

CO₂ Y RADIACIÓN SOLAR: ¿CAUSANTES DEL CALENTAMIENTO GLOBAL?

Por

Gabriel Bayona^{1*}, Yuri C. García¹, Heiner R. Sarmiento^{1,2}

Resumen

Bayona, G., Y. C. García & H. R. Sarmiento: CO₂ y radiación solar: ¿causantes del calentamiento global? Rev. Acad. Colomb. Cienc. **34** (132): 339-345, 2010. ISSN 0370-3908.

La relación causa-efecto entre la temperatura global como indicadora del cambio climático en el planeta con algunos de los principales mecanismo forzantes (concentración de CO₂ atmosférico, irradiación solar y actividad volcánica) es analizada en este artículo mediante el análisis de series de tiempo para el periodo 1610-1990 AD, comparando la relación entre las tendencias y la variabilidad en los espectros de frecuencia. La temperatura parece acoplarse a la tendencia del CO₂ para el último siglo, pero no se encontró una relación de causa-efecto en esta escala de tiempo. El análisis de frecuencias indica una concordancia entre irradiación y temperatura para un periodo de 22 años. El volcanismo presenta una relación inversa con la temperatura mejor observada para una escala decadal.

Palabras clave: cambio climático, CO₂, radiación solar.

Abstract

A cause-effect relationship between global temperature as a climatic change indicator and some of the main forcing mechanisms (Atmospheric CO₂ concentration, solar radiation and volcanic activity) are analyzed in this paper through time series analysis for the 1610-1990 AD period comparing trends and variability for the frequency spectrums. Temperature seems to fit the CO₂ trend for the last century, but we found no cause-effect relationship for this interval. The frequency analysis shows a correlation between radiation and temperature for a period of 22 years. Volcanism presents an inverse relationship with temperature better seen at a decadal scale.

Key words: climatic change, CO₂, solar radiation.

¹ Área de Ciencias del Mar, Departamento de Geología, Universidad EAFIT. Carrera 49 N° 7 Sur - 50, Medellín, Colombia.

² ECOPETROL- ICP, Km 7 Via Piedecuesta, Piedecuesta, Santander.

* Correo electrónico: gbayonaf@eafit.edu.co

1. Introducción

El clima de la Tierra ha cambiado constantemente a lo largo de su historia, sin que la época actual represente en sí una anomalía en esta ciclicidad. Se ha sugerido que la aparición del hombre, y más específicamente, su actividad industrial durante los últimos 200 años movida por la quema de combustibles fósiles y producción agrícola ha influenciado la fase del ciclo climático durante este periodo, y se discute en la actualidad sus repercusiones para los próximos 100-150 años de la civilización. Ha habido periodos en que vastas regiones han estado cubiertas de hielo, o por extensos bosques, sin que el hombre haya tenido que ver algo con ello. En un recorrido a lo largo del Holoceno encontramos un periodo que duro cerca de 3 milenios hace aproximadamente 6.000 años conocido como el Máximo del Holoceno, durante el cual las temperaturas fueron significativamente mayores a las actuales. Para el pasado reciente se sugiere la ocurrencia de un periodo de enfriamiento generalizado del clima conocido como la Pequeña Edad de Hielo (LIA por sus siglas en ingles), comprendido entre 1300-1800 AD (**Bradley and Jones, 1993; Jones et al., 2001; Jones and Mann, 2004**), el cual fue subsecuente a un periodo cálido (800-1300 AD) que mantuvo temperaturas semejantes a las actuales, llamado Óptimo Medieval o Periodo Cálido Medieval (MWP) (**Hughes and Diaz, 1994**), en el cual las temperaturas fueron un poco más altas. De acuerdo con el IPCC (**Houghton et al., 2001**) las reconstrucciones climáticas, como simulaciones con modelos, sugieren que períodos cálidos con temperaturas mayores a las actuales durante el holoceno temprano y medio, estuvieron asociados con cambios en los parámetros orbitales, sin embargo parámetros como la actividad volcánica, la irradiación solar o la influencia de rayos cósmicos no explican el calentamiento global actual.

1.1. El CO₂ y la radiación solar como moduladores de la variabilidad climática

El debate en relación al cambio climático y el aumento gradual de la temperatura media global se ha centrado en gran parte en el efecto antrópico, siendo numerosos los estudios que lo relacionan con el aumento de emisiones de CO₂ (**Bradley & Jonest, 1993; Joos & Spahni, 2008; van Hoof et al., 2008**). Sin embargo, el efecto invernadero del CO₂ es relativamente secundario en comparación con el vapor de agua (Figura 1). Sin embargo la diferencia entre estos últimos en la escala de tiempo reciente radica en que el contenido de vapor de agua ha permanecido constante mientras que la del CO₂ se ha incrementado. Por otra parte, la concentración de CO₂ en la atmósfera representa una fracción medida en decenas de partes por millón, que en

otros términos corresponde solo al 0,054 % de la mezcla de gases de invernadero (**Wallace & Hobbs, 1977**). Es bien conocido que la producción de CO₂ de origen antrópico se ha incrementado en el último siglo aumentando gradualmente hasta alcanzar valores del orden de 6 gton/año en el 2000 (**Karl & Trenberth, 2003**). Sin embargo, esta cantidad es significativamente menor a la producida anualmente por los volcanes en todo el mundo i.e. 6,5 gton. **Gerlach (1991)** afirma que la erupción de un volcán promedio arroja más CO₂ a la atmósfera que el hombre en una década, sin embargo la emisión total de CO₂ por los volcanes en el presente es incierta y en comparación, las emisiones actuales por el hombre son 150 veces mayores.

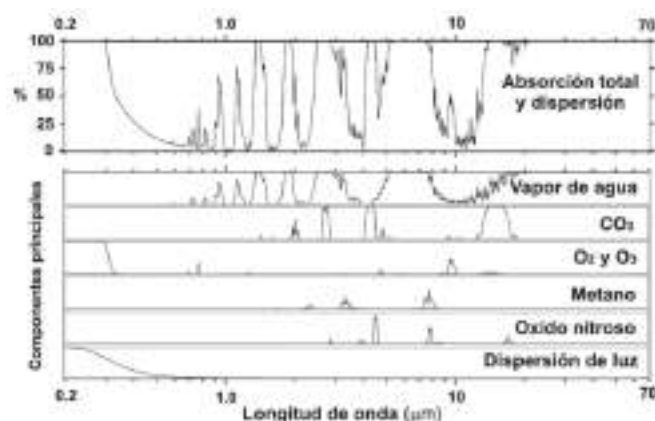


Figura 1. Espectro de absorción de los principales gases de invernadero de la atmósfera. El vapor de agua cubre un espectro mayor a todos los demás gases (modificado de **Burch et al., 1968**).

Una fuente aún mayor de CO₂ a la atmósfera es el océano (**Burch et al., 1968**) que también es su mayor reservorio. El intercambio de CO₂ con la atmósfera se basa en la ley de Henry. Si se calienta la superficie del océano se liberará CO₂ en forma gaseosa, y de manera opuesta, si se enfria se disolverá CO₂ atmosférico. Sin embargo, dado el volumen de los océanos, estos tardan cientos de años enfriarse o calentarse, conservando así una memoria de la temperatura hasta por 10.000 años (**Wunsch, 1996**). Por esta razón, cambios visibles hoy en el océano, pueden corresponder a alteraciones en el sistema ocurridas hace cientos de años. El aumento de la temperatura global y el CO₂ es fácilmente comprobable mediante mediciones. Sin embargo, la relación entre los dos es todavía objeto de investigación. **Idso (1998)** realizó varios experimentos con diferentes condiciones naturales y concluyó que aunque los modelos muestran que un aumento de 300-600 ppm causaría un aumento de varios grados de temperatura, en condiciones naturales este aumento sería solo de unas décimas de grado. Otro gas de invernaderos importante es el metano (CH₄), pro-

ducido antropogénicamente en zonas de grandes cultivos y humedales. **Ruddiman** (2003) plantea la hipótesis de una alteración del ciclo natural del CH₄ por parte del hombre hace aproximadamente 5.000 años, basado en su incremento anómalo para el Holoceno, al igual que el CO₂ se esperaría que descendiera siguiendo patrones análogos a los de los ciclos glaciales e interglaciales previos. Por otro lado, la concentración de campos magnéticos solares, conocidos como manchas solares, parecen modular directamente la temperatura del planeta. Esta alteración del ciclo de actividad solar tiene un periodo de aproximadamente 11 años (**Lean et al.**, 1995). Durante la pequeña edad de hielo hubo pocas manchas solares, y paso a conocerse como el mínimo de Maunder (**Maunder**, 1904).

1.2. Las nubes como termostato

La formación de nubes es un proceso que se origina por la interacción entre moléculas de agua evaporadas y rayos cósmicos provenientes del espacio, concretamente por emisiones de supernovas. Esta relación parece ser producto de la ionización de la parte baja de la atmósfera, principalmente por efecto de los rayos cósmicos que generan reacciones a nivel nuclear al ingresar a la atmósfera (**Svensmark**, 1998). Durante periodos de intensa actividad del sol, el viento solar desvía los rayos cósmicos y se inhibe la formación de nubes, por lo que la Tierra recibe una influencia más directa de los rayos del sol (Figura 2). **Shaviv** (2005) realizó una comparación entre el registro de rayos cósmicos y la temperatura en la Tierra para los últimos 600 Ma, y encontró una relación inversa entre los 2 registros. En un artículo clásico, **Dickinson** (1975) analiza la influencia de la radiación solar, así como la cantidad de energía absorbida por las nubes y reflejada por la superficie en el balance de formación de nubes en la tropósfera,

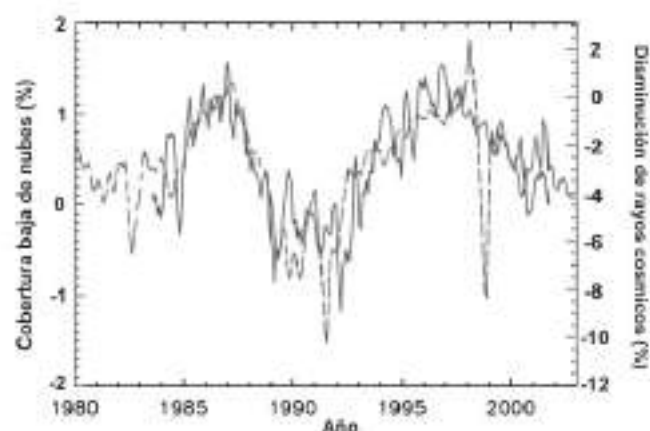


Figura 2. Relación entre la nubosidad en la baja atmósfera (tropósfera) y el porcentaje de rayos cósmicos incidentes (modificado de **Svensmark**, 1998).

observando la relación indirecta entre la nucleación de nubes en esta capa baja de la atmósfera y la radiación solar.

En el presente trabajo se hace una revisión de la variabilidad de la temperatura global durante los últimos 400 años a la luz de los procesos ambientales involucrados en la dinámica de la misma, buscando explorar una relación causa – efecto. Como hipótesis nula se plantea la dependencia del aumento y variabilidad de la temperatura global con la variabilidad de los niveles de CO₂ atmosférico, y la dependencia de esta variabilidad como efecto de la radiación solar. Asimismo, se realizan análisis comparativos con la actividad volcánica para este periodo como posible mecanismo forzante secundario.

2. Métodos

Para este estudio se tomaron datos de reconstrucciones de temperatura global anual para los últimos 400 años (1610-1995 AD) (**Mann et al.**, 2008), concentración de CO₂ atmosférico, forzamiento volcánico (**Mann et al.**, 1998), e irradiación solar (**Lean et al.**, 1995), tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov>). De acuerdo a sugerencias del NRC (National Research Council) en el 2006 estas reconstrucciones de temperatura se realizaron con un conjunto de datos multi-indicadores expandido para periodos decadales a centenales, junto a datos instrumentales actualizados, cuya consistencia se valida con pruebas en experimentos simulados. Es importante considerar sin embargo, el error en la precisión que tienen los modelos de edad, sobretodo para conjuntos de datos con escaso control cronológico (**Telford et al.**, 2004).

Para establecer la correlación entre las diferentes variables ambientales y la señal climática se calculó el coeficiente de correlación de Pearson entre la temperatura y cada una de las variables ambientales: concentración de CO₂, forzamiento volcánico e irradiación solar. Con el fin de determinar la periodicidad en la variabilidad climática, se realizó un autocorrelograma de la serie de temperatura. Finalmente, la correlación en periodicidad de la señal climática se definió mediante un análisis de correlación cruzada con las diferentes variables ambientales y análisis espectral para definir las frecuencias dominantes en la señal. Los análisis y resultados fueron procesados en el programa MATLAB®.

3. Resultados

3.1. Descripción y correlación climática – ambiental

Observando la curva de anomalías de la temperatura de **Mann et al.** (2008) (Figura 3), para los últimos 400 años, es

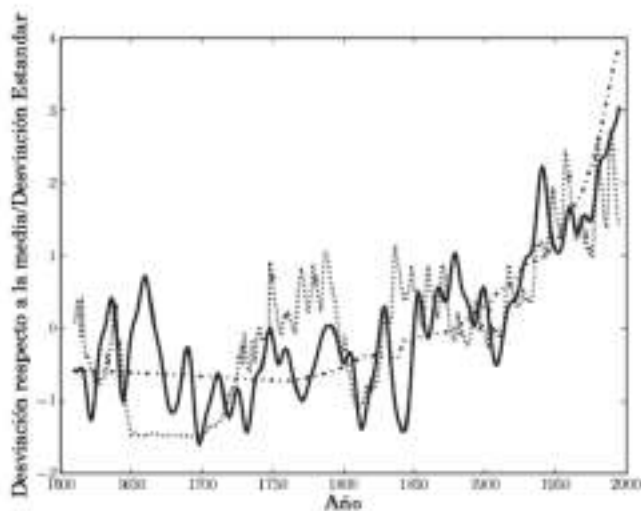


Figura 3. Series de tiempo (línea continua: temperatura, línea discontinua: CO_2 , línea punteada: radiación solar). para los últimos 400 años. Note que aunque la tendencia similar de las tres curvas es similar, la variabilidad entre radiación y temperatura muestra una relación de causa-efecto más notable que con el CO_2 .

aparente la fase final de la llamada pequeña edad de hielo cuyos valores son menores que el promedio. Para este intervalo de tiempo no se alcanza a observar el óptimo climático medieval, pero si se aprecia como las temperaturas vuelven a aumentar en los últimos 120 años, i.e. desde mediados del siglo XIX. Aunque la temperatura media de la Tierra ha subido medio grado centígrado, la mayor parte de este calentamiento ocurrió antes de la revolución industrial ocurrida tras las dos últimas guerras mundiales (van Hoof *et al.*, 2008). De hecho, en la curva se observa que el mayor gradiente de temperatura ocurre antes de 1950.

Por su parte, la curva de CO_2 (Mann *et al.*, 1998) presenta promedios anuales y se pierde la variación semestral que tiene esta variable. Sin embargo, es visible un aumento del gradiente para el último siglo, siendo mayor para las primeras décadas. Para el periodo de postguerra, el gradiente es bajo hasta después de la depresión de 1975 cuando nuevamente aumenta rápidamente hasta la actualidad. La tendencia entre la temperatura y el CO_2 es similar, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0,8537, donde el 72% de la varianza de la temperatura es explicada por la varianza de la concentración de CO_2 (Tabla 1). Siegenthaler (2005) encuentra en un estudio similar pero para un periodo más largo (390-650 años) un coeficiente de correlación más bajo (0,7) entre estos parámetros.

Con respecto a la radiación solar (Lean *et al.*, 1995), es claramente visible la disminución para el final del siglo XVI,

Tabla 1. Coeficientes de correlación de Pearson y determinación entre la temperatura y las variables ambientales.

	r_2	r
CO_2	0.8537	0.7287
Rad. solar	0.6837	0.4675
Forz. volcánico	-0.1223	0.0150

en el llamado Mínimo de Maunder. Aunque la variabilidad de la temperatura puede confundir en periodos interanuales, se observa que corresponde a temperaturas más bajas que el promedio. Para alrededor de 1810 es más clara la relación entre la radiación y la temperatura en el denominado Mínimo de Dalton. El coeficiente de correlación de Pearson entre temperatura y radiación muestra un $r = 0,68$, donde el 47% de la variabilidad de la temperatura es explicada por la variabilidad en la radiación. Dado que en algunos años la relación entre las variables es inversa, se realizó una suavización de los datos para obtener un $\Delta t = 5$ años (Figura 4) para apreciar mejor el intervalo de tiempo para el cual se conjugan la temperatura y la irradiación y se determinó que el acoplamiento de temperatura e irradiación se refleja mejor en periodos promedio de 5 años.

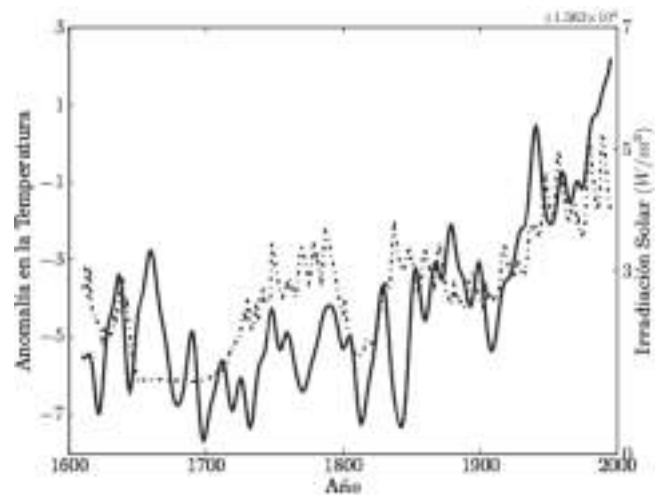


Figura 4. Sobreposición de la temperatura global (línea continua) y la irradiación solar (línea punteada) aplicando un promedio $\Delta t = 5$ años. Con esta visualización de los datos se observa mejor la correspondencia entre las 2 variables.

Finalmente, la relación entre el forzamiento volcánico y el calentamiento aparece más claramente cuando se realiza un suavizado de las series de datos obteniendo un $\Delta t = 10$ años (Figura 5). Al parecer el efecto de las nubes de ceniza provocadas por las erupciones en este intervalo de tiempo, se refleja en una disminución de la temperatura global.

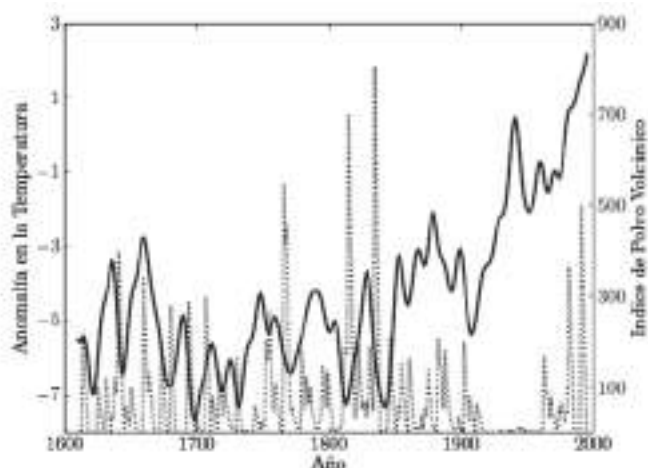


Figura 5. Sobreposición de la temperatura global (línea continua) con la actividad volcánica (línea punteada) aplicando un suavizado con $\Delta t = 10$ años. Note como los momentos de máxima actividad volcánica decadal se correlacionan inversamente con periodos de temperaturas bajas.

No se realizó análisis de correlación cruzada entre esta variable y la temperatura puesto que el volcanismo no es un fenómeno con una recurrencia definida, y su efecto es más bien de forzamiento secundario. Se encuentra en este caso que la relación es inversa, tal como lo indica el coeficiente de correlación ($r = -0,1223$) y la anti-fase presente para varios periodos en nuestra serie de tiempo.

3.2. Periodicidad y frecuencia de la señal climática

El análisis de periodicidad y autocorrelación de la serie de CO₂, refleja que no responde a una frecuencia particular y se trata de una variable en aumento sin ciclicidad. Esto puede deberse a la longitud de la serie, que puede no alcanzar a mostrar periodos mayores de la señal. **van Hoof et al.** (2008) realizan una reconstrucción de los niveles de CO₂ preindustriales con base en vegetación preservada en lagos y humedales y encuentra que el CO₂ no debe descartarse como modulador climático para periodos anteriores a la industrialización. Por otro lado, el diagrama de correlación cruzada entre temperatura y radiación solar (Figuras 6a y 6c), muestra que ambas responden a un periodo aproximado de 20 años, el cual estaría asociado a los ciclos de manchas solares de aproximadamente 11 años (**Lean et al.**, 1995). De acuerdo al IPCC, desde la época preindustrial (1750), hasta el presente, la irradiancia solar ha aumentado gradualmente causando un pequeño forzamiento radiativo (0.3 Watt/m²) en el balance energético del sistema Tierra- atmósfera el cual es pequeño en comparación con el forzamiento radiativo debido al incremento del CO₂ durante el mismo periodo (1.66 Watt/m²) (**IPCC**

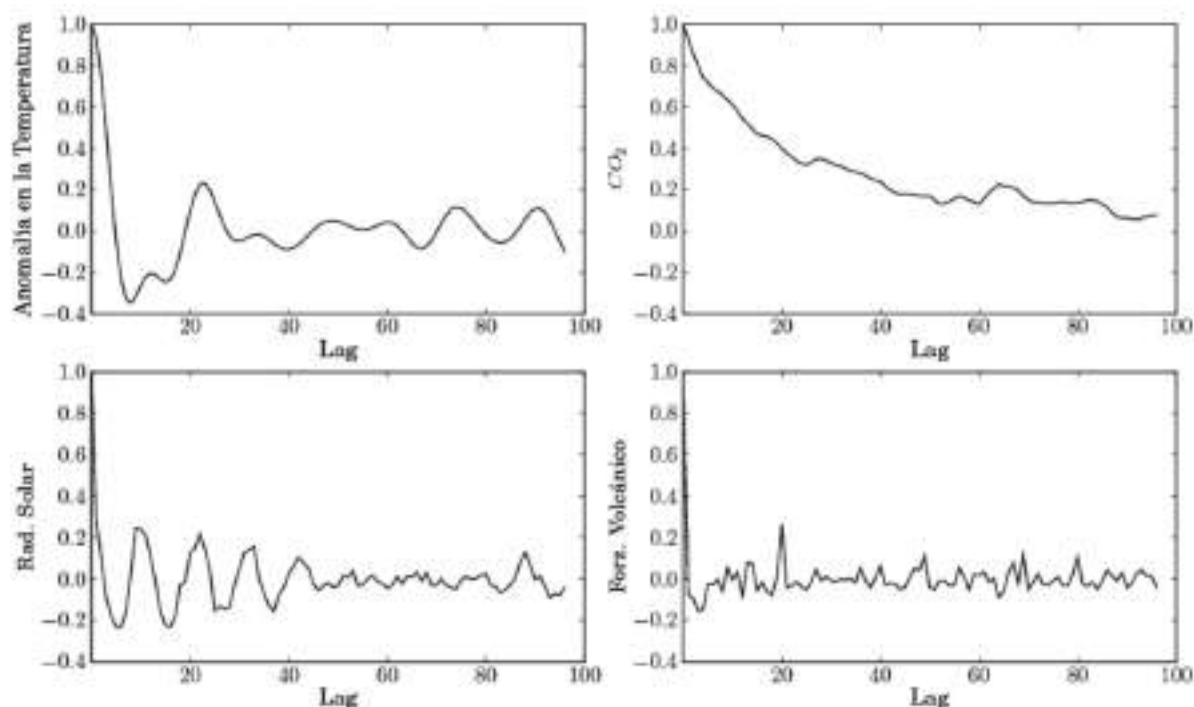


Figura 6. Diagramas de auto correlación para a) temperatura global, b) concentración de CO₂, c) radiación solar, d) actividad volcánica. Note que para las variables de temperatura y radiación hay un coeficiente de autocorrelación destacado para un periodo aproximado de 20 años.

technical summary, 2007). Este pequeño valor de forzamiento, 0.3 Watt/m², incluye el efecto de las manchas solares.

Este resultado concuerda con los periodos encontrados en el espectro de frecuencias de la temperatura (Figura 7), donde se observa una variación periódica concordante entre 20-22 años.

Los registros de actividad solar encontrados (**Friis-Christensen & Lassen, 1991**) revelaron una concordancia notable entre esta variable y la temperatura en la Tierra para los últimos 400 años, lo que al parecer muestra que es el sol y no el CO₂ el principal regulador del clima en la Tierra. A pesar de esto, el coeficiente de correlación entre la radiación solar y la temperatura $r = 0,68$ es menor que con el CO₂, ($r = 0,85$). Esto puede deberse a que el CO₂ se comporta como una variable en aumento directo sin la variabilidad intrínseca que posee la radiación solar.

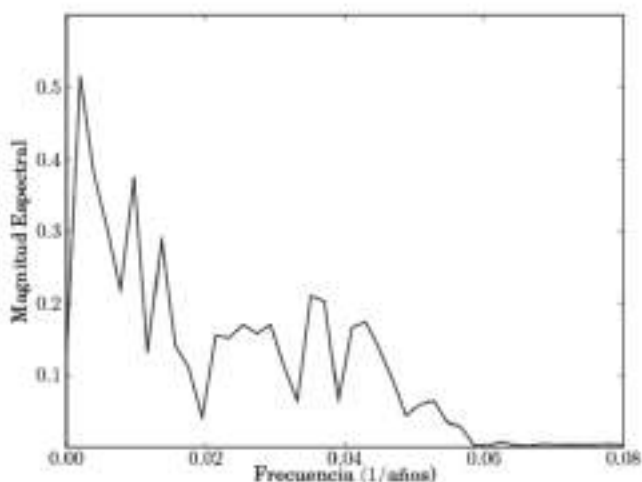


Figura 7. Espectro de frecuencia para la temperatura. El resultado debe interpretarse para frecuencias iguales a la mitad del rango de datos, en este caso 400 años, por lo tanto los periodos significativos en esta gráfica son 0,035 y 0,045 que corresponden a una frecuencia aproximada de 20-22 años.

4. Conclusiones

El escenario resultante de nuestros análisis sugiere la existencia de una relación estrecha entre las tendencias de las curvas de temperatura global y la concentración de CO₂ atmosférico. Sin embargo, encontrar una relación causa y efecto entre estas 2 variables requiere considerar el proceso de interacción no lineal de retroalimentación entre ellas, el cual provoca que el efecto refuerce o disminuya la

causa y viceversa. Por otra parte, la radiación solar presenta una variabilidad comparable con la de la temperatura, coincidiendo en periodos de más o menos 22 años que podrían relacionarse a la periodicidad de los ciclos de manchas solares de 11 años. El volcanismo muestra una relación inversa incipiente con la temperatura, mejor observada para un análisis de variación decadal.

Una de las maneras de asegurar que la relación entre series de tiempo es certera es considerar un intervalo de tiempo mayor, por lo que es recomendable realizar un ejercicio similar para datos que vayan más allá del Holoceno, tal como el realizado por **Siegenthaler (2005)** utilizando la serie de tiempo obtenida de los núcleos de Vostok en la Antártida o similares que abarcan un periodo que va hasta los 400 años. En una serie tal, es posible hallar nuevas periodicidades y establecer una relación más clara entre las variables estudiadas.

5. Agradecimientos

Esta contribución forma parte de los estudios de Maestría en Ciencias de la Tierra, Universidad EAFIT, de los tres primeros autores. Los autores agradecen al Dr. Juan D. Restrepo, al Dr. Jose Ignacio Martínez y al evaluador de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales por sus aportes técnicos y sugerencias al manuscrito. G. Bayona & Y. García agradecen a la Fundación *Leverhulme Trust* (Inglaterra) por el apoyo económico. H. R. Sarmiento agradece a ECOPETROL-ICP por el aporte económico. Los datos utilizados en este análisis fueron tomados de la base de datos de la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov>).

6. Referencias

- Bradley, RS. & Jonest, PD.** 1993. 'Little Ice Age' summer temperature variations: their nature and relevance to recent global warming trends. *The Holocene* **3**(4): 367-376.
- Burch DE, Gryvna, DA. & Patty, RR.** 1968. Absorption of infrared radiation by CO₂ and H₂O. II. Absorption by CO₂ between 8000 And 100000 cm⁻¹(1-1.25 Microns). *J. Opt. Soc. Am.* **58**(3): 335-340.
- Dickinson, RE.** 1975. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* **56**(12): 1240-1248.
- Friis-Christensen, E & Lassen, K.** 1991. Length of the solar cycle: An indicator of solar activity closely associated with climate. *Science* **254**(5032): 698-700.
- Gerlach, T.** 1991. Present-day CO₂ emissions from volcanoes. *Transactions of the American Geophysical Union (EOS)* **72**(23): 254-255.
- Houghton, JT., Ding, Y., Griggs, DJ., Noguer, M., van der Linden, PJ., Dai, X., Makell, K., Johnson, CA.** 2001. Climate

- Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 94 p.
- Hughes, MK & Diaz, HF.** 1994. Was there a Medieval Warm Period', and if so, where and when?. *Climatic Change* **26**(2): 109-142.
- Idso, SB.** 1998. CO₂-Induced Global Warming: A Skeptics View of Potential Climate Change, *Clim Res* **10**(1): 69-82.
- IPCC, Technical Summary.** 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report.
- Jones, PD & Mann, ME.** 2004. Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics* **42**: 1-42.
- Jones, TJ, Osborn, & Briffa, KR.** 2001. The evolution of climate over the last millennium. *Science* **292**: 662-666.
- Joos, F. & Spahni, R.** 2008. Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20,000 years. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(5): 1425-1430.
- Karl, TR. & Trenberth, KE.** 2003. Modern global climate change. *Science* **302**(5651): 1719-1723.
- Lean, J., Beer, J. & Bradley, R.** 1995. Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. *Geophysical Research Letters* **22**: 3195-3198.
- Mann, ME., Bradley, RS. & Hughes, MK.** 1998. Global scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries. *Nature* **392**: 779-787.
- , **Zhang, Z., Hughes, MK., Bradley, RS., Miller, SK., Rutherford, S. & Ni, F.** 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **105**(36): 13252-13257.
- Maunder, EW.** 1904. Note on the distribution of sun-spots in heliographic latitude, 1874-1902. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **64**: 747-761.
- Telford, R., Heegaard, E., Birks, H.** 2004. All age-depth models are wrong: but how badly?. *Quaternary Science Review* **23**: 1-5.
- Ruddiman, WF.** 2003. The anthropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change* **61**: 261-293.
- Shaviv, NJ.** 2005. On climate response to changes in the cosmic ray flux and radiative budget, *Journal of Geophysical Research*, **110**: A8.
- Siegenthaler, U., Stocker, T., Monnin, E., Lüthi, D., Schwander J., Stauffer, B., Raynaud D., Barnola, JM., Fischer, H., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J.** 2005. Stable Carbon Cycle-Climate Relationship During the Late Pleistocene. *Science* **310** (5752): 1313-1317.
- Svensmark, H.** 1998. Influence of cosmic rays on earth's climate, *Phys. Rev. Lett.* **81**(22): 5027-5030.
- Telford, R. Heegaard E, Birks H.** 2004. All age-depth models are wrong: but how badly?. *Quaternary Science Review* **23**: 1-5.
- van Hoof, TB., Wagner-Cremer, F., Kurschner, WM. & Visscher, H.** 2008. A role for atmospheric CO₂ in preindustrial climate forcing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105**(41): 15815-15818.
- Wallace, JM. & Hobbs, PV.** 1977. *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, Academic Press, 504 p.
- Wunsch, C.** 1996. *The ocean circulation inverse problem*. Cambridge, University Press 442 p.

Recibido: noviembre 25 de 2009

Aceptado para su publicación: septiembre 12 de 2010

