecen el ámbito de aplicación del documento, los resultados de nuestros análisis pueden resumirse del siguiente modo:

1. Todas las pruebas resultantes de los análisis de la serie temporal moderna más larga disponible de concentración atmosférica de $[\text{CO}_2]$ en Mauna Loa, Hawai, junto con la de T promediada globalmente, sugieren un vínculo unidireccional, potencialmente causal, con T como causa y $[\text{CO}_2]$ como efecto. Esta dirección de la causalidad se mantiene durante todo el periodo cubierto por las observaciones (más de 60 años).
2. La estacionalidad, tal como se refleja en las diferentes fases de las series temporales de $[\text{CO}_2]$ en diferentes latitudes, no desempeña ningún papel en la causalidad potencial, como se confirma sustituyendo la serie temporal de $[\text{CO}_2]$ de Mauna Loa por la del Polo Sur.
3. El vínculo causal potencial unidireccional $T \rightarrow \ln[\text{CO}_2]$ se aplica a todas las escalas temporales resueltas por los datos disponibles, desde mensuales hasta aproximadamente dos décadas.
4. La metodología propuesta es sencilla, flexible y eficaz para desambiguar los casos en los que el tipo de causalidad, el-huevo-o-la-gallina o unidireccional, no está del todo claro.
5. Además, la metodología define un tipo de análisis de datos que, independientemente de la detección de causalidad *per se*, evalúa el rendimiento de los modelos comparando los datos observacionales con los resultados de los modelos. En particular, el análisis de los resultados de los modelos climáticos revela una

representación errónea del vínculo causal por parte de estos modelos, que sugieren una dirección de causalidad opuesta a la que se encuentra cuando se utilizan las mediciones reales.

6. Es posible ampliar el alcance de la metodología, es decir, desde la detección de una posible causalidad hasta la construcción de un modelo más detallado de tipo estocástico, como ilustra un modelo de juguete para el sistema T-[CO₂], con una varianza explicada de [CO₂] que alcanza un impresionante 99.9%.
7. Aunque algunas de las conclusiones de este estudio parezcan contradictorias o contrarias a las opiniones dominantes, están respaldadas lógicamente y computacionalmente por los argumentos y cálculos que figuran en los apéndices.

En general, la noción estocástica de sistema causal, basada en el concepto de función de respuesta al impulso, demostró ser muy eficaz para estudiar problemas de causalidad exigentes. Una característica crucial de nuestra metodología es su uso directo de los datos *per se*, en contraste con otras metodologías que se basan en estimaciones inciertas de las funciones de autocorrelación o en la herramienta más incierta del espectro de potencia, es decir, la transformada de Fourier de la función de autocorrelación. La metodología tiene potencial para nuevos avances, como informamos por primera vez aquí (por ejemplo, la ventana de desfase temporal asimétrica, la definición de un tipo de análisis de datos que se utilizará para evaluar el rendimiento del modelado y las ampliaciones de su alcance, desde la detección de una posible causalidad hasta la construcción de un modelo más detallado).

Materiales complementarios: La siguiente «Información complementaria» puede descargarse en: <https://www.mdpi.com/article/10.3390/sci5030035/s1>: sección SI1, Análisis adicional del comportamiento del modelo climático; sección SI2, Sobre las correlaciones de la temperatura con las emisiones de CO₂.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, D.K.; metodología, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; software, D.K.; validación, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; análisis formal, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; investigación, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; conservación de datos, D.K.; redacción del borrador original, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; redacción-revisión y edición, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; visualización, D.K.; supervisión, D.K., C.O., Z.W.K. y A.C.; administración del proyecto, D.K. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: Esta investigación no recibió financiación externa, sino que fue motivada por la curiosidad científica de los autores.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No procede.

Declaración de consentimiento informado: No procede.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos utilizados en este artículo están disponibles gratuitamente en Internet. Las series cronológicas de temperatura del NCEP y el NCAR, y las series cronológicas de CO₂ de Mauna Loa están disponibles mensualmente de la plataforma climexp (<http://climexp.knmi.nl/> (consultado el 1 de enero del 2023), concretamente de http://climexp.knmi.nl/data/inair_0-360E_-90-90N_n.dat y [http://climexp.knmi.nl/getindies.cgi?WMO=CDIACData/maunaloa_f&STATION=Mauna_Loa_CO₂](http://climexp.knmi.nl/getindies.cgi?WMO=CDIACData/maunaloa_f&STATION=Mauna_Loa_CO2) (consultado el 1 de enero del 2023). Los datos de concentración de CO₂ del Polo Sur los proporciona el Laboratorio de Vigilancia Mundial de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) de EE.UU. en https://gml.noaa.gov/dv/data/index.php?parameter_name=Carbon%2BDioxide&site=SPO (consultado el 1 de enero del 2023). Los datos recuperados son «Monthly Averages» para los tipos ‘Flask’ e ‘Insitu’. Las series temporales de CO₂ utilizadas en los modelos

climáticos se han descargado de <https://gmd.copernicus.org/articles/13/3571/2020/gmd-13-3571-2020-supplement.zip> (consultado el 1 de enero del 2023); del archivo Excel proporcionado se han recuperado los datos de la columna «CO₂ ppm World» de las pestañas «T2-History Year 1750 to 2014» y «T5-SSP2-4.5». Las salidas de los modelos climáticos se descargaron de la plataforma climexp, http://climexp.knmi.nl/selectfield_cmip6.cgi (consultada el 1 de enero del 2023); concretamente, de las «Monthly CMIP6 scenario runs» se han obtenido a través de la plataforma las series temporales promediadas a nivel mundial sobre «CMIP6 mean over all members» y «UKESM1-0-LL f2». Los datos de CERES se descargaron de <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SSF1degEd41Selection.jsp> (consultado el 17 de marzo del 2023). Los datos del SOI se descargaron de <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/enso/indicators/soi/> (consultado el 17 de marzo del 2023). Los datos sobre la temperatura media mensual de la capa superior del océano se descargaron de http://climexp.knmi.nl/getindices.cgi?WMO=NODCData/temp100global&STATION=global_uppercean_mean_temperature (consultado el 17 de marzo del 2023).

Agradecimientos: Agradecemos los numerosos comentarios recibidos sobre nuestros anteriores artículos [2,6,7]. Aunque pocos se referían a la metodología, aumentaron nuestra confianza en los resultados. También agradecemos los comentarios de cinco revisores en las dos rondas del proceso de revisión de este artículo, que desencadenaron una ampliación del estudio añadiendo los apéndices, no contenidos en la versión original, y su discusión en el cuerpo del artículo. Creemos que la versión revisada es más completa.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Apéndice A.

Apéndice A.1. Notas sobre el ciclo del carbono y su dependencia de la temperatura

El ciclo del carbono se presenta normalmente como un sistema con componentes que están en equilibrio permanente, salvo por la perturbación causada por las actividades antrópicas. Por ejemplo, el reciente (2022) estudio exhaustivo de Friedlingstein *et al.* [52], en su figura 2 muestra un equilibrio absoluto tanto en la parte terrestre como en la marítima de la Tierra, con entradas y salidas que coinciden entre sí (± 130 Gt/año para la parte terrestre y ± 80 Gt/año para la parte marítima), a la que se impone una perturbación humana ($9,6 \pm 0,5$ Gt/año procedentes de las emisiones de combustibles fósiles de CO₂ y $1,2 \pm 0,7$ Gt/año procedentes del cambio de uso del suelo) que se distribuye en varios componentes. Esta representación es engañosa, ya que pasa por alto los grandes cambios (en órdenes de magnitud) en la evolución histórica de la abundancia de CO₂ en la atmósfera terrestre. Recientemente, Stallinga [53] ha aportado un enfoque y una explicación diferentes, según la cual los seres humanos añaden 38 Gt al año al sistema atmósfera-océano, una cantidad equivalente a 10.4 Gt C/año.

Aquí seguimos el relato del IPCC [32] en su reciente (2021) Informe de Evaluación (IE6). Su esquema (figura 5.12 en ese Informe) no oculta (a) los desequilibrios en las diferentes partes de la Tierra y (b) el hecho de que las entradas y salidas naturales de carbono en la atmósfera cambian con el tiempo, aunque el esquema del IPCC asume implícitamente que «natural» es el presupuesto que se produjo en la era preindustrial (1750) y que cualquier cambio que se haya producido desde entonces es antropogénico. Curiosamente, según una opinión alternativa de Hansen *et al.* [54], la civilización siempre ha producido gases de efecto invernadero y aerosoles, y es probable que el ser humano haya contribuido al aumento de ambos en los últimos 6,000 años, lo que se traduce en forzamientos climáticos.

Basándonos en la representación del IPCC, hemos resumido en la figura A1 la información que figura en el esquema del IPCC, en términos de equilibrio anual de carbono.

Visto en su conjunto, las emisiones humanas debidas a la combustión de combustibles fósiles (9.4 Gt/año, incluida la producción de cemento) constituyen una pequeña parte (4%) del total de entradas de CO₂ en la atmósfera.

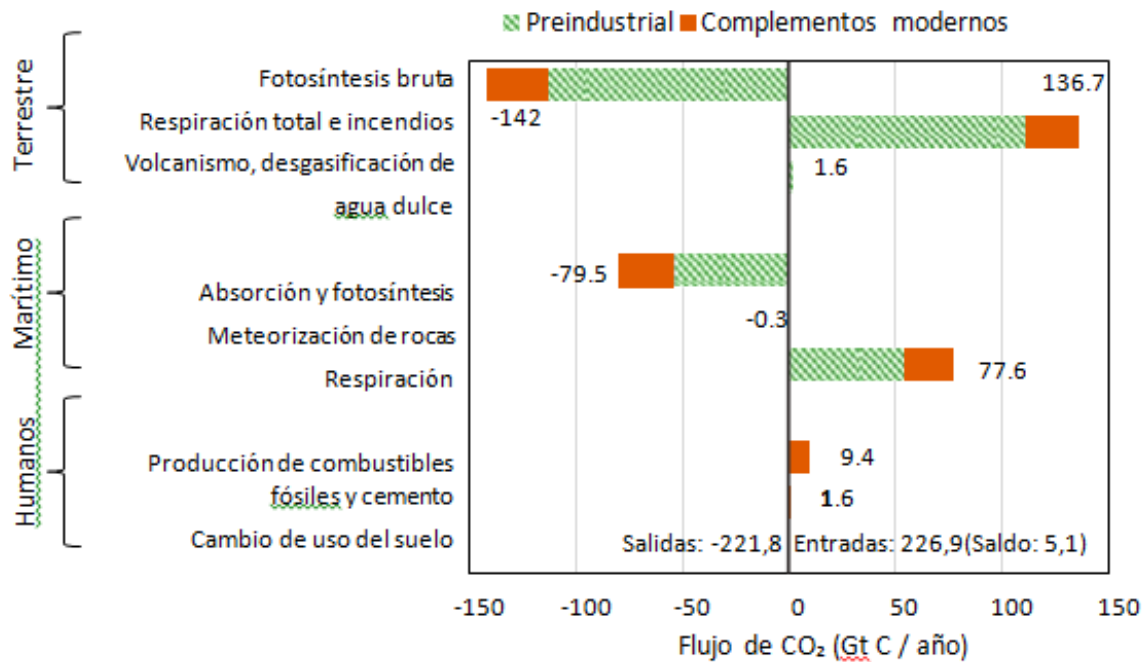


Figura A1. Equilibrio anual de carbono en la atmósfera terrestre en Gt/año, basado en las estimaciones del IPCC [32]. El balance de 5.1 Gt/año es la acumulación anual de carbono (en forma de CO₂) en la atmósfera.

La mayor parte de las entradas se debe a la respiración de la biósfera, es decir, a la reacción bioquímica por la que los organismos vivos convierten la materia orgánica (por ejemplo, glucosa) en CO₂, liberando energía y consumiendo oxígeno molecular [32]. Como se observa en la figura A1 (y en varias publicaciones, por ejemplo, [55]), la respiración ha aumentado en los últimos años, siendo el principal motivo el incremento de la temperatura. La fotosíntesis, el proceso bioquímico que elimina el CO₂ de la atmósfera, produciendo carbohidratos en plantas, algas y bacterias utilizando la energía de la luz [32], también ha aumentado, lo que ha provocado el reverdecimiento de la Tierra [34-36] debido al aumento de la concentración atmosférica de CO₂, que es el alimento de las plantas.

No es difícil cuantificar el aumento de la respiración debido al aumento de la temperatura. El mecanismo se conoce en química desde hace más de un siglo. La velocidad de una reacción química k_T a temperatura T es una función creciente de T , dada por la ecuación de Arrhenius [56]:

$$k_T = A \exp\left(-\frac{a}{R \cdot T}\right) \quad (A1)$$

donde A y a son parámetros libres y R^* es la constante universal de los gases. Típicamente, la tasa se mide en moles por unidad de volumen, pero puede expresarse fácilmente en unidades de masa. Expresando la relación a una temperatura de referencia T_0 y dividiendo con (A1), obtenemos:

$$\begin{aligned}\ln\left(\frac{k_T}{k_0}\right) &= -\frac{a}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right) = \frac{a}{R \cdot T_0}\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) = \frac{a}{R \cdot T_0}\left(\frac{\Delta T}{T_0 + \Delta T}\right) \\ &= \frac{a}{R \cdot T_0}\left(\frac{\Delta T}{T_0} - \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T_0}\right)^3 - \dots\right)\end{aligned}\quad (\text{A3})$$

Tomando los logaritmos y fijando $\Delta T := T - T_0$ encontramos

$$\frac{k_T}{k_{T_0}} = \exp\left(\frac{a}{R \cdot T_0^2} \Delta T\right) = \left(\exp\left(\frac{a}{R \cdot T_0^2}\right)\right)^{\Delta T} = Q_1^{\Delta T} = Q_{10}^{\Delta T/10} \quad (\text{A4})$$

y suponiendo que $\Delta T/T_0$ es pequeño (nb., T_0 es del orden de 300 K, mientras que los valores típicos de ΔT es del orden de 1-10 K). Podemos desechar todos los términos más allá del primer orden y encontrar:

$$\frac{k_T}{k_{T_0}} = \exp\left(\frac{a}{R \cdot T_0^2} \Delta T\right) = \left(\exp\left(\frac{a}{R \cdot T_0^2}\right)\right)^{\Delta T} = Q_1^{\Delta T} = Q_{10}^{\Delta T/10} \quad (\text{A4})$$

donde:

$$Q_1 := \exp\left(\frac{a}{R \cdot T_0^2}\right), Q_{10} := Q_1^{10} \quad (\text{A5})$$

Obsérvese que tanto Q_1 como Q_{10} son números adimensionales > 1 . La expresión exponencial en la que Q_{10} se eleva a la potencia $\Delta T/10$ se conoce como modelo Q_{10} [57].

El aumento exponencial de la velocidad de proceso con la temperatura es un comportamiento químico general, que también se extiende a las reacciones bioquímicas. No se trata de una hipótesis o especulación, sino de un hecho probado que se utiliza ampliamente en ingeniería. Por ejemplo, la tasa metabólica en los sistemas de aguas residuales y alcantarillado se expresa mediante la llamada DBO efectiva (DBO, siendo DBO la demanda bioquímica de oxígeno). Desde hace más de 75 años se sabe que la tasa metabólica aumenta con la temperatura, ya que la actividad de los microorganismos suele aumentar con la temperatura. La relación de la DBO con la temperatura se ha expresado por Pomeroy y Bowlus [58] como $[\text{EBOD}] = [\text{DBO}] (1.07)^{T-20}$, que es similar a (A4), donde la temperatura de referencia es $T_0 = 20$ °C y $Q_1 = 1.07$ ($Q_{10} = 2.0$). Esta última relación es la norma de diseño técnico en los sistemas de alcantarillado.

Para aplicar este marco a la búsqueda del aumento de la respiración en el último periodo de 65 años investigado en nuestro estudio, primero recuperamos la temperatura global por separado para la tierra y el mar a partir del conjunto de datos del reanálisis NCEP/NCAR. En la figura A2 se muestran estos datos en una escala temporal anual. Las tendencias lineales resultantes, que también se muestran en la figura A2, arrojan un aumento de $\Delta T = 1.69$ °C para la parte terrestre y 0.78 °C para la parte marítima en el período de 65 años.

Ahora bien, la bibliografía da valores medios representativos de Q_{10} de 3.05 para la respiración terrestre [57] y de 4.07 para la marítima [59]. Si R_B y R_E denotan la tasa de respiración al principio y al final del periodo de 65 años, y $\Delta R := R_E - R_B$, entonces según (A4),

$$\frac{R_E}{R_B} = Q_{10}^{\Delta T/10} \quad (\text{A6})$$

y por tanto,

$$\Delta R = R_E \left(1 - \frac{1}{Q_{10}^{\Delta T/10}}\right) \quad (\text{A7})$$

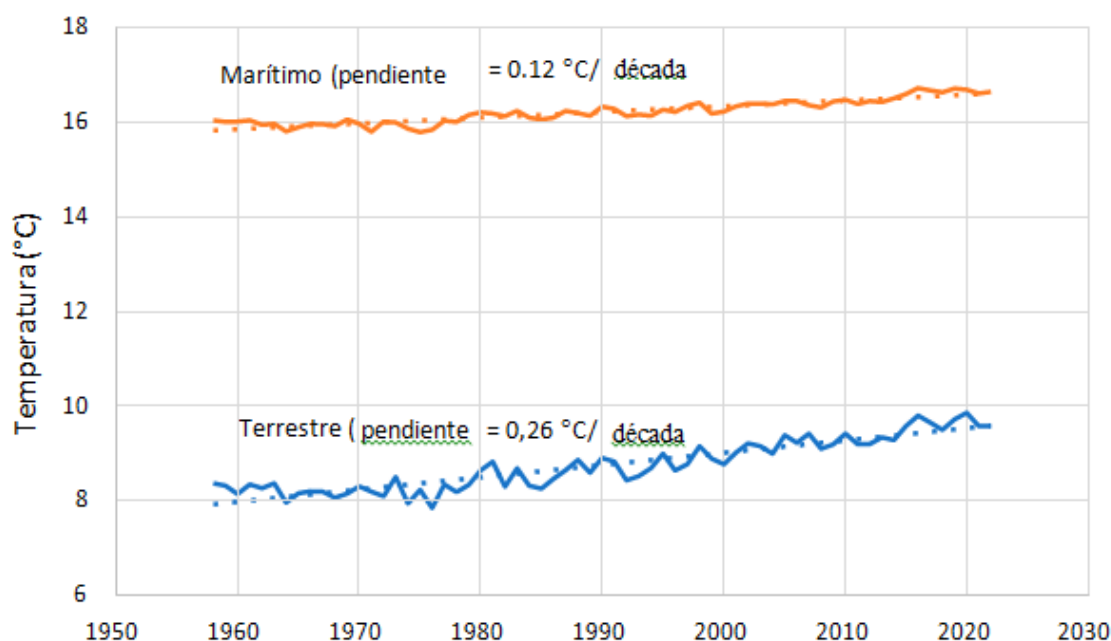


Figura A2. Evolución de la temperatura global de la tierra (terrestre) y del mar (marítima) a 2 m a partir del conjunto de datos del reanálisis NCEP/NCAR, recuperados de la plataforma ClimExp, y pendientes resultantes de las tendencias lineales.

Para los valores dados anteriormente de Q_{10} y ΔT , la expresión entre paréntesis se convierte en 0,172 para la parte terrestre y 0,104 para la parte marítima. Multiplicando estos valores por el RE que se muestran en la Figura A1, e s d e c i r , 136,7 y 77,6 Gt/año, respectivamente, encontramos que $\Delta R = 23,5$ y 8,1 Gt C/año, respectivamente, es decir, un aumento global total de la tasa de respiración de $\Delta R = 31,6$ Gt C/año. Esta tasa, resultado de procesos naturales, es 3,4 veces superior a la emisión de CO₂ por combustión de combustibles fósiles (9,4 Gt C/año incluida la producción de cemento).

Apéndice A.2. Investigación de la causalidad entre el albedo y la temperatura atmosférica

Hay varios factores que provocan cambios en la temperatura de la Tierra. La radiación solar es uno de los principales, aunque sus cambios no han sido sustanciales a escalas temporales de unos pocos años. Sin embargo, la respuesta de la Tierra a la radiación solar puede cambiar esas escalas. Aquí investigamos los cambios del albedo de la Tierra. En el siglo XXI, el albedo en la parte superior de la atmósfera (TOA) puede estimarse a partir de datos de satélite. En concreto, esto puede hacerse utilizando los datos del proyecto en curso Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES). Este forma parte del Sistema de Observación de la Tierra de la NASA, diseñado para medir tanto la radiación reflejada por el Sol como la emitida por la Tierra desde el TOA hasta la superficie terrestre. Los datos que utilizamos aquí proceden de la plataforma TERRA para la escala temporal mensual y están disponibles en línea [60] para el periodo de marzo del 2000 hasta la fecha. El albedo global del TOA se calculó como el cociente para cada mes del flujo de onda corta del TOA observado e integrado globalmente (todo el cielo) sobre el flujo de insolación solar del TOA observado globalmente. La serie temporal resultante se muestra en la figura A3. En esta figura también se muestra una tendencia lineal descendente de -0,0019/década. Una tendencia decreciente significa que la Tierra refleja menos radiación solar, lo que puede provocar un aumento de la temperatura. Para todo el periodo, la disminución del albedo es de aproximadamente 0.004. Como la media de la radiación solar entrante (insolación), según el mismo conjunto de datos, es de 340 W/m², esto implica una diferencia (desequilibrio) de energía recibida por la Tierra de $0.004 \times 340 = 1.4$

W/m². Este resultado no está en desacuerdo con el de Hansen *et al.* [54], que descubrieron que en el periodo comprendido entre enero del 2015 y marzo del 2022, la energía solar absorbida global es +1.01 W/m² superior a la media de los 10 primeros años de datos (2000-2009). Estas cifras son superiores al desequilibrio medio (energía neta absorbida) de la Tierra, que, si se calcula a partir de los datos del contenido de calor de los océanos, es de unos 0.4 W/m² [33]. Según la corriente científica dominante, este desequilibrio se atribuye al aumento de [CO₂], pero los análisis de este estudio no apoyan esta hipótesis. Además, es difícil ver cómo la caída del albedo podría estar causada por el aumento de [CO₂] (y por esta razón, se suele achacar a los aerosoles).

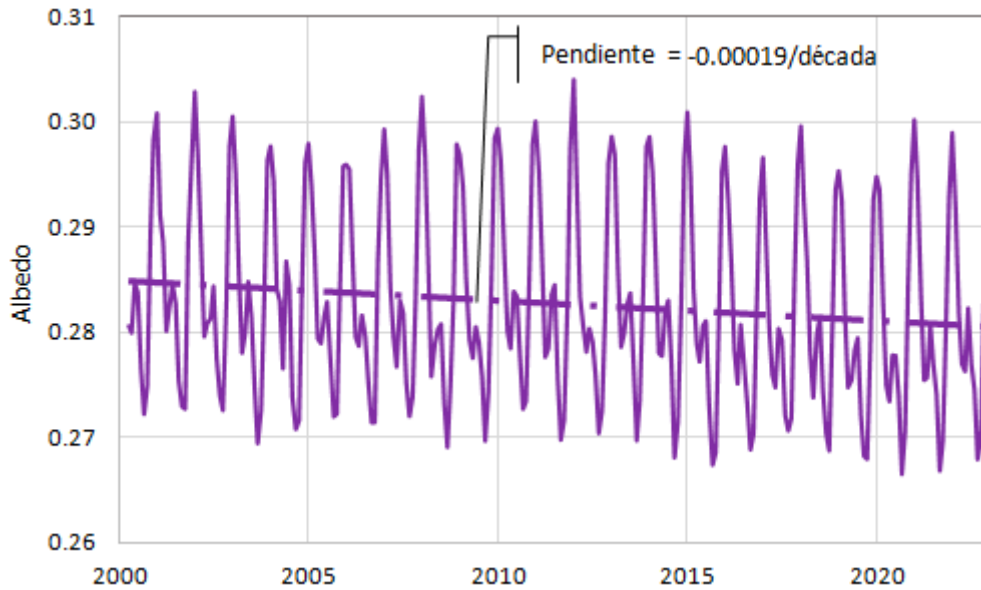


Figura A3. Serie temporal del albedo del TOA (línea continua), proporcionada por el sistema CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*) de la NASA, junto con la tendencia lineal (línea discontinua).

Sin embargo, la posible relación causal del albedo (α) con la T atmosférica puede investigarse más a fondo mediante el marco estocástico que aquí se analiza. Las características resultantes se muestran en la tabla A1 y las IRF resultantes en la figura A4. Nótese que, como se espera que un aumento de α provoque una disminución de T , cambiamos el signo en las diferencias de albedo ($-\Delta\alpha$) para que tengan una correlación positiva con las diferencias de temperatura (ΔT). La IRF determinado sugiere una posible causalidad el-huevo-o-la-gallina, con dirección principal $\alpha \rightarrow T$ y desfases temporales de 1-3 meses. Sin embargo, la varianza explicada es pequeña, del 13%.

Tabla A1. Índices resumidos de los estudios de caso relacionados con el albedo. Los datos corresponden a una escala temporal mensual y el paso temporal de la diferenciación es de 1 año; para la explicación de los símbolos, véase el Tabla 1.

Sistema de cajas	#	Dirección	h_{α}	μ_{α}	$h_{1/2}$	$\epsilon_{\text{gr}}(h)$	e	ϵ
Albedo, α : CERES, TERRA;	24	$-\Delta\alpha \rightarrow \Delta T$	3	1.08	2.90	0.24	0.13	9.1×10^{-4}
T : NCEP/NCAR; periodo: 2000-2022	25	$\Delta T \rightarrow -\Delta\alpha$	-3	-0.31	-2.46	0.24	0.06	3.6×10^{-4}

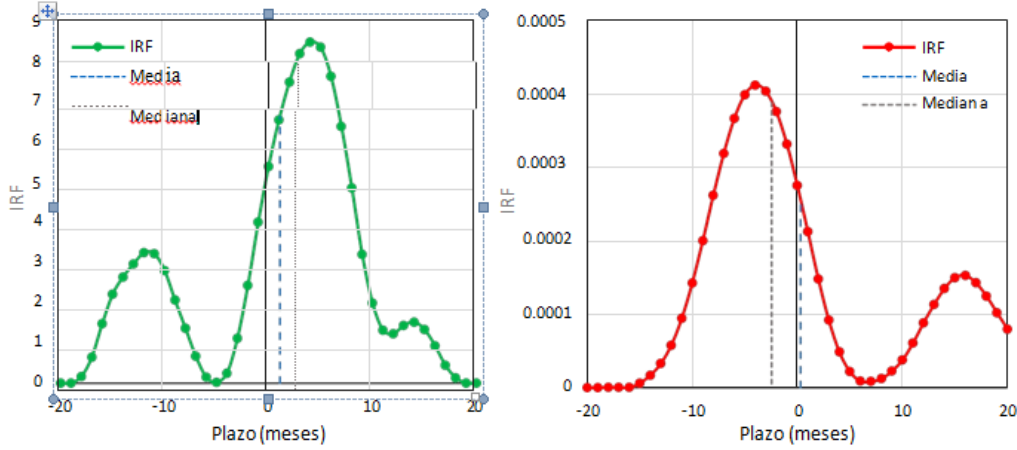


Figura A4. IRF para albedo-temperatura basadas en las series temporales de albedo de CERES y la temperatura del reanálisis NCEP/NCAR a 2 m, respectivamente-estudios de caso #24 (**izquierda**; $-\Delta\alpha \rightarrow \Delta T$); y #25 (**derecha**; $\Delta T \rightarrow -\Delta\alpha$).

Apéndice A.3. Investigación de la causalidad entre El Niño, la temperatura atmosférica y el CO_2

Un segundo proceso que se sabe que afecta globalmente a la temperatura atmosférica es El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (para más detalles, véase [12,61] y un estudio reciente de Kundzewicz *et al.* [62]). El ENOS está asociado a variaciones irregulares de la temperatura superficial del mar y de la presión atmosférica sobre el Océano Pacífico tropical. En los estudios climáticos se utilizan varios índices asociados al ENOS, entre los cuales el más popular es el Índice de Oscilación del Sur (SOI) de la NOAA estadounidense, cuya serie temporal se representa en la figura A5.

Nuestra metodología estocástica se aplicó anteriormente con el SOI junto con datos de temperatura por satélite para el periodo 1979-2021 en [7]. Aquí repetimos la investigación sustituyendo los datos de temperatura por los del reanálisis NCEP/NCAR y ampliando los datos hasta 1951 (el inicio de la disponibilidad de datos del SOI) y hasta 2022. También examinamos la causalidad potencial entre el SOI y $[CO_2]$. En ambos casos, comprobamos las diferencias con un paso temporal de diferenciación de 1 año (reduciendo así el efecto de la estacionalidad) y, para que la correlación fuera positiva, utilizamos $-\Delta SOI$ (como en el caso del albedo).

Sin embargo, la posible relación causal del albedo (α) con la T atmosférica puede investigarse más a fondo mediante el marco estocástico que aquí se analiza. Las características resultantes se muestran en la tabla A1 y las IRF resultantes en la figura A4. Nótese que, como se espera que un aumento de α provoque una disminución de T , cambiamos el signo en las diferencias de albedo ($-\Delta\alpha$) para que tengan una correlación positiva con las diferencias de temperatura (ΔT). La IRF determinada sugiere una posible causalidad el-huevo-a-la-gallina, con dirección principal $\alpha \rightarrow T$ y desfases temporales de 1-3 meses. Sin embargo, la varianza explicada es pequeña, del 13%.

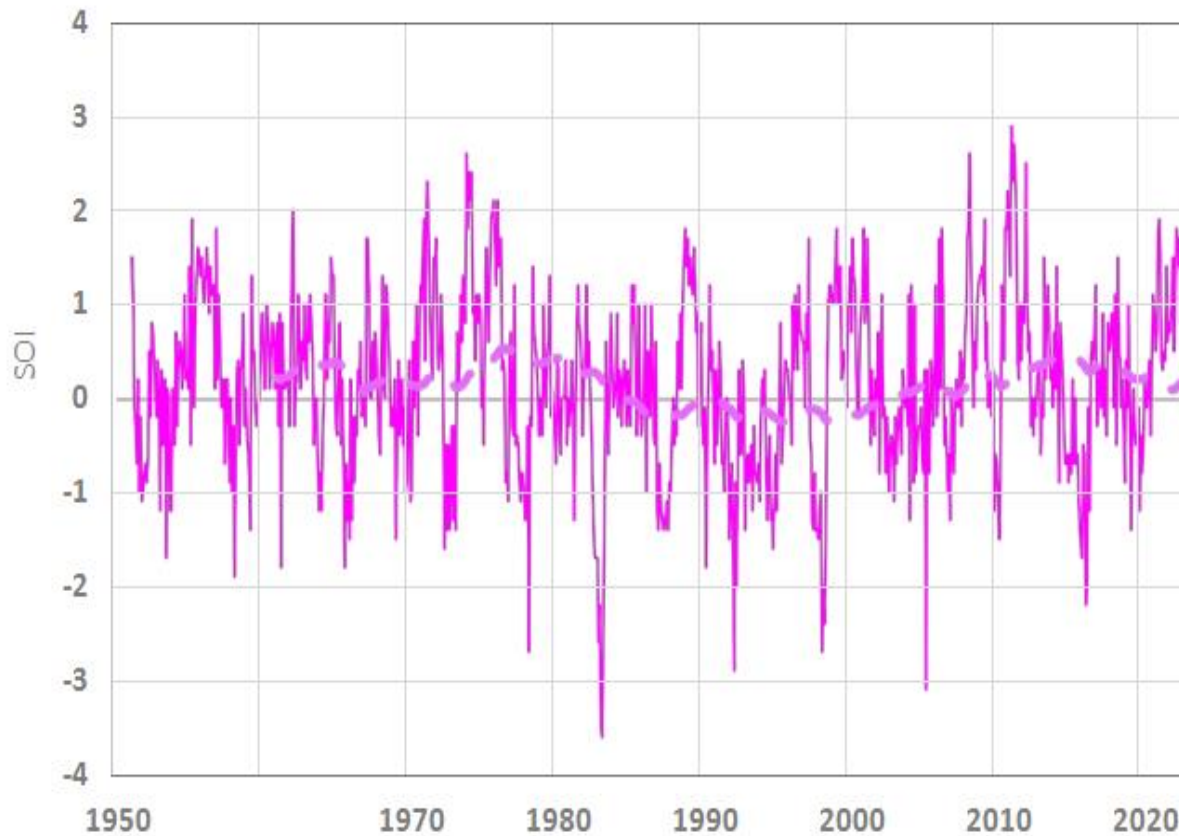


Figura A5. Series temporales del SOI (línea continua) junto con la media móvil (alineada a la derecha) de 10 años (línea discontinua). Los valores negativos y positivos indican las fases de El Niño y La Niña, respectivamente.

Los resultados se muestran en la tabla A2 y en las figuras A6 y A7. Las direcciones principales son $SOI \rightarrow T$ y $SOI \rightarrow [CO_2]$. En el primer caso, la varianza explicada es del 33% y el tipo de causalidad es el-huevo-o-la-gallina, pero muy próxima a la unidireccional con un desfase de 4 meses. En el segundo caso, la varianza explicada es del 30%, y el tipo de causalidad es unidireccional con un desfase de aproximadamente un año.

Tabla A2. Índices resumidos de los estudios de caso relacionados con el ENOS. Los datos corresponden a una escala temporal mensual y el paso temporal de la diferenciación es de 1 año; para la explicación de los símbolos, véase el Cuadro 1.

Sistema de casos	#	Dirección	h_c	μhr_h	$1/2$	$y_x(h)_c$	e	ϵ
OMT0-100: NOAA; T: NCEP/NCAR; periodo: 1955-2022		$30\Delta OMT0-100 \rightarrow \Delta T$	0	2.42	0.98	0.68	0.537	$.1 \times 10^{-3}$
		$31\Delta T \rightarrow \Delta OMT0-100$	0	-2.15	-0.93	0.68	0.523	$.8 \times 10^{-3}$
OMT0-100: NOAA; [CO ₂]: Mauna Loa; periodo: 1958-2022		$32\Delta OMT0-100 \rightarrow \Delta \ln[CO_2]$	2	2.22	2.93	0.46	0.355	$.8 \times 10^{-4}$
		$33\Delta \ln[CO_2] \rightarrow \Delta OMT0-100$	-2	-2.73	-2.82	0.46		$0.215.6 \times 10^{-3}$

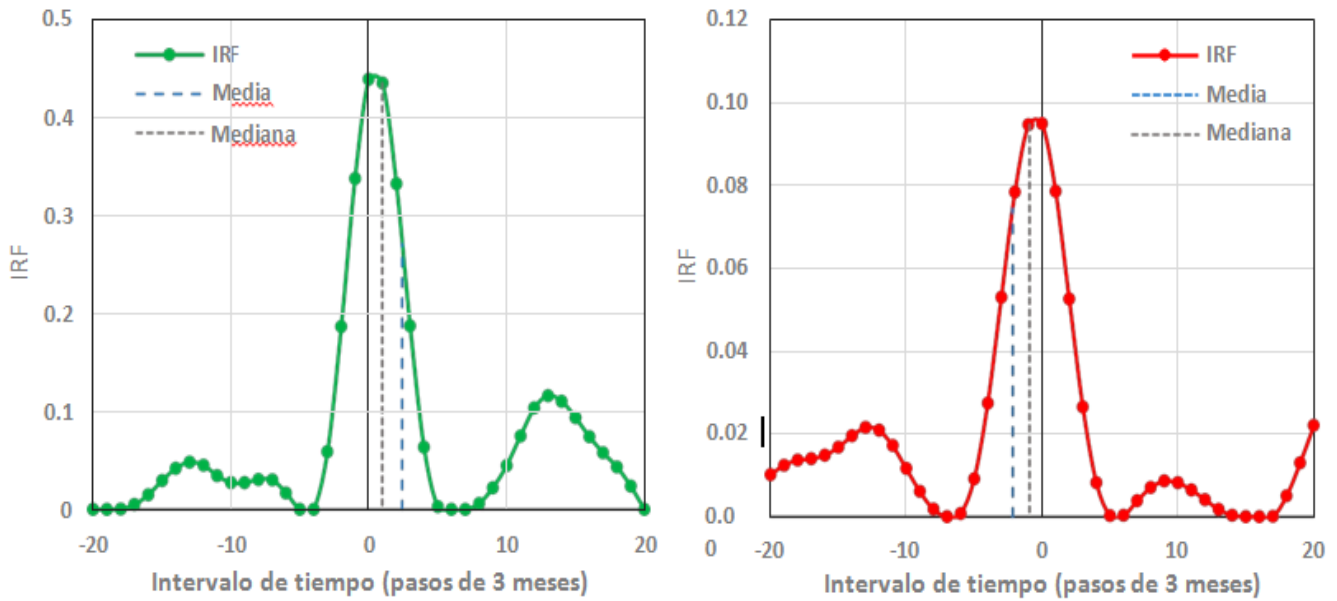


Figura A9. IRF para la temperatura del océano superior-temperatura atmosférica basada en el OMT0-100 y los datos del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente-estudios de caso #30 (**izquierda**; $\Delta\text{OMT0-100} \rightarrow \Delta T$;) y #31 (**derecha**; $\Delta T \rightarrow \Delta\text{OMT0-100}$).

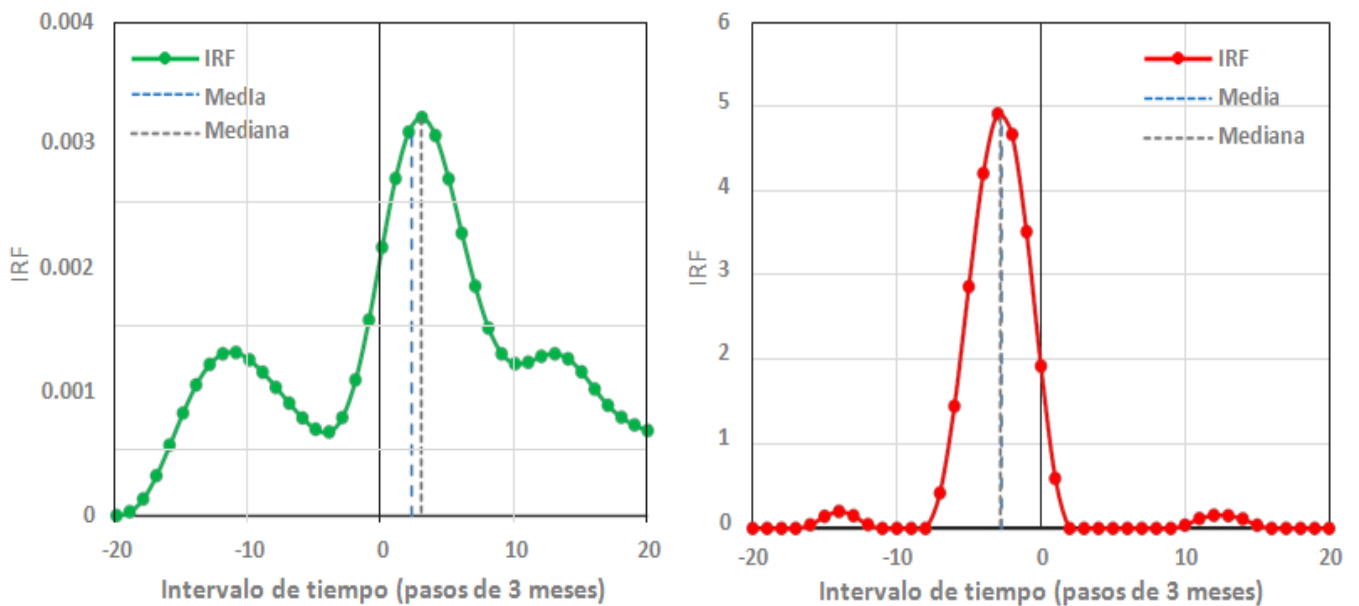


Figura A10. IRF para la temperatura del océano superior- $[\text{CO}_2]$ basadas en el OMT0-100 y los datos del reanálisis NCEP/NCAR, respectivamente-estudios de caso #32 (**izquierda**; $\Delta\text{OMT0-100} \rightarrow \Delta\ln[\text{CO}_2]$;) y #33 (**derecha**; $\Delta\ln[\text{CO}_2] \rightarrow \Delta\text{OMT0-100}$).

Apéndice A.5. Notas sobre la relación T -[CO₂] en grandes escalas de tiempo

Aunque el ámbito de este estudio es el periodo moderno cubierto por mediciones fiables de la concentración de CO₂ (unas seis décadas), puede ser útil remitirse a estudios que utilizaron indicadores paleoclimáticos para evaluar la relación T -[CO₂] en escalas temporales mucho mayores. Berner y Kothavala [66] estudiaron todo el Fanerozoico (los últimos 530 millones de años) y afirmaron que «a largo plazo sí existe una correlación entre el CO₂ y la paleotemperatura», mientras que su figura 13 mostraba que el [CO₂] atmosférico fue mucho mayor (hasta 27 veces) que el actual durante la mayor parte del fanerozoico. También hicieron hincapié en la «importancia de considerar TODOS los factores que afectan al CO₂ a la hora de modelizar el ciclo del carbono a largo plazo y no concentrarse [en] una sola causa». Por otro lado, Veizer *et al.* [67] presentaron pruebas de la disociación entre el CO₂ atmosférico y el clima global durante el fanerozoico, cuestionando el papel de (la presión parcial de) CO₂ como principal fuerza motriz de los cambios climáticos globales (a largo plazo) del pasado, al menos durante dos de los cuatro modos climáticos fríos principales del fanerozoico.

Varios estudios, basados en reconstrucciones paleoclimáticas y principalmente en los núcleos de hielo de Vostok [68,69] que abarcan los ~400,000 años más recientes, han identificado el cambio de T como la causa y el de [CO₂] como el efecto, con estimaciones del desfase que varían entre 50 y 1,000 años, según el periodo de tiempo y el estudio concreto [23,70-72]. En general, en estos estudios no se ha afirmado que la concentración de CO₂ lleve la delantera (es decir, un desfase negativo). A lo sumo, se ha pretendido una afirmación de sincronía basándose en que los desfases positivos estimados se encuentran a menudo dentro del intervalo de incertidumbre del 95% [73], mientras que en uno de ellos [72], se ha afirmado que «no puede excluirse un corto adelanto del CO₂ sobre la temperatura».

En otro estudio de Parrenin *et al.* [74] también se afirmó la existencia de sincronía para el último calentamiento deglacial y se afirmó que no se había encontrado ninguna asincronía significativa entre la temperatura antártica y el [CO₂] atmosférico. Para el mismo periodo, otro estudio de Shakun *et al.* [75] dio diferentes relaciones de adelanto y retraso para los hemisferios norte y sur. En general, parece que la cuestión sigue siendo controvertida, como ilustra, por ejemplo, un informe reciente (2021) de la NOAA (en el marco de Paleo Perspectives [76]), en el que se afirma: «Aunque podría parecer sencillo determinar la causa y el efecto entre el dióxido de carbono y el clima a partir de qué cambio se produce primero, [. . .] la determinación de la causa y el efecto sigue siendo extremadamente difícil».

Por otro lado, una explicación convincente de por qué, a largo plazo, el cambio en la temperatura va por delante y el de la concentración de CO₂ por detrás ha sido dada por Roe [40], quien demostró que en el cuaternario es el efecto de los ciclos de Milankovic, más que el de la concentración atmosférica de CO₂, el que explica el proceso de glaciación. Concretamente, constató que «las variaciones del CO₂ atmosférico parecen ir por detrás de la tasa de cambio del volumen global de hielo. Esto implica solo un papel secundario para el CO₂ —cuyas variaciones producen un forzamiento radiativo más débil que los cambios inducidos orbitalmente en la insolación estival— a la hora de impulsar los cambios en el volumen global de hielo».

Los núcleos de hielo de Vostok que cubren los ~400 mil años más recientes también han sido examinados, aplicando el mismo método que en este trabajo, por Koutsoyiannis *et al.* [7], quienes concluyeron que «la relación causal de la concentración atmosférica de T y CO₂, obtenida por datos proxy, parece ser de tipo el-huevo-o-la-gallina con dirección principal $T \rightarrow$ [CO₂]», igual que en los registros del periodo moderno, pero con un desfase temporal mucho mayor, del orden de 1000 años.

Referencias

1. Sagan, C. *Cosmos*; Ballantine Books: Nueva York, NY, EE.UU., 1985.
2. Koutsoyiannis, D.; Kundzewicz, Z.W. Atmospheric temperature and CO₂ : ¿Causalidad del huevo o la gallina? *Sci* 2020, 2, 83. [CrossRef]
3. Πλούταρχος, Συμποσιακά Β' (Plutarco, Quaestiones Convivales B)-Βικιθήκη. Disponible en línea: https://el.wikisource.org/wiki/Συμποσιακά_Β' (consultado el 5 de febrero de 2023).
4. Chan, K.H.; Hayya, J.C.; Ord, J.K. A note on trend removal methods: El caso de la regresión polinómica frente a la diferenciación de variantes. *Econometrica* 1977, 45, 737-744. [CrossRef]
5. Estrella, A. ¿Por qué la curva de rendimiento predice la producción y la inflación? *Econ. J.* 2005, 115, 722-744. [CrossRef]
6. Koutsoyiannis, D.; Onof, C.; Christofides, A.; Kundzewicz, Z.W. Revisiting causality using stochastic: 1. 1. Theory. *Proc. R. Soc. A* 2022, 478, 20210836. [CrossRef]
7. Koutsoyiannis, D.; Onof, C.; Christofides, A.; Kundzewicz, Z.W. Revisiting causality using stochastic: 2. Applications. *Proc. R. Soc. A* 2022, 478, 20210835. [CrossRef]
8. Young, P.C. *Estimación recursiva y análisis de series temporales*; Springer: Berlín/Heidelberg, Alemania, 2011.
9. Young, P.C. Estimación refinada de variables instrumentales: Maximum likelihood optimization of a unified Box-Jenkins model. *Automatica* 2015, 52, 35-46. [CrossRef]
10. Papoulis, A. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, 3ª ed.; McGraw-Hill: Nueva York, NY, EE.UU., 1991.
11. Kestin, T.S.; Karoly, D.J.; Yang, J.I.; Rayner, N.A. Time-frequency variability of ENSO and stochastic simulations. *J. Clim.* 1998, 11, 2258-2272. [CrossRef]
12. Wills, R.C.; Schneider, T.; Wallace, J.M.; Battisti, D.S.; Hartmann, D.L. Disentangling global warming, multidecadal variability, and El Niño in Pacific temperatures. *Geophys. Res. Lett.* 2018, 45, 2487-2496. [CrossRef]
13. Granger, C.W. Investigating causal relations by econometric models and cross-spectral methods. *Econometrica* 1969, 37, 424-438. [CrossRef]
14. Granger, C.W. Pruebas de causalidad: Un punto de vista personal. *J. Econ. Dyn. Control.* 1980, 2, 329-352. [CrossRef]
15. Moraffah, R.; Sheth, P.; Karami, M.; Bhattacharya, A.; Wang, Q.; Tahir, A.; Raglin, A.; Liu, H. Causal inference for time series analysis: Problems, methods and evaluation. *Knowl. Inf. Inf.* 2021, 63, 3041-3085. [CrossRef]
16. Pearl, J. Inferencia causal en estadística: An overview. *Stat. Surv.* 2009, 3, 96-146. [CrossRef]
17. Pearl, J.; Glymour, M.; Jewell, N.P. *Causal Inference in Statistics: A Primer*; Wiley: Chichester, Reino Unido, 2016.
18. Pearl, J. y Mackenzie, D., *El libro del porqué, La nueva ciencia de la causa y el efecto*, Basic Books: Nueva York, NY, EE. UU., 2018.
19. Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 1996, 77, 437-472. [CrossRef]
20. Meinshausen, M.; Nicholls, Z.R.J.; Lewis, J.; Gidden, M.J.; Vogel, E.; Freund, M.; Beyerle, U.; Gessner, C.; Nauels, A.; Bauer, N.; et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geosci. Model Dev.* 2020, 13, 3571-3605. [CrossRef]
21. Sellar, A.A.; Jones, C.G.; Mulcahy, J.P.; Tang, Y.; Yool, A.; Wiltshire, A.; O'Connor, F.M.; Stringer, M.; Hill, R.; Palmieri, J.; et al. UKESM1: Descripción y evaluación del modelo del sistema terrestre del Reino Unido. *J. Adv. Model. Earth Syst.* 2019, 11, 4513-4558. [CrossRef]

22. Koutsoyiannis, D. *Stochastics of Hydroclimatic Extremes-A Cool Look at Risk*, 2ª ed.; Kallipos Open Academic Editions: Atenas, Grecia, 2022; 346p, ISBN 978-618-85370-0-2. [CrossRef]
23. Koutsoyiannis, D. Time's arrow in stochastic characterization and simulation of atmospheric and hydrological processes. *Hydrol. Sci. J.* 2019, 64, 1013-1037. [CrossRef]
24. Strotz, R.H.; Wold, H.O.A. Sistemas recursivos frente a sistemas no recursivos: An attempt at synthesis (Parte I de un tríptico sobre sistemas de cadenas causales). *Econometrica* 1960, 28, 417-427. Disponible en línea: <https://www.jstor.org/stable/1907731> (consultado el 15 de marzo de 2023). [CrossRef]
25. Hannart, A.; Pearl, J.; Otto, F.E.L.; Naveau, P.; Ghil, M. Causal counterfactual theory for the attribution of weather and climate- related events. *Bull. Am. Met. Soc.* 2016, 97, 99-110. [CrossRef]
26. Hannart, A.; Naveau, P. Probabilidades de causalidad de los cambios climáticos. *J. Clim.* 2018, 31, 5507-5524. [CrossRef]
27. Koutsoyiannis, D.; Efstratiadis, A.; Mamassis, N.; Christofides, A. Sobre la credibilidad de las predicciones climáticas. *Hydrol. Sci. J.* 2008, 53, 671-684. [CrossRef]
28. Anagnostopoulos, G.G.; Koutsoyiannis, D.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Mamassis, N. A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data. *Hydrol. Sci. J.* 2010, 55, 1094-1110. [CrossRef]
29. Koutsoyiannis, D.; Christofides, A.; Efstratiadis, A.; Anagnostopoulos, G.G.; Mamassis, N. Diálogo científico sobre el clima: ¿Está poniendo ojos morados o abriendo ojos cerrados? Respuesta a "A black eye for the Hydrological Sciences Journal" de D. Huard. *Hydrol. Sci. J.* 2011, 56, 1334-1339. [CrossRef]
30. Tyralis, H.; Koutsoyiannis, D. On the prediction of persistent processes using the output of deterministic models. *Hydrol. Sci. J.* 2017, 62, 2083-2102. [CrossRef]
31. Scafetta, N. CMIP6 GCM validation based on ECS and TCR ranking for 21st century temperature projections and risk assessment. *Atmósfera* 2023, 14, 345. [CrossRef]
32. Masson-Delmotte, V.; Zhai, P.; Pirani, A.; Connors, S.L.; Péan, C.; Berger, S.; Caud, N.; Chen, Y.; Goldfarb, L.; Gomis, M.I.; et al. (Eds.) IPCC, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribución del Grupo de Trabajo I al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2021; 2391p. [CrossRef]
33. Koutsoyiannis, D. Repensar el clima, el cambio climático y su relación con el agua. *Agua* 2021, 13, 849. [CrossRef]
34. Zhu, Z.; Piao, S.; Myneni, R.B.; Huang, M.; Zeng, Z.; Canadell, J.G.; Ciais, P.; Sitch, S.; Friedlingstein, P.; Arneeth, A.; et al. Greening de la Tierra y sus impulsores. *Nature Climate Change* 2016, 6, 791-795. [CrossRef]
35. Li, Y.; Li, Z.L.; Wu, H.; Zhou, C.; Liu, X.; Leng, P.; Yang, P.; Wu, W.; Tang, R.; Shang, G.F.; et al. Biophysical impacts of earth greening can substantially mitigate regional land surface temperature warming. *Nat. Commun.* 2023, 14, 121. [CrossRef]
36. Chen, C.; Park, T.; Wang, X.; Piao, S.; Xu, B.; Chaturvedi, R.K.; Fuchs, R.; Brovkin, V.; Ciais, P.; Fensholt, R.; et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat. Sustain.* 2019, 2, 122-129. [CrossRef]
37. Milankovic', M. *Nebeska Mehanika; Udruženje "Milutin Milankovic"*: Beograd, Serbia, 1935.
38. Milankovic', M. *Kanon der Erdbestrahlung und Seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem; Koniglich Serbische Akademice*: Beograd, Serbia, 1941.
39. Milankovic', M. *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem; Agencia de Libros de Texto*: Belgrado, Serbia, 1998.
40. Roe, G. En defensa de Milankovitch. *Geophys. Res. Lett.* 2006, 33, L24703. [CrossRef]
41. Markonis, Y.; Koutsoyiannis, D. Variabilidad climática en escalas temporales que abarcan nueve órdenes de magnitud: Connecting Milankovitch cycles with Hurst-Kolmogorov

- dynamics. *Surv. Geophys.* 2013, 34, 181-207. [CrossRef]
42. Stephens, G.L.; Hakuba, M.Z.; Kato, S.; Gettelman, A.; Dufresne, J.-L.; Andrews, T.; Cole, J.N.S.; Willen, U.; Mauritsen, T. The changing nature of Earth's reflected sunlight. *Proc. R. Soc. A* 2022, 478, 1-37. [CrossRef]
 43. Connolly, R.; Soon, W.; Connolly, M.; Baliunas, S.; Berglund, J.; Butler, C.J.; Cionco, R.G.; Elias, A.G.; Fedorov, V.M.; Harde, H.; et al. ¿En qué medida ha influido el Sol en las tendencias de temperatura del hemisferio norte? Un debate en curso. *Res. Astron. Astrophys.* 2021, 21, 131.1-131.68. [CrossRef]
 44. Scafetta, N.; Bianchini, A. La teoría planetaria de la variabilidad de la actividad solar: A review. *Front. Astron. Space Sci.* 2022, 9, 937930. [CrossRef]
 45. Kamis, J.E. The Plate Climatology Theory: How Geological Forces Influence, Alter, or Control Earth's Climate and Climate Related Events. Disponible en línea: <https://books.google.gr/books/?id=71RqzgEACAAJ> (consultado el 10 de marzo de 2023).
 46. Chakrabarty, D. The Climate of History in a Planetary Age; University of Chicago Press: Chicago, IL, EE.UU., 2021; Disponible en línea: <https://books.google.gr/books?id=ETQXEAAAQBAJ> (consultado el 10 de marzo de 2023).
 47. Davis, E.; Becker, K.; Dziak, R.; Cassidy, J.; Wang, K.; Lilley, M. Respuesta hidrológica a un episodio de extensión del fondo marino en la dorsal de Juan de Fuca. *Nature* 2004, 430, 335-338. [CrossRef] [PubMed].
 48. Urakawa, L.S.; Hasumi, H. A remote effect of geothermal heat on the global thermohaline circulation. *J. Geophys. Res. Ocean.* 2009, 114, C07016. [CrossRef]
 49. Patara, L.; Böning, C.W. Abyssal ocean warming around Antarctica strengthens the Atlantic overturning circulation. *Geophys. Res. Lett.* 2014, 41, 3972-3978. [CrossRef]
 50. Koutsoyiannis, D. Un paseo aleatorio sobre el agua. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2010, 14, 585-601. [CrossRef]
 51. Koutsoyiannis, D. Hidrología y cambio. *Hydrol. Sci. J.* 2013, 58, 1177-1197. [CrossRef]
 52. Friedlingstein, P.; O'Sullivan, M.; Jones, M.W.; Andrew, R.M.; Gregor, L.; Hauck, J.; Le Quéré, C.; Luijkx, I.T.; Olsen, A.; Peters, G.P.; et al. Global Carbon Budget 2022. *Earth Syst. Sci. Data* 2022, 14, 4811-4900. [CrossRef]
 53. Stallinga, P. Tiempo de residencia frente a tiempo de ajuste del dióxido de carbono en la atmósfera. *Entropía* 2023, 25, 384. [CrossRef]
 54. Hansen, J.E.; Sato, M.; Simons, L.; Nazarenko, L.S.; von Schuckmann, K.; Loeb, N.G.; Osman, M.B.; Kharecha, P.; Jin, Q.; Tselioudis, G.; et al. Global warming in the pipeline. *arXiv* 2022, arXiv:2212.04474.
 55. Bond-Lamberty, B.; Thomson, A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record. *Nature* 2010, 464, 579. [CrossRef] [PubMed].
 56. Arrhenius, S.A. Über die Dissociationswärme und den Einfluß der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte. *Z. Phys. Chem.* 1889, 4, 96-116. [CrossRef]
 57. Patel, K.F.; Bond-Lamberty, B.; Jian, J.L.; Morris, K.A.; McKeever, S.A.; Norris, C.G.; Zheng, J.; Bailey, V.L. Las estimaciones del flujo de carbono son sensibles a la fuente de datos: A comparison of field and lab temperature sensitivity data. *Environ. Res. Lett.* 2022, 17, 113003. [CrossRef]
 58. Pomeroy, R.; Bowlus, F.D. Progress report on sulfide control research. *Sew. Work. J.* 1946, 18, 597-640.
 59. Robinson, C. La respiración microbiana, motor de la desoxigenación oceánica. *Front. Mar. Sci.* 2019, 5, 533. [CrossRef]
 60. Productos de datos CERES. SSF1deg-Level 3, Gridded Daily and Monthly Averages of the SSF Product by Instrument. Disponible en línea: <https://ceres-tool.larc.nasa.gov/ord-tool/jsp/SSF1degEd41Selection.jsp> (consultado el 12 de marzo de 2023).
 61. McPhaden, M.J.; Zebiak, S.E.; Glantz, M.H. ENSO como concepto integrador de las ciencias de la Tierra. *Science* 2006, 314, 1740- 1745. [CrossRef]
 62. Kundzewicz, Z.W.; Pinskiw, I.; Koutsoyiannis, D. Variability of global mean annual temperature is significantly influenced by the rhythm of ocean-atmosphere oscillations. *Sci.*

- Total Environ. 2020, 747, 141256. [CrossRef]
63. Levitus, S.; Antonov, J.I.; Boyer, T.P.; Baranova, O.K.; Garcia, H.E.; Locarnini, R.A.; Mishonov, A.V.; Reagan, J.R.; Seidov, D.; Yarosh, E.S.; et al. World Ocean heat content and thermosteric sea level change (0-2000 m). *Geophys. Res. Lett.* 2012, 39, L10603. [CrossRef]
 64. Centro Nacional de Datos Oceanográficos, NOAA, Global Ocean Heat and Salt Content. Disponible en línea: <https://www.ncei.noaa.gov/access/global-ocean-heat-content/index3.html> (consultado el 12 de marzo de 2023).
 65. Roemmich, D.; Johnson, G.C.; Riser, S.; Davis, R.; Gilson, J.; Owens, W.B.; Garzoli, S.L.; Schmid, C.; Ignaszewski, M. El programa Argo : Observando el océano global con flotadores perfiladores. *Oceanography* 2009, 22, 34-43. [CrossRef]
 66. Berner, R.A.; Kothavala, Z. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *Am. J. Sci.* 2001, 301, 182-204. [CrossRef]
 67. Veizer, J.; Godderis, Y.; François, L.M. Evidence for decoupling of atmospheric CO₂ and global climate during the Phanerozoic. *Nature* 2000, 408, 698-701. [CrossRef] [PubMed]
 68. Jouzel, J.; Lorius, C.; Petit, J.R.; Genthon, C.; Barkov, N.I.; Kotlyakov, V.M.; Petrov, V.M. Núcleo de hielo de Vostok: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years). *Nature* 1987, 329, 403-408. [CrossRef]
 69. Petit, J.R.; Jouzel, J.; Raynaud, D.; Barkov, N.I.; Barnola, J.-M.; Basile, I.; Bender, M.; Chappellaz, J.; Davis, M.; Delayque, G.; et al. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 1999, 399, 429-436. [CrossRef]
 70. Caillon, N.; Severinghaus, J.P.; Jouzel, J.; Barnola, J.M.; Kang, J.; Lipenkov, V.Y. Timing of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature changes across Termination III. *Science* 2003, 299, 1728-1731. [CrossRef]
 71. Soon, W. Implicaciones del papel secundario del forzamiento del dióxido de carbono y el metano en el cambio climático: Pasado, presente y futuro. *Phys. Geogr.* 2007, 28, 97-125. [CrossRef]
 72. Pedro, J.B.; Rasmussen, S.O.; van Ommen, T.D. Tightened constraints on the time-lag between Antarctic temperature and CO₂ during the last deglaciation. *Clim. Past* 2012, 8, 1213-1221. [CrossRef]
 73. Chowdhry Beeman, J.; Gest, L.; Parrenin, F.; Raynaud, D.; Fudge, T.J.; Buizert, C.; Brook, E.J. Antarctic temperature and CO₂ Near-synchrony yet variable phasing during the last deglaciation. *Clim. Past* 2019, 15, 913-926. [CrossRef]
 74. Parrenin, F.; Masson-Delmotte, V.; Köhler, P.; Raynaud, D.; Paillard, D.; Schwander, J.; Barbante, C.; Landais, A.; Wegner, A.; Jouzel, J. Synchronous change of atmospheric CO₂ and Antarctic temperature during the last deglacial warming. *Science* 2013, 339, 1060-1063. [CrossRef]
 75. Shakun, J.D.; Clark, P.U.; He, F.; Marcott, S.A.; Mix, A.C.; Liu, Z.; Otto-Bliesner, B.; Schmittner, A.; Bard, E. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature* 2012, 484, 49-54. [CrossRef]
 76. Centros Nacionales de Información Medioambiental de la NOAA. Cambio de Temperatura y Dióxido de Carbono; 2021. Disponible en línea: <https://www.ncei.noaa.gov/sites/default/files/20211/8%20Temperature%20Change%20and%20Carbon%20Dioxide%20Change%20-%20FINAL%20OCT%202021.pdf> (consultado el 12 de enero de 2023).

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son responsabilidad exclusiva de los autores y colaboradores individuales y no de MDPI o el/los editor/es. MDPI o el/los editor/es declinan toda responsabilidad por daños personales o materiales derivados de ideas, métodos, instrucciones o productos a los que se haga referencia en el contenido.