

UN MECANISMO SOLAR DEL TIEMPO

Por Charles A. PERRY¹

Introducción

A veces puede encontrarse una correlación entre las variaciones solares (principalmente el número de manchas solares) y las variaciones del tiempo en la Tierra. Sin embargo, aún después de cientos de artículos, continúa habiendo una falta de mecanismo lógico que relacione físicamente estas variaciones. Desde el comienzo de la era espacial, las medidas de la energía del Sol, tomadas muy por encima de la atmósfera, sólo han revelado pequeñas variaciones de la radiación solar total. Estos pequeños cambios de energía pueden ser la "Piedra de Rosetta"² para las relaciones entre el sol y el tiempo.

Hasta la documentación de la asociación de las oscilaciones magnéticas solares con la emisión de energía solar (Kuhn y otros, 1988) no había existido un proceso de forzamiento externo bien establecido para explicar los ciclos climáticos multianuales. Las medidas del NIMBUS-7 han revelado desde 1978 que la radiación solar total tiene una variación media de al menos 0,1 % a lo largo del periodo de 11 años del ciclo de una mancha solar (Willson y Hudson, 1988). Sin embargo, durante el periodo del que se tienen registros, también han tenido lugar variaciones de hasta 0,1% en un mes o en un solo año. El flujo solar de 10,7 cm ha sido medido en la Tierra desde 1947 y, también, muestra una distribución que se corresponde con las oscilaciones magnéticas solares (Lean y Foukal, 1988). Se dispone de estimaciones de la radiación solar total entre 1874 y 1988 basadas en modelos empíricos usando la actividad solar pasada (Foukal y Lean, 1990). La radiación solar puede jugar un papel importante en el sistema climático mundial, pero las variaciones son pequeñas y su efecto debe amplificarse para originar variaciones climáticas importantes.

Un medio posible de amplificación pudiera ser los océanos. Las variaciones de la temperatura del agua de los océanos, específicamente las anomalías de la temperatura de la superficie del mar (TSM) se han relacionado con las anomalías de la presión atmosférica (Wallace y otros, 1990). Existen indicaciones de que la TSM anormalmente fría que llegó al Pacífico Oriental puede haber sido responsable de la grave sequía de América del Norte en 1988 (Palmer y Brankovic, 1989). Las corrientes oceánicas sirven como importantes conductores de energía desde los trópicos hacia los polos. Es concebible que las corrientes oceánicas puedan transportar masas de agua anormalmente fría o cálida hasta lugares donde el aumento o disminución de la proporción de evaporación pueda alterar la humedad atmosférica y la distribución de presión, afectando por último la precipitación regional. Pequeños cambios en la cantidad de energía solar inyectada en los océanos pueden afectar significativamente su temperatura. Los factores que afectan a la cantidad de energía solar que llega a la superficie de la Tierra incluyen la cubierta nubosa, la turbiedad atmosférica, la latitud y la estación del año. Un factor de importancia, previamente ignorado, puede ser las variaciones de la radiación solar total. En este artículo se presenta una hipótesis de una relación entre el sol y el tiempo basada en las variaciones de la radiación solar y se establecen correlaciones que poyan estas hipótesis.

Mecanismo propuesto entre el sol y el tiempo.

El mecanismo que se propone para la existencia de una relación entre las variaciones de la radiación solar con el tiempo regional tiene tres componentes básicos, que son:

¹ Hidrólogo investigador, US Geological Survey, Water Resources Division, Lawrence, Kansas, USA

² Una loseta de basalto negro, encontrada en 1799 en Rosetta, cerca de Alejandría, Egipto, en la que estaban grabadas inscripciones paralelas en jeroglíficos egipcios, en caracteres demóticos (una forma cursiva de los jeroglíficos) y en griego. Proporcionó la clave para el conocimiento de la escritura jeroglífica y fue la base para traducir todos los textos en jeroglífico egipcio. Está ahora en el Museo Británico, Londres (Ed.)

- Absorción de la energía solar en océanos tropicales transparentes por una capa superficial gruesa;
- Transporte de esta energía por corrientes oceánicas importantes; y
- Transferencia de esta energía por evaporación en humedad atmosférica y sistemas de baja presión que son favorables para la formación de precipitación (Perry, 1992).

Cada componente individual de este mecanismo tiene complejidades inherentes que pueden ser difíciles de separar. Sin embargo, la energía del sol es la fuerza generadora del tiempo y del clima y cualquier variación de esta energía debe tener un efecto directo en la formación de la precipitación y su distribución.

Absorción

Aunque hay una buena correlación entre la TSM y los parámetros atmosféricos (Wallace y otros, 1990), no es la superficie del océano la que almacena la mayoría de la energía solar. El espectro visible contiene aproximadamente la mitad de la energía total que el Sol envía a la superficie de la Tierra (Loiv, 1980) y estas longitudes de onda pueden penetrar muy por debajo de la superficie del océano. Lewis y otros (1990) demostraron que la radiación solar en frecuencias visibles, que generalmente se supone que son absorbidas por la superficie del mar, penetran hasta una profundidad significativa por debajo de la capa de mezcla oceánica superior que interacciona directamente con la atmósfera.

La profundidad de penetración depende de la transparencia del agua oceánica. Esta transparencia depende, a su vez, de la cantidad de material biogénético, pigmentos de fitoplancton y productos de degradación. En el océano Pacífico, la transparencia aumenta de este a oeste, teniendo lugar la mayor penetración de la energía solar en el Pacífico Occidental Tropical. Otros lugares de máxima penetración incluyen el Atlántico Occidental Tropical, el Caribe y el océano Índico Tropical.

Una diferencia de tan sólo 1 W m^{-2} en la cantidad de energía que alcanza la superficie (0,1 por 100 de la variación de la radiación total) y que penetra el océano puede equivaler a una diferencia mensurable de la temperatura del océano. Si esta diferencia perdura un periodo de un año (lo que ha ocurrido según los

datos de las observaciones de la radiación solar), y suponiendo que el 75% de esta diferencia de energía es absorbida por los 10 m superiores del océano, esta columna de agua tendría una variación de temperatura de $0,5^{\circ}\text{C}$. Si esto tiene lugar en una zona de varios miles de kilómetros cuadrados, esta pequeña variación en temperatura oceánica resultaría en una gran variación de la energía disponible.

Transporte

Las corrientes oceánicas transportan la energía acumulada en los trópicos hacia los polos. El circuito del océano Pacífico norte es el mayor del mundo, con una circunferencia exterior de aproximadamente 25 000 km. Tiene una circulación en el sentido de las agujas del reloj con las corrientes superficiales más rápidas en la sección noroeste, exactamente al este del Japón, y las corrientes más lentas al oeste de México. Las velocidades típicas de las corrientes oceánicas varían entre 1 a 16 km d^{-1} (Niler, 1986). Tomando una velocidad media de 5 a 8 km d^{-1} , una vuelta completa duraría aproximadamente de 9 a 12 años. El lapso del traslado desde el Pacífico Occidental Tropical hasta cerca de Norteamérica duraría algo menos que la mitad de este lapso (cuatro a cinco años), porque las corrientes son generalmente más rápidas en la mitad noroccidental del circuito. Favorite y Melain (1973) mostraron un lapso de translación de cuatro años para un máximo de TSM desde el Pacífico occidental tropical hasta las aguas costeras del oeste de los estados de Washington y Oregon.

Merecen discusión otros dos esquemas de circulación en el Pacífico Norte. La contracorriente Ecuatorial fluye hacia el este entre las secciones de flujo occidental de los circuitos del Pacífico Norte y el Sur. Sobre esta contracorriente se desplaza el infame y elusivo calentamiento oceánico *El Niño* y el enfriamiento oceánico de *La Niña*. El otro esquema de circulación importante es el flujo en sentido contrario a las agujas del reloj del circuito del Golfo de Alaska.

El circuito del Pacífico y sus circulaciones secundarias son los transmisores de la energía solar absorbida desde el Pacífico tropical central y occidental hasta regiones del norte y al este. Si la energía procedente del Sol varía a escala cronológica de meses a años, diferentes

partes del circuito se calentarán a diferentes temperaturas a lo largo de su circulación. Durante un periodo de menor radiación una parte o embalse del océano tropical recibirá menos energía y será anormalmente frío, mientras radiaciones mayores darán lugar a embalses anormalmente cálidos. Estos embalses de agua ligeramente más caliente o más fría pueden propagarse siguiendo el circuito del Pacífico como en un tiovivo.

Trasferencia de energía hacia la atmósfera

En los trópicos, el flujo neto de energía es en sentido descendente hacia el océano, mientras que en latitudes más altas, el flujo es ascendente. La energía se transfiere desde el océano a la atmósfera por medio de dos procesos; evaporación y una combinación de conducción y convección. De estos procesos: la evaporación es, con gran diferencia, el más importante.

La evaporación desde la superficie del océano es el mecanismo que podría amplificar el efecto de las variaciones de radiación solar. La presión del vapor de agua aumenta aproximadamente un 7 por 100 por cada °C de aumento de temperatura del agua entre 5 y 15 °C. Por consiguiente, una anomalía positiva de 1°C en la TSM podría ocasionar aproximadamente un 7 por 100 de aumento en la cantidad de energía disponible en la atmósfera. Variaciones en la presión del vapor de agua en la superficie del mar pueden alterar significativamente los campos de humedad de la atmósfera, a partir de los cuales pueden tener lugar posteriores amplificaciones no lineales según procesos dinámicos atmosféricos.

Correlaciones entre la radiación solar y la precipitación

La hipótesis de que la combinación de la absorción de energía solar por el agua del Océano Pacífico occidental, el transporte de esta energía por las corrientes del circuito del océano Pacífico y la modificación de la atmósfera por embalses de agua más fría o más caliente afectando las distribuciones de precipitación en Norteamérica, se puede poner a prueba correlacionando las variaciones de radiación solar con las variaciones en la precipitación regional.

Datos de radiación solar

La radiación solar se ha medido en el espacio por medio de sensores del Experimento del balance de radiación de la Tierra (ERB) por medio del satélite NIMBUS-7 desde noviembre de 1978 (Hickey y otros, 1980). En la actualidad (1993), estas medidas abarcan 14 años de datos casi continuos. Sin embargo, catorce años es un periodo corto para su comparación con datos climáticos.

Afortunadamente, Lean y Foukal (1988) desarrollaron un modelo empírico para la radiación solar total que se basa en excesos de radiación de fáculas magnéticas brillantes y en los cambios en la radiación disminuida de manchas solares oscuras. Usando este modelo se hicieron estimaciones de fáculas magnéticas brillantes desde 1954 usando flujos diarios de 10,7 cm (Lean y Foukal, 1988). Las estimaciones de la radiación se extendieron hacia atrás hasta 1874 por Foukal y Lean (1990), usando medias mensuales del número de manchas solares en lugar del flujo de 10,7 cm. Este modelo posterior se basaba en la correlación entre el número de manchas solares mensuales y el flujo mensual de 10,7 cm entre 1947 y 1988. Debido a que el flujo de 10,7 cm se midió en 1947, se supuso que tenía la mayor fiabilidad para el periodo de 1874 a 1988, el periodo de 42 años 1947-1988 de valores mensuales de radiación. Los valores de radiación generados por este último modelo se muestran en la figura 1 (a). Este artículo está basado en la hipótesis de que el aumento o disminución de la radiación solar tiene un efecto en el clima. Por consiguiente, se determinaron las diferencias mensuales (figura 1 (b) y el promedio anual (enero a diciembre) de las diferencias mensuales de la radiación solar, figura 1 (c).

Datos de precipitación regional

Los datos de precipitación mensual de EE.UU., se ordenaron en 344 regiones, de acuerdo con la división de los datos climatológicos por Estados (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, 1989). Estas regiones incluían todos los estados, excepto Alaska y Hawái. La precipitación anual media de cada región es la media aritmética de las estaciones dentro de esa región desde enero a diciembre. El

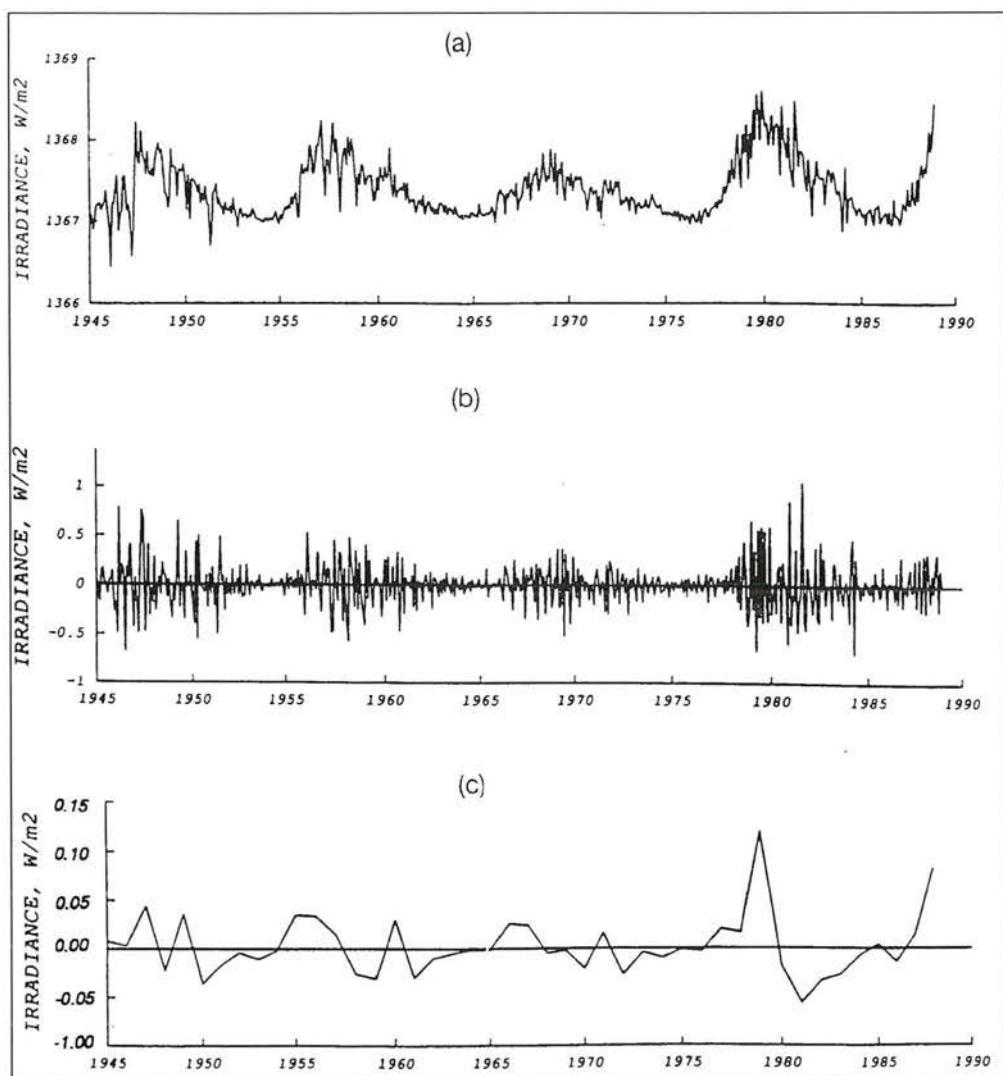


Figura 1 – Valores modelados empíricamente de a), radiación solar mensual; b), diferencias mensuales de radiación solar, y c), medias anuales de las diferencias mensuales de la radiación solar. 1945-1988.

número de estaciones dentro de cada división varía entre menos de 5 a más de 50.

Correlaciones

Se calcularon los coeficientes de correlación entre las medias anuales de las diferencias mensuales de los valores del modelo de radiación solar (medias de radiación anual) y los valores medios anuales de la precipitación para cada una de las 344 regiones para el periodo 1950-1988 y lapsos de 0 a 7 años. Los coeficientes de correlación (R) para los 8

lapsos de las 344 regiones variaban entre $-0,51$ y $+0,65$. Para ser significativo en el nivel del 1%, R debe ser menor que $0,37$. El mayor coeficiente de correlación ($R=0,65$) se obtuvo en el noroeste del Pacífico cuando los intervalos de los promedios de radiación anual eran de cuatro años. Con este intervalo, las sequías coincidieron con períodos de menor radiación media (disminución de energía disponible) y la precipitación mayor que la media coincidió con períodos de mayor radiación media (aumento de la energía disponible). Las altas correlaciones para

intervalos de un retraso de cuatro años corresponden con el lapso estimado del recorrido de las aguas oceánicas desde el Pacífico Occidental Tropical hasta las aguas cercanas a Oregón y Washington y proporciona una confirmación de la hipótesis sol y tiempo. La figura 2 muestra ejemplos de la correlación entre las medias de las precipitaciones anuales con lapsos de retrasos de cuatro años y la media de radiación anual para dos regiones. Una región de abundante precipitación (la media de 39 años es aproximadamente 200 cm) se muestra en la figura 2 a), utilizando datos de la región costera de Oregón. La figura 2 b) representa una región de precipitación escasa (la media de 39 años es aproximadamente 44 cm), utilizando datos de la región 10 del sudeste de Washington, la zona de las montañas Azules Palouse. También se obtuvieron coeficientes de correlación $R > 0.50$ para la zona sudeste de EE.UU., y a lo largo de la costa occidental para un lapso de recorrido de cuatro años (fig. 3). Esto podría explicarse

como una reflexión de una onda larga, configuración vaguada-dorsal-vaguada, forzada por las temperaturas del océano Pacífico. En Texas, Nuevo México, Montana Oriental, Wyoming Norte Oriental y la zona occidental de Dakota del Norte y del Sur se obtuvieron correlaciones relativas débiles intermedias entre las zonas de correlaciones positivas, mantenidas por la configuración vaguada-dorsal-vaguada.

La correlaciones más altas se obtuvieron con el lapso de retraso de cuatro años, pero existen correlaciones significativas con otros lapsos, lo que sugiere la influencia de otras fuentes oceánicas de energía que occasionen precipitaciones en otras regiones de EE. UU. Para lapsos de retraso de tres años se obtienen coeficientes de correlaciones positivos significativos para regiones de California. La correlación positiva para un lapso de retraso de tres años pudiera tener su origen en anomalías de temperatura de las aguas que llegan al oeste de la Baja California después de

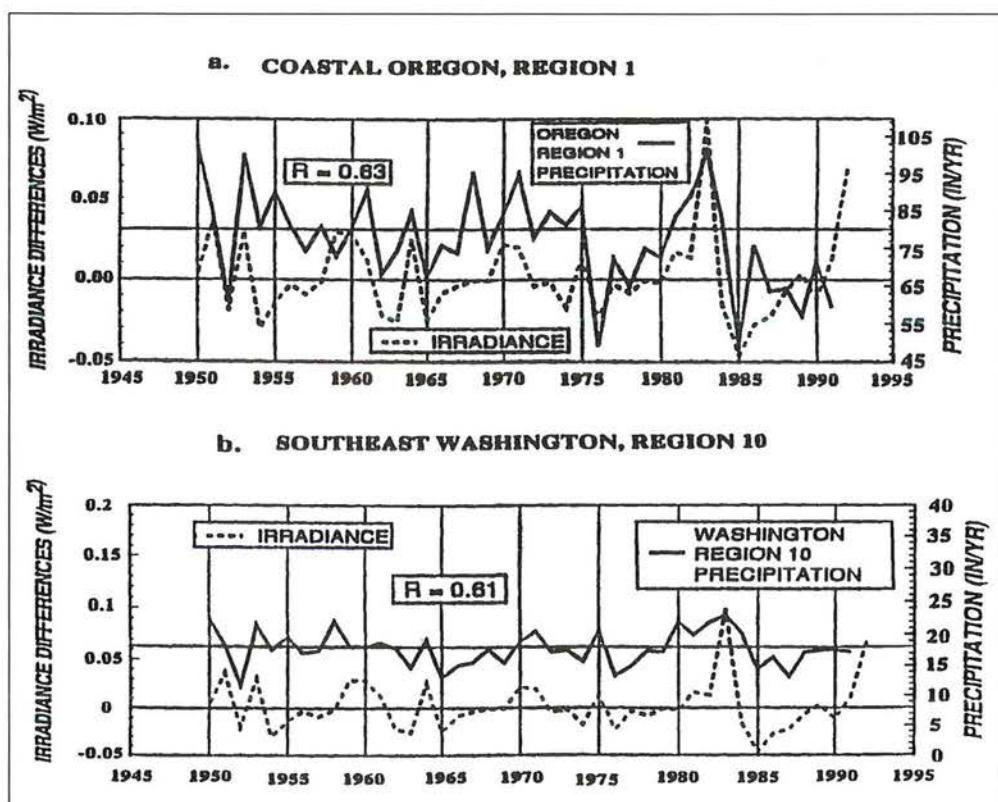


Figura 2 – Correlaciones entre precipitaciones y diferencias de radiación para a), región costera de Oregón, y b), región 10 del sureste de Washington.

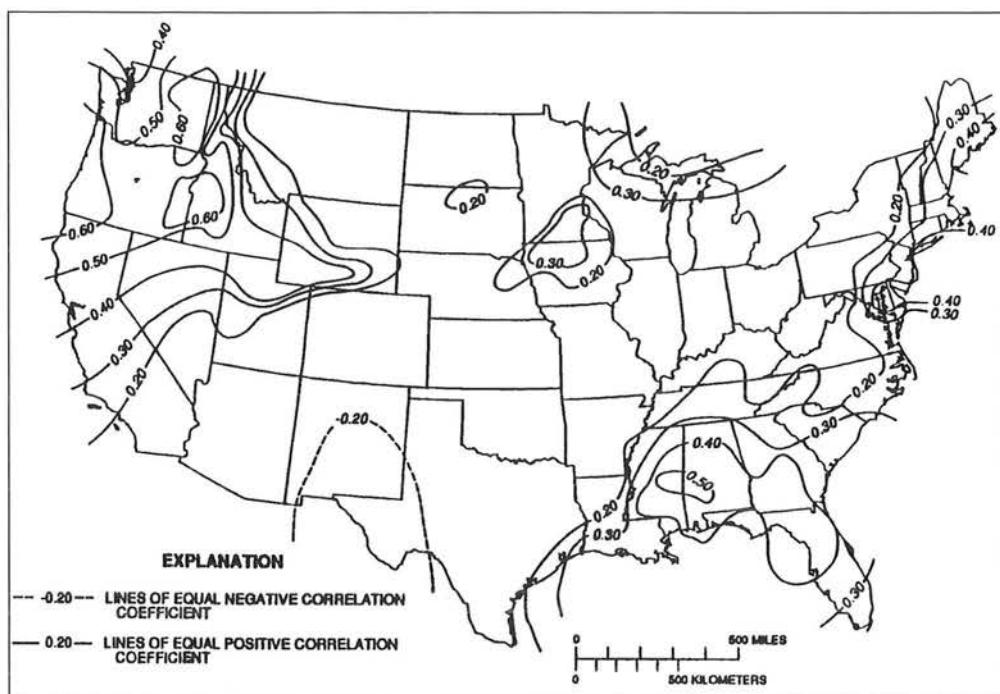


Figura 3 – Coeficientes de correlación para regresiones de precipitación anual regional con las medias anuales de las diferencias de radiación mensual para un periodo de retraso de 4 años, durante el periodo 1950-1988.

trasladarse por el Océano Pacífico Central Tropical a lo largo de la Contracorriente Ecuatorial. Desde Texas hasta Nebraska se obtienen coeficientes de correlación positiva significativos con dos años de lapso de retraso, indicando la posibilidad de anomalías de temperaturas en el mar Caribe y el Golfo de México, que afectan la precipitación de los estados llanos.

Una causa posible de las sequías de siete años en la mayoría de los Estados de la costa occidental desde 1984 a 1992 puede haber sido el periodo de diferencias negativas persistentes de radiación solar que hubo de 1980 a 1987 (figuras 2 a y 2 b). Este periodo parece ser el más largo dentro de los últimos 42 años de utilizar el modelo de radiación y puede haber contribuido a crear las zonas muy extensas de anomalías negativas de TSM observadas en el Pacífico Norte desde 1984 a 1990. Los aumentos significativos en radiación solar que ocurrieron durante 1988 pueden ser responsables de las precipitaciones superiores a la media que están ocurriendo en la actualidad (invierno 1992/1993) en el Pacífico Noroeste.

Las variaciones de radiación solar se

correlacionan con las precipitaciones en el Pacífico Noroeste y otras zonas de EE.UU., pero ¿hay otros fenómenos que muestren una relación con las variaciones de radiación? Un fenómeno de este tipo puede ser *El Niño*. En 1982-1983 *El Niño* tuvo el calentamiento más intenso de TSM desde 1950 en Puerto Chicana, Perú (Enfield, 1988); ocurrió tres años más tarde que el mayor aumento total de energía de radiación solar durante el mismo periodo cronológico. La Contracorriente Ecuatorial pudo haber transportado un embalse de agua muy cálida desde el Pacífico Central-Oeste al Pacífico Este durante el intervalo de estos tres años. *El Niño* de 1986/1987 pudo haber sido debilitado sustancialmente por la diferencia negativa de radiación solar de 1983/1984 y el intenso *El Niño* de 1991/1992 fue intensificado por las diferencias positivas de 1988 (fig. 1 c). El intenso *La Niña* de 1988 se corresponde con las fuertes diferencias negativas de radiación solar que hubo en 1985.

Conclusiones

Medias anuales de diferencias mensuales de

valores de modelos empíricos de radiación solar muestran correlaciones significativas con las precipitaciones anuales regionales para ciertos lapsos de retraso. Los períodos de radiación media anual intensificada corresponden a períodos de precipitación intensificada, mientras que períodos de medias inferiores a lo normal corresponden a precipitaciones inferiores en el Pacífico Noroeste cuando la radiación se retrasa cuatro años. El lapso que tarda el agua que procede del Océano Pacífico Tropical Occidental cálido en llegar al Golfo de Alaska siguiendo el circuito del Pacífico es también, aproximadamente, de cuatro años; una evidencia adicional de los mecanismos de transferencia oceánica.

Estas correlaciones significativas controlan un mecanismo entre el Sol y el tiempo que implica una combinación de procesos de absorción, transporte y transferencia de las cantidades variables de energía desde el Sol hacia los océanos y retorno a la atmósfera. La energía en el espectro visible puede penetrar en los océanos y bastante por debajo de la capa de mezcla. Esta energía se transporta por las intensas corrientes oceánicas hasta lugares donde el flujo de energía se dirige hacia arriba, en la atmósfera. Los efectos de las variaciones de la radiación solar pueden amplificarse por el aumento del 7 por 100 de la presión de vapor de agua por cada 1°C de aumento de la temperatura del océano. La energía se transfiere a la atmósfera y queda disponible para la formación de depresiones que producen precipitaciones.

La persistente sequía del occidente de EE.UU. desde 1985 a 1991 puede relacionarse con un período de disminución de la radiación solar que ocurrió entre 1981 y 1987. La precipitación que acabó con la sequía durante el invierno de 1992/1993 se produjo cuatro años más tarde que el fuerte aumento de radiación de 1988. Los fenómenos de *El Niño* y *La Niña* pueden ser intensificados o disminuidos por el mismo proceso de inyección de energía variable en el océano, transporte y amplificación por evaporación. En realidad, el examen de los datos regionales de precipitación en otras partes del mundo puede sugerir otros procesos de absorción, transporte y evaporación (lapsos de retraso), que son función de la posición singular de la región con respecto a los océanos.

Referencias

- BEER, T., 1983: *Environmental Oceanography*, Pergamon Press, Oxford, 206 pp.
- ENFIELD, D.B., 1988: Is *El Niño* becoming more common? *Oceanography*, November 1988, 23-59.
- FAVORITE F. and D.R. McLAIN 1973: Coherence in trans-Pacific movements of positive and negative anomalies of sea surface temperature, 1953-1960. *Nature*, **244**, 139-143.
- FOUKAL, P. and J. LEAN, 1990: An empirical model of total solar irradiance variation between 1874 and 1988. *Science*, **247**, 556-559.
- HICKEY, J.R., P. PELLEGRINO, R.H. MASHHOFF, F. HOUSE, and T.H. VONDER HAAR 1980: Initial solar irradiance determination from NIMBUS-7 cavity radiometer measurements. *Science*, **208**, p. 281.
- KUHN, J.R., K.G. LIBBRECHT, and R.H. DICKE, 1988: The surface temperature of the Sun and changes in the solar constant. *Science*, **242**, 908-911.
- LEAN, J. AND P. FOUKAL, 1988: A model of solar luminosity modulation by magnetic activity between 1954 and 1984. *Science*, **240**, 906-908.
- LEWIS, M.R., M. CARR, G.C. FEIDMAN, W. ESAIAS and C. McCCLAIN, 1990: Influence of penetrating solar radiation on the heat budget of the equatorial Pacific Ocean. *Nature*, **347**, 543-545.
- LIOV, K.N., 1980: *An Introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, New York, 392 pp.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 1989: *Climatological Data for the United States*. National Climatic Center, Asheville, North Carolina.
- NIILER P.O. 1986: The observational basis for largescale circulation In: *General Circulation of the Ocean*. H.D.I. ABARBANEL and W.R. Young (Eds.), Springer Verlag, New York, 29 pp.
- PALMER, T.N. and C. BRANKOVIC, 1989: The 1988 US drought linked to anomalous sea surface temperature. *Nature*, **338**, 54-57.
- PERRY, C.A., 1992: A correlation between precipitation in the Western United States and solar irradiance variations. *Proceedings of the American Water Resources Association Conference Managing Water Resources During Climate Change*, Reno, Nevada, 1-6 November, 721-729.
- WALLACE, J. M., C. SMITH, and Q. JIANG, 1990: Spatial patterns of atmosphere-ocean interaction in the northern winter. *Journal of Climate*, **3**, 990-998.
- WILLSON, R. C., and H.S. HUDSON, 1988: Solar luminosity variations in solar cycle 21. *Nature*, **332**, 810-812.