



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA – INSTRUMENTACIÓN

ANÁLISIS INSTRUMENTAL E HISTÓRICA DE LOS FORZAMIENTOS RADIATIVOS
EXTERNOS E INTERNOS DURANTE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
MARÍA DEL CARMEN LEAL SILVA

TUTOR PRINCIPAL
VÍCTOR MANUEL, VELASCO, HERRERA, INSTITUTO DE GEOFISICA
COMITÉ TUTOR
DR. ERNST KUSSUL MIKHAILOVICH, CCADET
DR. HÉCTOR BENÍTEZ PÉREZ, IIMAS
DRA. TETYANA BAYDYK MYKOLAIVNA, CCADET

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Kussul Ernst Mikhailovich
Secretario: Dra. Baydyk Mykolaivna Tetyana
Vocal: Dr. Velasco Herrera Víctor Manuel
1^{er.} Suplente: Dr. Urrutia Fucugauchi Jaime Humberto
2^{do.} Suplente: Dr. García Ugalde Francisco

Posgrado de Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Víctor Manuel Velasco Herrera

FIRMA

Con cariño a:
Jesús, Alicia, Abril y Aimé

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, Posgrado de Ingeniería y al Instituto de Geofísica por el apoyo brindado durante mis estudios.

Agradezco a la UNAM por la beca que recibí para la realización de mis estudios en el programa de Doctorado en Ingeniería.

A mi asesor de Tesis, el Dr. Víctor Velasco Herrera por su apoyo para la realización de este trabajo.

Agradezco a mi comité tutorial y a mis sinodales por sus valiosas aportaciones.

Al proyecto CONACYT No: 180148 Cambio Climático Natural y Sistemas Solares de Bajo Costo.

Agradezco a Roberto Ortega Martínez por el apoyo que ha brindado a nuestra familia.

También quiero agradecer a la Dra. Graciela Velasco por todo su apoyo y consejos durante la realización de mis estudios.

A Emma Salgado, Ivanhoe Palma, Griselda Silva, Alberto Farías de León y a Pablo Ríos Zertuche por su amistad, confianza y apoyo.

Resumen

La Tierra presenta una gran variabilidad climática que produce un impacto considerable en la sociedad. El conocimiento sobre la variabilidad climática es fundamental para afrontar los efectos, reducir los impactos negativos y aprovechar las situaciones favorables que estos brindan.

En este trabajo de investigación elaboramos una metodología para el análisis de series de tiempo geofísicas que contribuirá al entendimiento de los fenómenos climáticos terrestres y su relación con el Sol.

En particular se desarrolló una nueva metodología para estudiar acoplamiento de frecuencias cruzadas capaz de detectar y cuantificar el grado de acoplamiento en señales con variaciones en frecuencia, con baja relación señal a ruido y con sobre modulación. La metodología desarrollada está basada en la utilización de la transformada wavelet que nos permite extraer las principales características de las series de tiempo.

Utilizamos el wavelet de coherencia para verificar la existencia de características comunes entre las series de tiempo. También calculamos el índice de acoplamiento cruzado entre diferentes frecuencias de las series de tiempo, el cual se basa en la desmodulación coherente de series de tiempo.

Los resultados obtenidos muestran que las series de tiempo climáticas están fuertemente moduladas por la actividad solar y moderadamente moduladas por el movimiento del Sol alrededor del sistema Solar.

Índice General

Capítulo 1. Introducción	12
1.1. Antecedentes	12
1.2. Objetivos	13
1.3. Estructura del trabajo	14
Capítulo 2. El Sol	15
2.1. Introducción	15
2.2. La estructura del Sol	15
2.3. Actividad Solar	17
2.3.1. Indicadores de la actividad Solar	17
2.3.1.1. Manchas Solares	17
2.3.1.2. Rayos Cósmicos	18
2.3.1.3. Irradiancia Solar Total	19
2.3.1.4. Isotopos Cosmogénicos	19
2.3.1.4.1. Carbono 14	20
2.3.1.4.2. Berilio 10	20
Capítulo 3. Sistema Climático	21
3.1. Introducción	21
3.2. El clima	21
3.3. Componentes del sistema	21
3.4. Forzadores climáticos	23
3.4.1. Forzadores internos	24
3.4.1.1. Deriva continental	24
3.4.1.2. Variaciones en la Composición Atmosférica	24
3.4.1.3. Circulación del océano	25
3.4.1.4. Actividad volcánica	25
3.4.1.5. Campo magnético terrestre	26
3.4.1.6. Efectos antropogénicos	26
3.4.2. Forzadores externos	26
3.4.2.1. Movimiento del Baricentro	27
3.4.2.2. Variaciones orbitales	27
3.4.2.3. Variaciones irradiancia solar	28
3.5. Reconstrucciones climáticas	31
Capítulo 4. Región del Báltico	32
4.1. Ubicación Geográfica	32
4.2. Clima	32
4.3. Hielo	33
4.4. Precipitación	34
Capítulo 5. Análisis de series de tiempo	35
5.1. Introducción	35
5.2. Análisis en el dominio del tiempo	36
5.2.1. Normalidad	38
5.2.2. Estacionariedad	40

5.2.3. Modelado de series de tiempo	41
5.3. Análisis en el dominio de la frecuencia	42
5.3.1. Transformada de Fourier con ventanas	42
5.3.2. Transformada Wavelet	43
5.4. Relación entre dos series de tiempo	50
5.4.1. Covarianza y correlación	50
5.4.2. Wavelet de coherencia	50
5.4.3. Wavelet de Coherencia Parcial	52
5.4.4. Acoplamiento de frecuencia cruzada de amplitud-fase	52
5.4.4.2. Desmodulación Coherente	52
5.4.4.3. Índice de acoplamiento de frecuencias cruzadas de Amplitud-Fase	55
Capítulo 6. Metodología Propuesta	57
6.1. Introducción	57
6.2. Ilustración de la metodología utilizando series de tiempo sintéticas	57
6.3. Validación del método	63
Capítulo 7. Resultados	66
7.1. Aplicación de la metodología propuesta	66
7.2. Datos	66
7.3. Resultados del análisis en el dominio del tiempo	69
7.4. Resultados del análisis en el dominio de la frecuencia	70
7.4.1. Wavelet de Morlet	70
7.4.2. Wavelets de Coherencia	77
7.4.3. Wavelet de Coherencia Parcial	87
7.4.4. Acoplamiento de frecuencias cruzadas de Amplitud-Fase	99
8. Conclusiones	121
Bibliografía	123
Apéndice A	132
Apéndice B	168
Apéndice C	174
Apéndice D	186

Lista de Figuras

Figura 1. Principales capas del Sol.	16
Figura 2. Manchas Solares.....	18
Figura 3. Esquema del sistema climático y sus posibles cambios (IPCC, 2007).....	22
Figura 4 Circulación thermohalina.....	25
Figura 5 Baricentro o Centro de Masa del Sistema Solar.....	27
Figura 6 Relación entre el sol y el baricentro del Sistema Solar.....	29
Figura 7 Ciclos de Milankovitch.....	30
Figura 8 Distribución de la radiación Solar sobre la Tierra.....	30
Figura 9. Mapa de la Región del Báltico.	32
Figura 10 Ilustración de las medidas estadísticas.....	36
Figura 11 Tipos de distribuciones.....	38
Figura 12 Ilustración de la Transformada de Fourier por Ventanas y la Transformada Wavelet.	43
Figura 13 Wavelets madre.....	45
Figura 14 Proceso ruido blanco normal con media=0, varianza= 1.....	47
Figura 15 Proceso de ruido rojo con $\alpha = 0.7$, varianza= 1.....	48
Figura 16 Espectro del ruido rojo para algunos valores de auto correlación α (Gilman, et al., 1963).	49
Figura 17 Grafica de la modulación AM. A) Señal de información, B) Señal portadora y C) Señal modulada.	53
Figura 18 Parámetros de la señal de AM.....	54
Figura 19 Desmodulador coherente utilizando PLL como sincronizador de portadora.....	55
Figura 20 Representación gráfica de las series de tiempo y sus histogramas.....	58
Figura 21 Representación gráfica de la serie de tiempo X transformada y las auto-correlaciones de las series X y Y	59
Figura 22 Análisis de la serie de tiempo X	61
Figura 23 Análisis de la serie de tiempo Y	61
Figura 24 Análisis de coherencia entre las series de tiempo X y Y	62
Figura 25 Ilustración del acoplamiento de frecuencias cruzadas amplitud-fase.....	64
Figura 26 Análisis de cuatro casos diferentes de fuerza de acoplamiento para cada método de modulación.....	64
Figura 27 a) Señal moduladora (L, línea solida) y señal desmodulada (HA, línea punteada). b) graficas de distribución entre las señales L y HA, las cuales muestran que el coeficiente de correlación, r , depende del retardo entre las señales. c) muestra los valores de CFCI para diferentes índices de modulación (0.1, 0.5, 1, y 2).	65
Figura 28 Análisis de las series de tiempo climáticas.....	68
Figura 29 a) Serie de tiempo del Berilio 10, b) serie de tiempo del Grupo de Manchas Solares (GMS), c) serie de tiempo de la Irradiancia Solar Total (TSI), d) serie de tiempo de los Rayos Cósmicos (RC).....	68
Figura 30 a) Serie de tiempo del baricentro (longitud), b) serie de tiempo del baricentro (radio). 69	
Figura 31 Histogramas de las series de tiempo.....	69
Figura 32 Series de tiempo transformadas y sus histogramas.....	72
Figura 33 Wavelets de las series de tiempo climáticas.....	73
Figura 34 Wavelets de las series de tiempo. A) Berilio-10, B) GMS y C) TSI.....	74

Figura 35 Wavelets de las series de tiempo. A) RC, B) Baricentro (Longitud), C) Baricentro (Distancia).....	76
Figura 36 Wavelets de Coherencia. A) IWSIB y Be-10 B) Temperatura de invierno y Be-10, C) Precipitación de invierno y Be-10.....	78
Figura 37. Wavelets de Coherencia. A) IWSIB y TSI, B) Temperatura de invierno y TSI, C) Precipitación de invierno y TSI.....	81
Figura 38 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y GMS, B) Temperatura de invierno y GMS, C) Precipitación de invierno y GMS.....	82
Figura 39 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y RC, B) Temperatura de invierno y RC, C) Precipitación de invierno y RC.....	84
Figura 40 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y Baricentro (Longitud), B) Temperatura de invierno y Baricentro (Longitud), C) Precipitación de invierno y Baricentro (Longitud).....	85
Figura 41 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y Baricentro (Distancia), B) Temperatura de invierno y Baricentro (Distancia), C) Precipitación de invierno y Baricentro (Distancia).....	86
Figura 42 Wavelets de Coherencia Parcial. A) IWSIB y Be-10, B) IWSIB y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	87
Figura 43 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y GMS, B) IWSIB y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	88
Figura 44 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y Be-10, B) IWSIB y TSI, C, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	89
Figura 45 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y GMS, B) IWSIB y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	90
Figura 46 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y Be-10, B) Temperatura de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	91
Figura 47 Wavelets de Coherencia Parcial. A) Temperatura de Invierno y GMS, B) Temperatura de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	92
Figura 48. Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y Be-10, B) Temperatura de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	93
Figura 49 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y GMS, B) Temperatura de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	94
Figura 50 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y Be-10, B) Precipitación de Invierno y TSI, , quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	95
Figura 51 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y GMS, B) Precipitación de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).....	96
Figura 52 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y Be-10, B) Precipitación de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	97
Figura 53 Wavelets de coherencia parcial: a) Precipitación de Invierno y GMS, b) Precipitación de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).....	98
Figura 54 Principales periodicidades de la serie de tiempo de IWSIB.....	99
Figura 55 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Temperatura de Invierno.....	100
Figura 56 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Precipitación de Invierno.....	101
Figura 57 Principales periodicidades de la serie de tiempo del Berilio 10.....	102
Figura 58 Principales periodicidades de la serie de tiempo del Grupo de Manchas Solares (GMS).....	103
Figura 59 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Irradiancia Solar Total (TSI).....	104
Figura 60 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los rayos cósmicos (RC).....	105
Figura 61 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los Baricentro (Longitud).....	105

Figura 62 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los Baricentro (Distancia).....	106
Figura 63 Desmodulación de la periodicidad de 7.5 años del IWSIB.	107
Figura 64 Desmodulación de la periodicidad de 12.7 años del IWSIB.	107
Figura 65 Desmodulación de la periodicidad de 8 años de la Temperatura de Invierno.	108
Figura 66 Desmodulación de la periodicidad de 12 años de la Temperatura de Invierno.	108
Figura 67 Desmodulación de la periodicidad de 8.2 años de la Precipitación de Invierno.	110
Figura 68 Desmodulación de la periodicidad de 14.7 años de la Precipitación de Invierno.	110
Figura 69 Desmodulación de la periodicidad de 12 años de Be-10.	111
Figura 70 . Desmodulación de la periodicidad de 10.4 años de GMS.	111
Figura 71 Desmodulación de la periodicidad de 11 años de TSI.	112
Figura 72 Desmodulación de la periodicidad de 11 años de RC.	112
Figura 73 Desmodulación de la periodicidad de 11.5 años de Baricentro (Longitud).....	113
Figura 74 Desmodulación de la periodicidad de 11.5 años de Baricentro (Distancia).	113
Figura 75 Grafica de las periodicidades seculares y las fases para el Be-10, GMS y TSI.	115
Figura 76 Grafica de las periodicidades de 187 años y las fases para el Be-10, GMS y TSI.	118
Figura 77 Grafica de las periodicidades de ~170 años y las fases para el RC, Baricentro (Longitud) y Baricentro (Distancia).	119

Lista de Tablas

Tabla 1 Parámetros del Sol.	15
Tabla 2 Tipos de acoplamiento de frecuencias cruzadas basadas en la medición de CFCI.	56
Tabla 3 Medidas que caracterizan las series de tiempo X y Y.	60
Tabla 4 Medidas que caracterizan las series de tiempo estudiadas.....	70
Tabla 5 Principales periodicidades de las series de tiempo estudiadas.	77
Tabla 6 Componentes principales de cada una de las señales desmoduladas.	114
Tabla 7 Resultados del cálculo de índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase entre las series climáticas y la periodicidad secular del Be-10, GMS y la TSI.	116
Tabla 8 Resultados del cálculo del índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fas entre las series climáticas y la periodicidad de ~180 años de los factores externos.	117
Tabla 9 Resultados del cálculo del índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase entre la periodicidad decadal de las series de Be-10, GMS y la TSI y la periodicidad de 180 años del Baricentro (Longitud y Distancia).....	120

Capítulo 1. Introducción

La Tierra presenta una gran variabilidad climática. Estas variaciones en el clima tienen un impacto considerable en la sociedad. Estos cambios inciden en el desarrollo y resultado de las actividades humanas. El conocimiento sobre la variabilidad climática es fundamental para afrontar los efectos, reducir los impactos negativos y aprovechar las situaciones favorables que estos brindan.

El hombre busca entender, describir y predecir estos cambios. En los últimos años ha habido una abundante producción de conocimiento en esta materia pero aún falta mucho por hacer.

Motivados por lo expresado anteriormente, en este trabajo de investigación elaboramos una metodología para el análisis de series de tiempo geofísicas que contribuirá al entendimiento de los fenómenos climáticos terrestres y su relación con el Sol.

1.1. Antecedentes

La variabilidad climática ha sido estudiada por diferentes autores utilizando distintas metodologías. Científicos de todo el mundo están estudiando el clima del pasado con la finalidad de alcanzar un mejor entendimiento del clima presente y futuro.

El hielo es un elemento muy importante en el sistema climático del Báltico ya que puede afectar directa o indirectamente muchos de los patrones oceanográficos, climáticos, ecológicos, económicos y culturales (Mikelsone et al., 2008). La extensión, el grosor de la cubierta de hielo y el tiempo de duración del hielo pueden caracterizar el clima en el Mar Báltico.

El estudio de las condiciones de hielo en invierno en el Mar Báltico es de gran importancia ya que hasta pequeños cambios en el clima ocasionan grandes cambios en el hielo (Eriksson et al., 2007). Las condiciones del hielo marino son indicadores de la severidad de hielo en la temporada invernal (Haapala et al., 1997). Condiciones inusuales de hielo han sido documentadas desde el año 690 pero registros periódicos de observaciones de hielo iniciaron en el siglo 16 (Speerschneider, 1915).

Lepy (2005) mostró que algunas partes del Báltico tienen menos y menos hielo cada invierno. Estudios realizados por Jevrejeva et al. (2004) muestran que ha decrecido la probabilidad de ocurrencia de hielo en la zona del Báltico y estudios realizados por Haapala et al. (1997) muestran que la duración de la temporada invernal en el mar Báltico ha disminuido. Lepy (2005) estudió la influencia de la temperatura en las condiciones invernales, ella encontró que la temperatura es un parámetro esencial para la formación de hielo pero que no es el único. Jaani (1999) estudió las fluctuaciones de la cubierta de hielo en relación a la actividad solar desde 1720-1992, confirmando la presencia de la periodicidad de 22 años la cual corresponde a ciclo completo de la actividad solar. Loewe

and Koslowski (1998) analizaron la relación entre la severidad de hielo en invierno y la actividad solar desde 1879; ellos mostraron que el volumen de hielo acumulado ($Va\Sigma$) esta modulada por la periodicidad de 8 años y que los inviernos más severos ocurren cuando la actividad solar es baja.

El movimiento del sol alrededor del centro de masa del sistema solar (baricentro) ha sido propuesto como un causante de la variabilidad solar (Jose, 1965; Charvátová, 1988). Muchos autores han tratado de explicar la influencia de los planetas en el número de manchas solares (Brown, 1900; Jose, 1965; Charvátová, 1988); ellos suponen que la causa de las periodicidades en la actividad solar es el movimiento del Sol alrededor del centro de masa del sistema solar (baricentro); sin embargo, un mecanismo físico claro no ha sido identificado aún. Cohen and Lintz (1974) sugirieron que la periodicidad de 179 años del baricentro modula la amplitud de la periodicidad de 11 años del ciclo de manchas solares. Charvátová (2004) estableció la posible relación entre el movimiento solar y los fenómenos climáticos.

Algunos autores han propuesto que las series de tiempo geofísicas de diferentes frecuencias pueden interactuar entre ellas (Rennert and Wallace, 2009). En el acoplamiento de amplitud-fase de frecuencias-cruzadas una oscilación de alta frecuencia es modulada por la fase de una oscilación de baja frecuencia (Tort et al., 2010; Canolty et al., 2006; Demiralp et al., 2007). Este tipo de acoplamiento se ha observado en estudios de oscilaciones cerebrales, sistemas climáticos, dispositivos electrónicos, etc. (Knyazev, 2011; Mokhov et al., 2011; Blasius and Stone, 2000).

Algunos métodos han sido diseñados y aplicados para identificar acoplamiento entre diferentes frecuencias pero cada uno de ellos presenta limitaciones. Las principales limitaciones de los métodos existentes es que son sensibles a variaciones en frecuencia y a que no pueden detectar señales sobre moduladas.

1.2. Objetivos

El sol domina el espacio donde habita el sistema solar creando una cavidad dentro del medio interestelar llamada heliósfera. La mayor parte de la dinámica de la heliósfera es dominada por la actividad solar. En este proyecto de tesis doctoral se estudiará la dinámica de las variaciones solar y del baricentro solar que son origen del "Clima Espacial" y del cambio climático natural terrestre. Por eso en este proyecto se plantean los siguientes objetivos:

- Investigar los forzamientos radiativos externos e internos en la variabilidad climática en el Báltico durante la "Pequeña Edad de Hielo".
- Investigar la variabilidad del Sol y del baricentro solar y sus consecuencias en la variabilidad climática en el Báltico durante la "Pequeña Edad de Hielo".
- Analizar el espectro tiempo-frecuencia Wavelet, los datos históricos, proxy y

directos de la actividad solar y de las variables climáticas en el Báltico durante la “Pequeña Edad de Hielo”.

- Analizar el acoplamiento de frecuencias cruzadas para cuantificar la intensidad de acoplamiento en la variabilidad climática en el Báltico durante la “Pequeña Edad de Hielo” con variaciones en frecuencia, con baja relación señal a ruido y con sobre modulación.
- Identificar y medir la relación que existe entre las series de tiempo climáticas, la actividad solar y el movimiento del sol alrededor del sistema Solar.

1.3. Estructura del trabajo

El contenido del presente trabajo está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo 2 se muestra la importancia que tiene el Sol dentro del sistema solar y en la Tierra. También muestra la estructura interna del Sol y las manifestaciones de su actividad. El capítulo 3 presenta la descripción del sistema climático, las componentes del sistema y los forzadores climáticos. En el capítulo 4 se describe la región del Báltico, se muestra la ubicación geográfica, también se describe el clima, las condiciones de hielo y la precipitación de la región. En el capítulo 5 se presentan los diferentes métodos que pueden ser utilizados para realizar el análisis de series de tiempo. El capítulo 6 describe la metodología propuesta en este trabajo, su aplicación a series sintéticas y la validación de la metodología. En el capítulo 7 se presentan los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta a series de tiempo geofísicas y también se realiza la discusión de los mismos. Por último, el capítulo 8 muestra las conclusiones a las que se llegaron mediante el presente análisis. Así como las posibles perspectivas sobre trabajos futuros relacionados con los conceptos tratados en este trabajo.

Capítulo 2. El Sol

2.1. Introducción

El Sol es el elemento más importante en nuestro sistema solar y una fuente de luz y calor para la vida en la Tierra. Nuestros antepasados sabían que sus vidas dependían de él y lo veneraban. En la actualidad el sol ha inspirado el desarrollo de diferentes trabajos de investigación. En estos trabajos se busca el entendimiento de cómo trabaja, porque cambia y como estos cambios afectan la vida del planeta Tierra. En la Tabla 1 se muestran algunos de los principales parámetros del sol.

Tabla 1 Parámetros del Sol.

(Información extraída de <http://solarsystem.nasa.gov/planets/profile.cfm?Object=Sun&Display=Facts&System=Metric>)

Parámetros del Sol	
Radio medio	695,508 km
Circunferencia ecuatorial	4,370,005.6 km
Volumen	$1,4122 \times 10^{18} \text{ km}^3$
Masa	$1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$
Densidad	1.409 g/cm^3
Área superficial	$6,078,747,774,547 \text{ km}^2$
Gravedad superficial	274.0 m/s^2
Velocidad de escape	2,223,720 km/h
Periodo de Rotación Sideral	25.38 días
Temperatura superficial	5,500 °C
Edad	4.6 Billones de años
Principales componentes	92.1% Hidrogeno, 7.8% Helio
Distancia a la tierra	149.60 millones de km

2.2. La estructura del Sol

El Sol es una estrella típica de segunda generación de aproximadamente 4.5 billones de años de edad. El Sol está compuesto de 92.1% Hidrogeno, 7.8% Helio y de 0.1% de otros elementos. La energía del Sol proviene de reacciones nucleares en el núcleo que consumen Hidrógeno para formar Helio. La energía producida crea una temperatura central de aproximadamente 15 millones de grados Kelvin. Esta energía es transportada desde el interior primero por radiación (zona radiativa) y luego por convección (zona convectiva) hasta las capas exteriores y llegando a la superficie (fotosfera) a 5780°K. Aquí la radiación es liberada hacia el espacio, y una pequeña cantidad llega a los planetas en forma de luz y calor (Hoyt y Shatten, 1997). La figura 1 muestra un esquema de la estructura del Sol.

El núcleo es la región más interna que va desde el centro hasta 0.3 radios solares. En el núcleo es donde reacciones nucleares consumen Hidrógeno para formar Helio. Estas reacciones liberan la energía que salen de la superficie en forma de luz visible. La temperatura en el centro del Sol es de aproximadamente 1.6×10^7 °K y la densidad es de 150g/cm^3 . La zona radiativa es una capa de 0.5 radios solares. La energía generada en el núcleo es transportada por protones que rebotan de partícula en partícula a través de la zona radiativa. Los protones viajan a la velocidad de la luz pero rebotan tantas veces a través de este material tan denso que a cada protón le toma aproximadamente un millón de años alcanzar la capa de interface. La zona convectiva es la capa más externa del interior del Sol, donde grandes masas calientes son transportadas hacia la fotosfera por medio de corrientes turbulentas. Cuando esto ocurre un volumen de material se mueve hacia arriba donde estará más caliente que sus alrededores y continuara subiendo más alto (Morales Olivares, 2009).

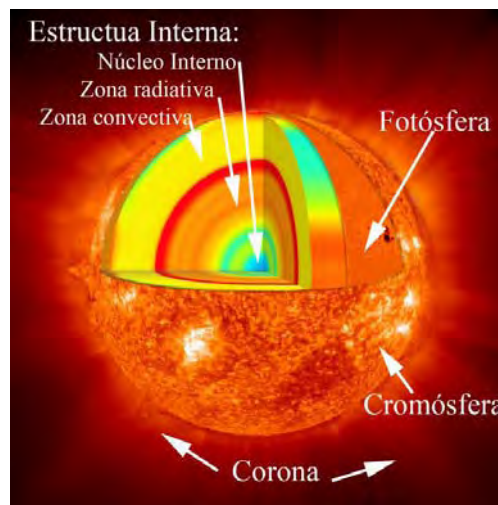


Figura 1. Principales capas del Sol.

(Extraída de: http://www.nasa.gov/images/content/171927main_heliolayers_lg.jpg)

La atmosfera solar inicia en la fotosfera. La fotosfera es la superficie visible del sol de aproximadamente 500 Km de espesor y temperatura de aproximadamente 5800°K . Esta capa es relativamente densa y opaca, y emite como un cuerpo negro. En la fotosfera se pueden observar manchas solares, fáculas, destellos, erupciones solares, etc. La cromósfera es una capa irregular sobre la fotosfera donde la temperatura va desde los 4300°K hasta aprox. 10^4°K . A estas altas temperaturas el Hidrogeno emite luz lo que le da el color rojizo al sol. Las Fáculas y los destellos se levantan a la cromosfera. Las Fáculas son nubes de hidrógeno brillantes y luminosas las cuales se forman sobre las regiones donde se forman las manchas solares. Los destellos son filamentos brillantes de gas caliente y emergen de las regiones de manchas solares. Las manchas solares son depresiones oscuras en la fotosfera. Es en ésta región también aparecen las erupciones solares las cuales son inmensas nubes de gas resplandeciente. La región de transición entre la Corona y la Cromósfera es una capa muy delgada e irregular. El calor fluye desde la Corona hacia la Cromósfera y en el proceso se produce esta capa delgada donde la temperatura cambia rápidamente de 10^4°K hasta aproximadamente 10^6°K . La Corona es la capa superior de la

atmósfera y se extiende a todo el medio interplanetario en forma de viento solar. Es una zona muy caliente (aprox. 2×10^6 °K en su base) y muy tenue, por lo que únicamente se puede observar a simple vista durante los eclipses totales de Sol (Morales Olivares, 2009).

2.3. Actividad Solar

El Sol es una estrella muy dinámica. Aunque el Sol está activo, no siempre lo está de la misma manera. Hay ocasiones en que las manchas solares, los destellos, la eyección de masa coronal, etc. son muy numerosas y otras en las que están prácticamente ausentes. El Sol no pasa de una fase a otra de manera repentina, sino que sigue un ciclo bastante regular al cual se le llama “ciclo de actividad solar” o “ciclo solar”.

2.3.1. Indicadores de la actividad Solar

La forma más simple para de medir, de manera directa, la actividad solar es a través del número de manchas visibles en el sol en un instante de tiempo dado (mayor número de manchas representa mayor actividad solar) (Otaola, et al., 2000).

Un Sol activo producirá otro tipo de eventos, de carácter esporádico, como las ráfagas solares, las cuales son enormes explosiones de energía electromagnética principalmente en las porciones del visible, ultravioleta y rayos X del espectro de radiación solar. Una ráfaga puede durar desde unos minutos hasta unas cuantas horas y es acompañada de emisiones electromagnéticas en el rango de frecuencias de radio (microondas). Durante las grandes ráfagas solares, el Sol a menudo emite también partículas cargadas (protones, alfas, y electrones) con energías relativistas: los llamados *rayos cósmicos solares*. Entre los indicadores indirectos de la actividad solar tenemos a las auroras boreales, las tormentas geomagnéticas, las variaciones en la intensidad de la radiación cósmica galáctica, la velocidad del viento solar y las variaciones de los rayos cósmicos (Otaola, et al., 2000).

2.3.1.1. Manchas Solares

Las manchas solares (fig. 2), una de las muchas manifestaciones de la actividad solar, son la fuente más antigua de registros directos de observaciones solares, los griegos los reportaron desde el año 28 A.C. En el Hemisferio oriental hay registros desde la dinastía Han (200 A.C.-200 D.C.) (Mendoza, 2006). Con los primeros telescopios, a partir de 1610, Galileo y otros astrónomos pudieron tener una visión clara de la estructura de la superficie del Sol. Las observaciones también revelaron que las manchas del Sol y que éstas eran fenómenos transitorios. Esta fue la primera evidencia de la actividad solar. Heinrich Schwabe (1843) notó que el comportamiento de las manchas solares era cíclico. Richard Wolf organizó los registros de números de manchas solares en una base sistematizada (Velasco, et al., 2008).



Figura 2. Manchas Solares.

(Extraída de: http://www.nasa.gov/images/content/52984main_MM_image_feature_94_jw4.jpg)

Los registros del número de manchas solares representan el registro directo más largo que existe de la actividad solar con datos confiables desde 1610.

El número de manchas solares presenta un comportamiento interesante, por ejemplo durante el Mínimo de Maunder prácticamente no se observaron manchas solares (Eddy, 1976; Ribes y Nesme-Ribes, 1993), o desde 1945 cuando el número de manchas solares alcanza niveles muy elevados.

Se han realizado algunas reconstrucciones del número de manchas solares para extender las series de tiempo de datos observados, estas reconstrucciones las han realizado utilizando parámetros indirectos como: la concentración de los isótopos cosmogénicos de Carbono 14 encontrados en anillos de árboles o con los isótopos de Berilio 10 extraídos de núcleos de hielo de Groenlandia y la Antártica (Beer, 2000; Beer, et al. 1990).

2.3.1.2. Rayos Cósmicos

Los rayos cósmicos son partículas cargadas que se encuentran en el espacio y se mueven a gran velocidad. La radiación se intensifica cuando el Sol está activo. La mayor parte de estas partículas no llegan a la tierra ya que son desviadas y alejadas por el campo geomagnético (Hewitt, 2007)

Algunas de las variaciones que experimenta la radiación cósmica son debidas a la influencia del Sol y a este proceso se le conoce como “modulación solar de los rayos cósmicos”. La detección de los rayos cósmicos provee de una herramienta poderosa para relacionar estas observaciones con fenómenos conocidos y así poder hacer deducciones sobre fenómenos desconocidos. Las variaciones principales de los rayos cósmicos de origen solar presentan la periodicidad de 11 años debida al ciclo solar y la periodicidad de 22 años que es debida al ciclo solar magnético. (Morales Olivares, 2009).

Los registros de mediciones de rayos cósmicos es muy corta, solo abarca algunas décadas. Estos registros son muy cortos para poder estudiar el fenómeno, por esta razón muchos investigadores se han dado a la tarea de hacer reconstrucciones de rayos cósmicos basándose en otros indicadores. Solanki et al. (2000, 2002) desarrollo un método para reconstruir el flujo magnético solar desde 1700 a partir del número de manchas solares. Usoskin et al. (2002) basándose en el modelo de Solanki realizo un modelo para reconstruir 400 años de rayos cósmicos.

2.3.1.3. Irradiancia Solar Total

La irradiancia Solar Total (TSI) es la cantidad de energía solar por unidad de área presente en cada momento fuera de la atmosfera terrestre. La irradiancia solar es de aproximadamente 1367 W/m^2 . Los registros experimentales de la Irradiancia iniciaron en 1978 con el radiómetro HF que llevó consigo el satélite NIMBUS (Cabrera Carranza, 2006). Dos décadas de observaciones satelitales revelan que la constante solar varía en la escala de días hasta una década y allí parece estar la relación significativa con el ciclo de número de manchas solares, de manera que para un alto número de manchas solares el valor de la constante solar aumenta.

Las mediciones desde satélite solo proporcionan información sobre un periodo muy corto de tiempo, por esta razón algunos investigadores se han dado a la tarea de hacer reconstrucciones de irradiancia a partir de: el número de manchas solares y/o de los isotopos cosmogénicos (^{10}Be , ^{14}C). Lean (1992, 1995, 2000) e hizo una reconstrucción de la irradiancia solar total desde 1610 basándose en las manchas solares. Krivova et al. (2003) realizó una reconstrucción de Irradiancia bajo la suposición de que el magnetismo en la superficie solar era el único responsable de los cambios en la irradiancia en pequeñas escalas de tiempo (días y años). Bard et al. (2003) desarrollo una reconstrucción de la irradiancia basándose en los niveles de producción del Berilio 10 (^{10}Be) y del Carbono 14 (^{14}C).

2.3.1.4. Isotopos Cosmogénicos

Las relaciones isotópicas en las burbujas de aire atrapadas en los núcleos de hielo, conchas de calcita y calizas así como los átomos de carbono en el carbón mineral y en la madera, pueden ser utilizadas como datos proxy para reconstruir las variaciones en la actividad solar y en el clima.

Los tipos más comunes de isotopos producidos por los rayos cósmicos (isotopos cosmogénicos) son de Carbono 14 y de Berilio 10. Como estos isotopos son inestables, decaen en otros elementos con el tiempo y por lo tanto un número elevado de estos isótopos son un signo de exposición reciente a rayos cósmicos. Debido a que algunos tipos de concentraciones de isotopos dependen de la exposición a los rayos cósmicos, entre otras cosas, puede ser posible obtener una medida de la intensidad de bombardeo de partículas de alta energía.

2.3.1.4.1. Carbono 14

El ^{14}C se oxida formando una molécula de dióxido de carbono, CO_2 , que inmediatamente entra a formar parte del ciclo biológico, llegando a todos los seres vivos a través de la fotosíntesis y la cadena trófica terrestre y marina, alcanzando una situación de equilibrio. Los cambios en la actividad solar son responsables de los cambios en la fuerza del viento solar. Un viento solar fuerte reduce el flujo de rayos cósmicos que llegan a la tierra. Por lo tanto un incremento en la actividad solar se traducirá a una baja cantidad de ^{14}C . Todos los organismos vivos toman aire con proporciones de isotopos de ^{14}C . Este isotopo es inestable y decae en nitrógeno con una vida de 5730 años. Si la proporción de ^{14}C es conocida se puede estimar la edad de los organismos. También es posible estimar las concentraciones originales de estos isotopos inestables si existe alguna información sobre cuánto tiempo estos elementos fueron expuestos a los rayos cósmicos ya que la razón de decaimiento es conocida. La cronología puede ser encontrada en la madera por medio del conteo de los anillos de árboles, sin embargo pueden ser también inferidas por el número de capas en el hielo. La historia de las variaciones de las concentraciones iniciales de ^{14}C puede verse como un registro de la actividad solar pasada del Sol. El estudio de ^{14}C proporciona información sobre las fluctuaciones en su tasa de producción afectada por diversos factores, incluyendo las variaciones en la intensidad del viento solar, la intensidad del campo geomagnético y la circulación global de la atmosfera. (Ocampo Ríos, 2009)

2.3.1.4.2. Berilio 10

El isotopo cosmogénico de ^{10}Be se produce en la atmósfera cuando los rayos cósmicos chocan con partículas de O_2 y N_2 y forman cascadas de partículas que dan lugar a protones, neutrones y muones. Los neutrones dan lugar al ^{26}Al y ^{10}Be . Dado que el berilio tiende a existir en disolución acuosa con niveles de pH menores de 5,5, este berilio atmosférico formado es arrastrado por el agua de lluvia; una vez en la tierra, la solución se torna alcalina precipitando el berilio que queda almacenado en el suelo durante largo tiempo (vida media de 1,5 millones de años) hasta su desintegración en ^{10}Be (Ocampo Ríos, 2009).

El ^{10}Be es muy importante en la reconstrucción de información sobre el pasado de la intensidad de los rayos cósmicos y la actividad solar. Depósitos de ^{10}Be atmosférico en capas de hielo polar crean un archivo único con la posibilidad de obtener información anual sobre el pasado de la actividad solar. (Beer, et al., 1990). Las concentraciones de isotopos en hielos glaciares son afectadas por cambios en la velocidad de producción y transportación así como por los procesos de depósito. Cambios en la velocidad de producción dependen de la actividad solar y la fuerza del campo geomagnético. Mientras que el transporte y el depósito dependen de la mezcla atmosférica, recolección de residuos y la velocidad de acumulación de nieve. (Berggren, 2009)

Capítulo 3. Sistema Climático

3.1. Introducción

El sistema climático terrestre es un sistema muy complejo que involucra la interacción de la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera. En el sistema climático la energía solar juega un papel muy importante. (Zúñiga López y Crespo Del Arco, 2010).

Las interacciones del sistema climático se producen a través de flujos de energía de diversas formas, de intercambios de agua, de flujos de otros gases, entre los que figuran el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄), y del ciclo de nutrientes (fig. 3). Lo que mueve el sistema climático es la entrada de energía solar, equilibrada por la emisión de energía infrarroja hacia el espacio. La energía solar es la fuerza conductora más importante de los movimientos de la atmósfera y el océano, de los flujos de calor y agua y de la actividad biológica.

El sistema climático es dinámico. Fuertes vientos y las corrientes oceánicas circulan el planeta, y redistribuyen la energía del sol. El sol proporciona la energía externa que maneja el clima desde el exterior. El sol también estimula los cambios internos que causan las corrientes oceánicas para debilitar o reforzar los vientos alisios.

Aunque el sistema climático está siempre en movimiento, los científicos han sido capaces de reconocer los patrones clave en los vientos, las corrientes, la temperatura y la presión. Comprender la naturaleza y causas de estos patrones es esencial para la toma de decisiones y entender la variabilidad climática.

3.2. El clima

El clima es una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades de interés durante períodos de tiempo que pueden ser de meses a miles o millones de años. El período normal es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Dichas cantidades son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento), aunque en un sentido más amplio el 'clima' es una descripción del estado del sistema climático (IPCC, 2007).

El clima se puede describir utilizando un gran número de parámetros como: temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento, etc. Aunque la temperatura y la precipitación son los parámetros más utilizados para describir el clima debido a que estos han sido observados y registrados de manera regular alrededor del mundo (Huddart y Stott, 2010).

3.3. Componentes del sistema

El sistema climático involucra la interacción de la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la litosfera y la biosfera. La Figura 3 muestra una representación del sistema climático y

presenta algunas interacciones clave entre los diversos componentes y las propiedades de los componentes que pueden cambiar (IPCC, 1997).

La atmósfera es la capa de gases que rodea la Tierra. Es una mezcla de nitrógeno molecular N_2 (78%), y oxígeno molecular, O_2 (21%). Aparecen otros gases en menor concentración (1%), pero que son muy importantes para el desarrollo de la vida, como son el vapor de agua, el ozono, O_3 , y el dióxido de carbono, CO_2 . La atmósfera está formada por la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la Ionosfera y la exosfera.

La litosfera comprende la parte superior del manto y la corteza terrestre. La corteza terrestre es la parte de la litosfera que interactúa con otros sistemas ambientales. La corteza representa menos del 11% de la masa terrestre y aproximadamente 0.5% de su radio. Su grosor varía entre los 5 y 35 Km y está formado por rocas compuestas de minerales (Common, y Stagl, 2008).

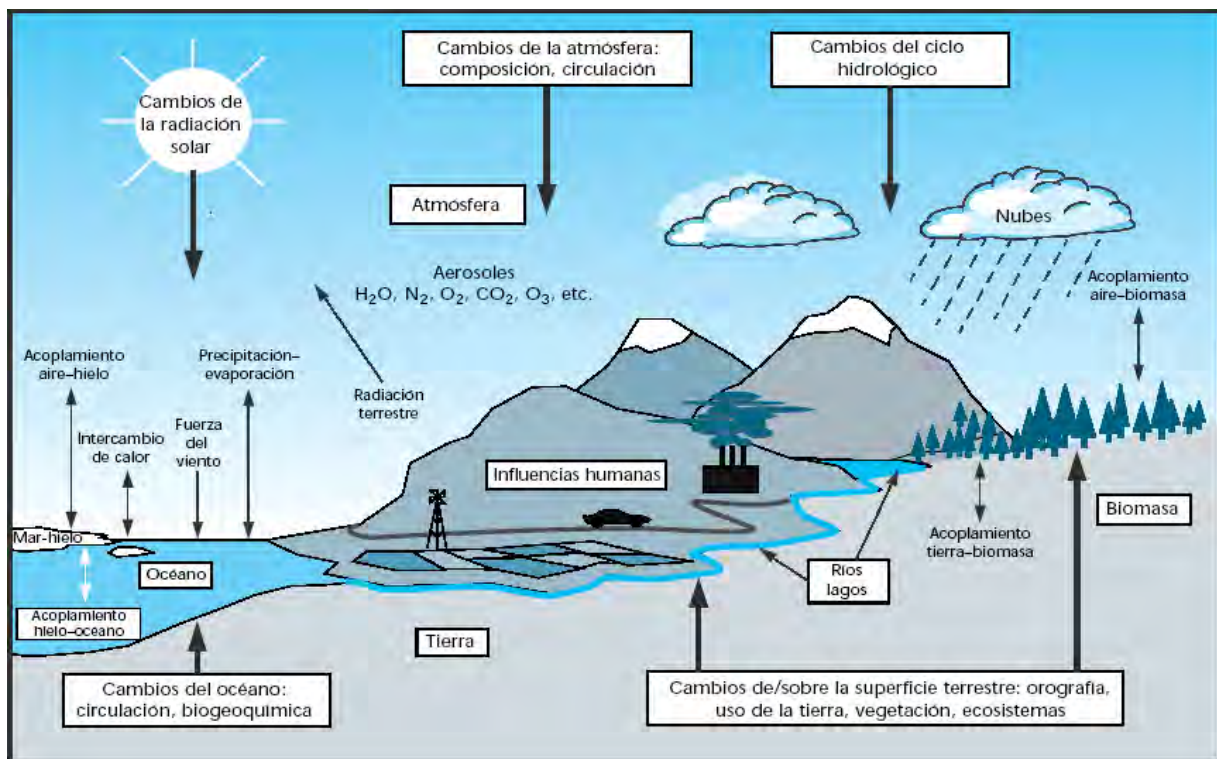


Figura 3. Esquema del sistema climático y sus posibles cambios (IPCC, 2007).

La biosfera es la porción de la corteza terrestre en la que habitan los seres vivos. Incluye partes de la litosfera, la hidrosfera, la criosfera y la atmósfera. La biosfera juega un papel importante en la regulación del sistema del clima global. La biosfera afecta el albedo de la superficie terrestre. También influye en los flujos de ciertos gases invernadero tales como el dióxido de carbono y el metano.

La hidrosfera está formada por los océanos, los lagos, los ríos y el vapor de agua presente en la atmósfera. Aproximadamente el 70% de la superficie terrestre está cubierta de agua

y el 10% está cubierta por hielo. Los océanos contienen aproximadamente el 97% del agua total del planeta, mientras que el 2% se encuentra en las capas de hielo y en los glaciares. El vapor de agua presente en la atmósfera representa el 0.0001% del agua total y los ríos y lago el 0.009%. (Common, y Stagl, 2008).

La criosfera está formada por las regiones del sistema terrestre que contienen agua en estado de congelación y que abarca fenómenos como el hielo de los mares, lagos y ríos, la cubierta de nieve, las precipitaciones sólidas, los glaciares, los mantos de hielo, el permafrost y el suelo helado de manera estacional (Goodison, et.al, 2007). La criosfera también interviene en la regulación del sistema del clima global. La nieve y el hielo reflejan la mayoría de la radiación solar que recibe (alto albedo). Algunas partes de la Antártida reflejan el 90% de radiación solar. Sin la criosfera, el albedo global sería considerablemente más bajo. La mayor parte de la energía sería absorbida por la superficie de la tierra en lugar de ser reflejada y en consecuencia la temperatura de la atmósfera sería más alta.

Los componentes del sistema climático inciden en el clima regional y mundial de varias maneras diferentes: a) influyen en la composición de la atmósfera de la Tierra, por lo que modulan la absorción y transmisión de la energía solar y la emisión de energía infrarroja que se devuelve al espacio; b) alteran las propiedades de la superficie y la cantidad y naturaleza de la nubosidad, lo que repercute sobre el clima a nivel regional y mundial; y c) distribuyen el calor horizontal y verticalmente, desde una región hacia otra mediante los movimientos atmosféricos y las corrientes oceánicas (IPCC, 1997).

3.4. Forzadores climáticos

El clima terrestre depende del balance global de energía entre la radiación solar y la radiación emitida por la tierra. Las radiaciones solares calientan el planeta. La energía se reparte desde las zonas más cálidas a las más frías gracias a las corrientes oceánicas y a los movimientos del aire en la Atmósfera. El aire caliente es más ligero y asciende. El aire frío es más denso, por lo que desciende. El movimiento de las masas de aire produce el viento. La circulación del aire desde las regiones más cálidas a las más frías origina corrientes de convección. Estas corrientes circulan por la franja tropical, la zona templada y la zona polar de cada hemisferio.

Los procesos naturales y actividades humanas pueden alterar la cantidad total de energía dentro de la atmósfera. La incidencia de la radiación solar sobre la superficie terrestre implica considerar las variaciones en su intensidad debidas a la ubicación geográfica, la fecha y el momento del día. Incluso resulta importante comprender cómo la intensidad de la radiación solar sobre un plano dependerá del ángulo entre dicho plano y la dirección de los rayos solares.

Cambio climático se refiere a una importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un largo período de tiempo. El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o

en el uso de los suelos (IPCC, 2007). Además, los mecanismos forzantes pueden ser no-radiativos o radiativos.

Los factores forzantes que no afectan directamente el balance energético de la atmósfera (el balance entre la radiación solar entrante y la radiación terrestre saliente) son considerados mecanismos no-radiativos del cambio climático global. Tales factores usualmente afectan al clima a través de su influencia en la geometría de la superficie de la Tierra, tales como la ubicación y tamaño de las cadenas montañosas y la posición de las cuencas oceánicas.

Un proceso que altera el balance de energía del sistema Tierra-atmósfera es considerado como un mecanismo forzante radiativo. Estos pueden incluir variaciones en la órbita de la Tierra alrededor del sol, en la radiación solar, en la actividad volcánica y en la composición atmosférica.

3.4.1. Forzadores internos

Los factores internos que afectan el clima son factores caóticos y no sistemáticos ya que pueden producir cambios inesperados en el clima en un periodo corto de tiempo. Algunos de los forzadores internos son: la deriva continental, las corrientes oceánicas, el campo magnético terrestre, las erupciones volcánicas, el albedo y los efectos antropogénicos.

3.4.1.1. Deriva continental.

La deriva continental es un proceso muy lento, por lo que la posición de los continentes define el comportamiento del clima durante millones de años; no obstante en la definición del clima es necesario tener en cuenta dos aspectos esenciales:

- Las latitudes de la masa continental: en las latitudes bajas habrá pocos glaciares continentales y, en general, temperaturas medias menos extremas.
- Grado de fragmentación de los continentes: los continentes muy fragmentados presentan menos continentalidad.

3.4.1.2. Variaciones en la Composición Atmosférica

Con la aparición de la vida en la Tierra aparece la biosfera en la cual gran cantidad de organismos fotosintéticos capturaron gran parte del abundante CO₂ de la atmósfera primitiva y emitieron gran cantidad de oxígeno. Esto fue modificando la atmósfera lo que propició la aparición de nuevas formas de vida aeróbicas que se aprovechaban de la nueva composición del aire; de esta manera se incrementó el consumo de oxígeno y disminuyó el consumo neto de CO₂ llegándose al equilibrio y formándose así la atmósfera de tercera generación actual.

3.4.1.3. *Circulación del océano*

Los océanos desempeñan funciones importantes en el sistema climático terrestre y en el cambio climático. Los océanos ocupan la mayor parte de la superficie terrestre. Los océanos pueden almacenar más calor que los continentes y además su continuo movimiento permite un transporte de energía desde bajas a altas latitudes, el cual tiene un gran impacto en ciertos climas regionales.

Existe un transporte de aguas inter-oceánico controlado por las diferencias de salinidad entre los océanos. Las diferencias de densidad del agua hacen que ésta se mueva de zonas más densas a zonas menos densas y viceversa. La densidad del agua depende de la temperatura y la concentración de sal que contenga. Este sistema de circulación se conoce como la circulación termohalina (termo - temperatura, halina - sal) que constituye una banda transportadora de calor a lo largo de todo el planeta (fig. 4).

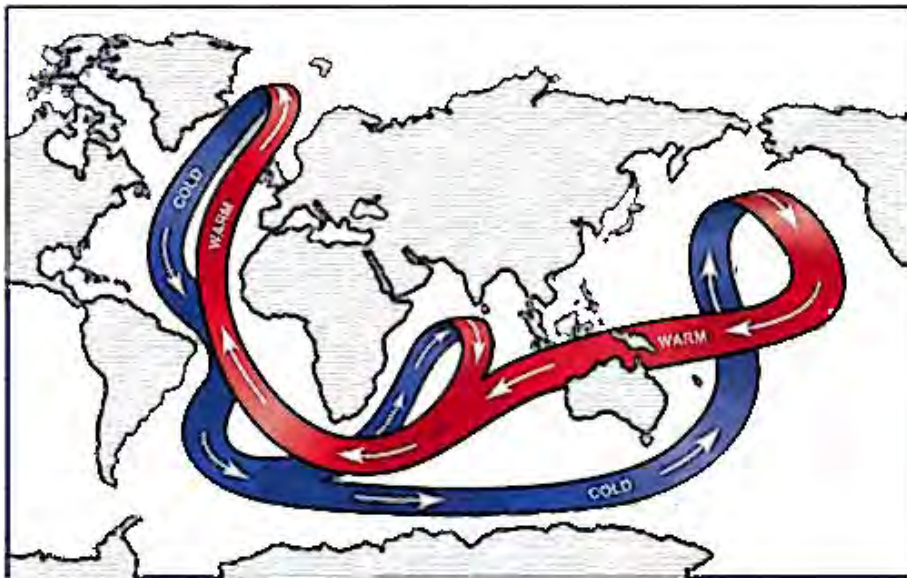


Figura 4 Circulación thermohalina.

La banda azul representa las corrientes frías y la banda roja representa las corrientes cálidas. (Extraída de: Broecker, 1991).

3.4.1.4. *Actividad volcánica*

Las erupciones volcánicas inyectan grandes cantidades de polvo y dióxido de azufre, en forma gaseosa, a la atmósfera superior y la estratosfera, donde son transformados en aerosoles de ácido sulfúrico. Se considera que la contaminación volcánica en la baja atmósfera es removida por efecto de la lluvia y la gravedad, mientras que, la contaminación estratosférica puede permanecer allí durante varios años y puede extenderse para cubrir gradualmente amplias áreas del planeta. La contaminación volcánica resulta en reducciones de la radiación solar directa (puede llegar a un 5 ó 10%) y generan bajas considerables de temperatura.

Las erupciones volcánicas afectan el balance de energía de la atmósfera mientras que el polvo y los aerosoles permanecen en la estratosfera. Estudios observacionales y basados en modelación del probable efecto de las erupciones volcánicas recientes sugieren que una erupción individual puede causar un enfriamiento global de hasta 0,3°C, durando su efecto por 1 ó 2 años. Tal enfriamiento ha sido observado en el registro de temperatura global a posteriori de la erupción del Monte Pinatubo, en junio de 1991. El forzante climático asociado con erupciones individuales es, no obstante, de vida relativamente corta comparado con el tiempo necesario para influir en el almacenamiento de calor de los océanos.

La anomalía de la temperatura debida a un evento volcánico aislado es poco probable que persista o conduzca, a través de mecanismos de retroacción, a cambios climáticos significativos de largo plazo.

3.4.1.5. Campo magnético terrestre

En general los polos magnéticos tienden a situarse próximo a los polos geográficos; sin embargo en algunas ocasiones se aproximaron al Ecuador, lo cual influyo en la manera en que el viento solar llegaba a la atmósfera terrestre.

Las variaciones en el campo magnético solar, provoca variaciones en las emisiones de viento solar ya que la interacción de la alta atmósfera terrestre con las partículas provenientes del Sol puede generar reacciones que modifican la composición del aire y de las nubes así como la formación de éstas.

3.4.1.6. Efectos antropogénicos

Se llama influencia antropogénica a aquellos efectos producidos por las actividades humanas. La influencia humana comenzó con la deforestación de bosques para convertirlos en tierras de cultivo y pastoreo, y ha llegado a la emisión abundante de gases que producen un efecto invernadero: CO₂ en fábricas y medios de transporte y metano en granjas de ganadería intensiva y arrozales. Actualmente tanto las emisiones de gases como la deforestación se han incrementado hasta tal nivel que parece difícil que se reduzcan a corto y medio plazo, por las implicaciones técnicas y económicas de las actividades involucradas.

Los cambios en el clima derivados de la actividad humana son debidos a la intensificación del efecto invernadero natural, al aumentar la concentración atmosférica de los gases radiactivamente activos y provocar lo que se conoce como un forzamiento radiactivo.

3.4.2. Forzadores externos

Los factores externos que pueden tener efecto sobre los parámetros climáticos son: *la variación solar* (cantidad de energía que recibimos del Sol en la atmósfera), *variación orbital* (la trayectoria que realiza la Tierra alrededor del Sol) y los *fenómenos inusuales* como el impacto de meteoritos. Estas influencias externas reciben el nombre de

forzamientos porque actúan de forma sistemática y paulatina sobre el clima, produciendo modificaciones leves, imperceptibles y naturales

3.4.2.1. Movimiento del Baricentro

El Sol no es únicamente una fuente de luz, es también el que mantiene a los planetas, asteroides y cometas orbitando alrededor de él. Sin la fuerza gravitacional del Sol no existiría el *sistema solar*, y los cuerpos que lo componen escaparían hacia la oscuridad del espacio lejano.

La gran masa del Sol lo constituye en el centro ordenador del sistema planetario. Su movimiento se ve alterado por la presencia y movimientos de los cuerpos que lo rodean, el *centro de masa del sistema solar o baricentro* se encuentra muy cerca del centro del Sol. Tanto el Sol como los planetas se mueven en su órbita alrededor del baricentro. El baricentro se puede observar en la figura 5 obtenida de una simulación hecha con el software Celestia (<http://www.celestia4all.com>).

El Sol al no estar fijo, puede sufrir alteraciones debidas a este movimiento. Algunos investigadores establecen que este movimiento del sol afecta las manchas solares (Jose, 1965; Landscheidt, 1976; Charvátová, 1988; Charvátová y Střeštík, 2004). Los cálculos astronómicos del baricentro del sistema solar fue generado por el grupo: “Solar System Dynamics Group” del “Jet Propulsion Laboratory”. La relación entre el Sol y el baricentro del sistema solar está en diferentes medidas. La distancia en radios solares, momento angular en gran cm^2/s , y el torque como delta del momento angular/delta de tiempo, las gráficas de los datos se pueden observar en la figura 6.



Figura 5 Baricentro o Centro de Masa del Sistema Solar
(Extraída de <http://www.celestia4all.com>)

3.4.2.2. Variaciones orbitales

El astrofísico serbio Milutin Milankovitch (1879-1958) estudio la forma de la órbita terrestre alrededor del sol. La teoría de Milankovitch sostiene que las variaciones cíclicas en la inclinación del eje de la tierra, excentricidad y precisión se combinan produciendo variaciones en la energía solar que llega al planeta (D Antoni, 2008). La tierra está un poco

más cerca del Sol en algunos momentos del año que en otros (fig. 7) se recibe un poco más de energía solar cuando la tierra y el Sol están más próximos que cuando están más distantes.

Inclinación del eje de la tierra es el ángulo que forman el eje de rotación de la Tierra y el plano de su órbita alrededor del Sol. La inclinación del eje no es constante, su inclinación fluctúa entre los $21,55^\circ$ y $24,5^\circ$ a lo largo de un periodo de 40,000 años e influye en la distribución latitudinal de la radiación solar. Al aumentar la inclinación, las estaciones resultan más extremas en ambos hemisferios, con veranos más cálidos e inviernos más fríos. Las variaciones en la inclinación axial de la Tierra afectan el gradiente latitudinal de temperatura.

La excentricidad es el cambio en la forma de la órbita que la Tierra recorre alrededor del Sol. Las variaciones en la excentricidad orbital afectan la distancia entre la Tierra y el Sol. La excentricidad de la órbita terrestre varía desde el 0,5%, correspondiente a una órbita prácticamente circular, hasta el 6% en su máxima elongación, con un período de aproximadamente 100,000 años. Cuando se alcanza la excentricidad máxima, se intensifican las estaciones en un hemisferio y se moderan en el otro. Las variaciones de excentricidad influyen en la cantidad total de la radiación solar en el tope de la atmósfera de la Tierra. Las diferencias extremas de excentricidad pueden dar lugar a variaciones de aproximadamente 30% en la radiación solar que pueden ser recibidas entre el perihelio y el afelio.

La precesión del eje de rotación de la Tierra, que describe una circunferencia completa, aproximadamente, cada 22,000 años. La precesión determina si el verano en un hemisferio dado cae en un punto de la órbita cercano o lejano al Sol. El resultado de esto es el refuerzo de las estaciones, cuando la máxima inclinación del eje terrestre coincide con la máxima distancia al Sol. Cuando esos dos factores tienen el mismo efecto en uno de los hemisferios, se tienen efectos contrarios entre sí en el hemisferio opuesto.

3.4.2.3. Variaciones irradiancia solar

La radiación electromagnética del Sol que llega a la parte superior de la atmósfera, es la *irradiancia solar* que es la responsable de la circulación atmosférica y, por lo tanto, del tiempo. El movimiento del aire, su calentamiento, la evaporación del agua, las tormentas eléctricas, los ciclones, tornados, etc., son fenómenos que no ocurrirían sin la radiación solar.

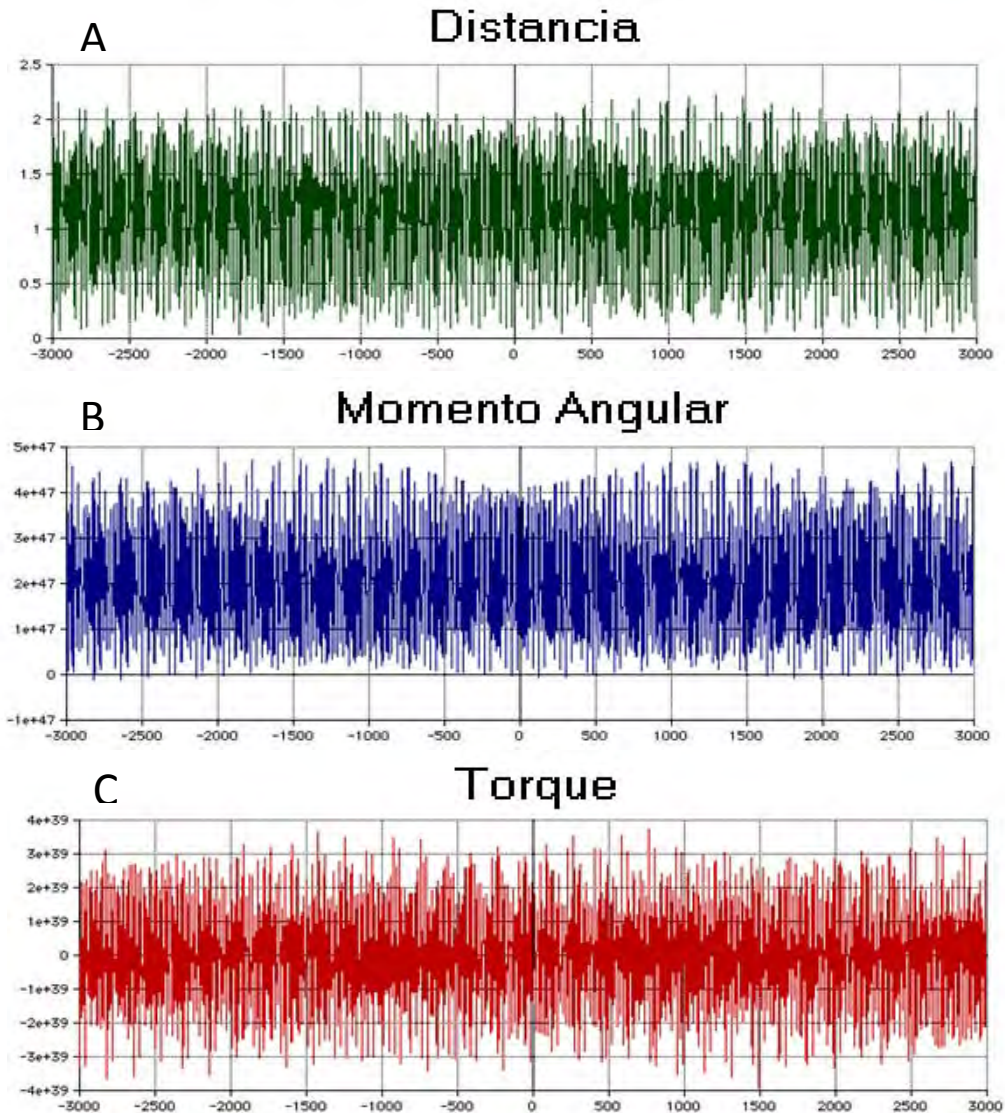


Figura 6 Relación entre el sol y el baricentro del Sistema Solar.
 A) Distancia, B) Momento Angular, C) Torque del Baricentro del Sistema Solar
 (Extraída de <http://landscheidt.wordpress.com/6000-year-ephemeris/>)

No toda la irradiancia solar incidente en la atmósfera llega a la superficie terrestre; esto se debe a que se produciendo distintos fenómenos (Heuveldop, et al., 1986):

Absorción: es la parte de la energía captada por una sustancia; no es transmitida y se transforma en otra forma de energía (frecuentemente en calor). La energía absorbida por la atmosfera calienta las capas más altas de esta.

Reflexión: es la desviación que se produce cuando parte de la energía incide sobre un cuerpo, sin que implique una penetración ni un cambio cualitativo de la radiación. En promedio 24% de la radiación solar incidente sobre la atmosfera es reflejada por las nubes y devuelta al espacio exterior.

Dispersión: consiste en un cambio selectivo de dirección de las diferentes longitudes de onda de la radiación. Este fenómeno implica un cambio en las características cualitativas de los rayos. Aproximadamente el 12 % de la radiación solar es dispersada en la atmosfera, de esta cantidad el 6% escapa a la atmosfera y el otro 6% llega a la superficie.

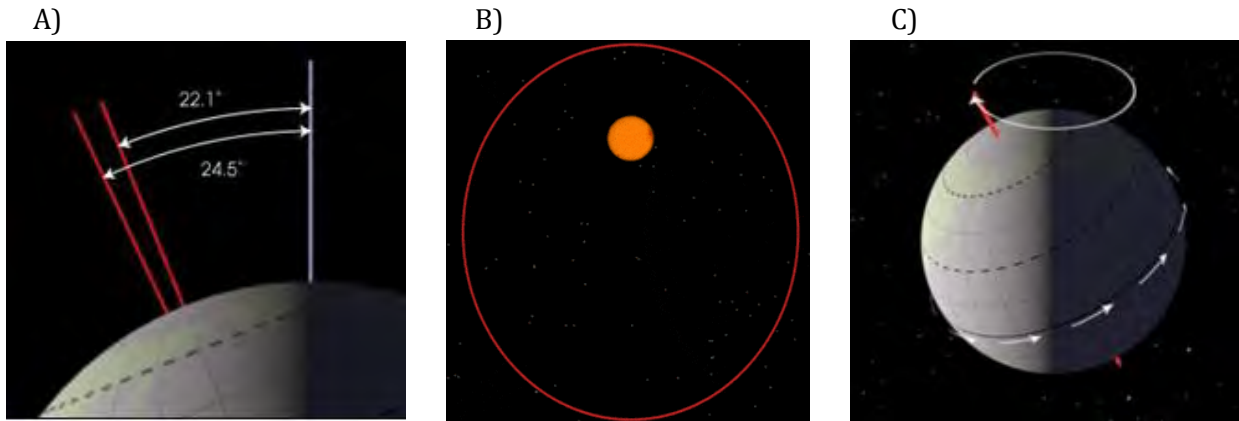


Figura 7 Ciclos de Milankovitch.

A) Inclínación del eje de la tierra, B) Excentricidad y C) La precesión del eje de rotación de la tierra. (Extraída de: http://earthobservatory.nasa.gov/Features/Milankovitch/milankovitch_2.php)

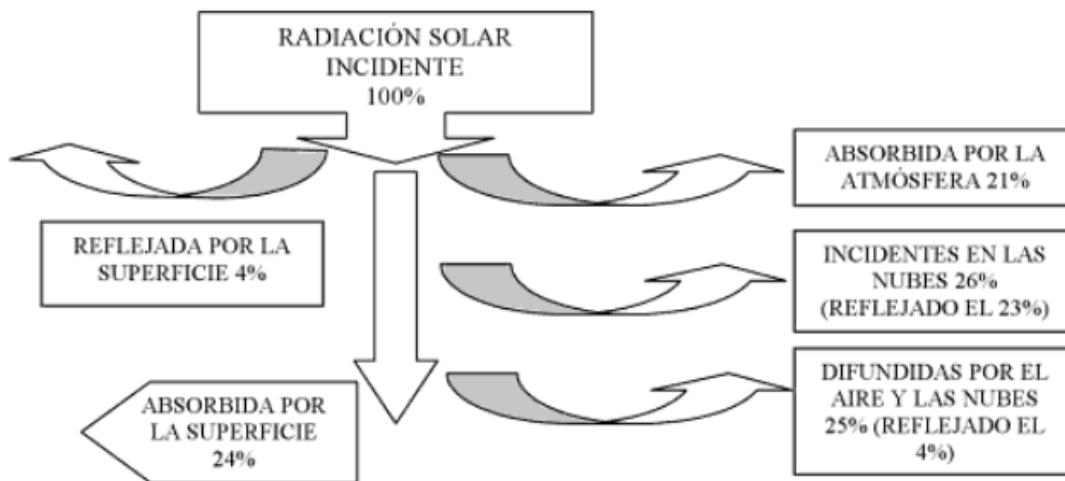


Figura 8 Distribución de la radiación Solar sobre la Tierra (Extraída de: Martínez De Osés, 2004).

En términos generales y en el largo plazo, el intercambio de energía entre el Sol y la Tierra presenta un estado de balance térmico, lo cual quiere decir que las cantidades globales de energía que ésta última recibe tienden a ser equivalentes a las que emite. En la figura 8 se muestra un esquema de la distribución de la radiación sobre la Tierra (Martínez De Osés,

2004). Si ese balance térmico se rompiera, dando lugar a un desequilibrio prolongado, la Tierra se enfriaría o calentaría paulatinamente hasta volverse inhabitable.

3.5. Reconstrucciones climáticas

La historia climática del planeta ofrece oportunidades únicas para conocer la sensibilidad de una región determinada a un cambio climático y permite analizar los procesos responsables de alterar las condiciones climáticas a escala regional. En las últimas décadas, ha existido una intensa actividad científica dirigida al estudio del clima. La importancia de estas investigaciones reside en su capacidad de evaluar la variabilidad climática más allá de los cambios observados dentro del periodo instrumental moderno.

La reconstrucción climática se realiza utilizando una gran variedad de evidencia climática indirecta como registros de heladas, fuertes nevadas, congelamiento de ríos y lagos, lluvias excesivas, etc. También se realiza utilizando indicadores indirectos como núcleos de hielo, fósiles, sedimentos oceánicos y anillos de árboles que son indicadores indirectos de la variabilidad climática.

Muchos investigadores han realizado reconstrucciones de clima, principalmente de temperaturas, por ejemplo, Esper et al. 2002; Jones and Mann 2004; Hegerl et al. 2006; Juckes et al. 2007; Mann et al. 2007; Frank et al. 2010, estas reconstrucciones están basadas en mediciones instrumentales, en documentos históricos y en datos indirectos obtenidos de anillos de árboles, corales, sedimentos oceánicos, etc. También han realizado reconstrucciones de hielo (Jurva, 1944; Tarand, 1993; Koslowski y Loewe, 1996; Koslowski y Glaser, 1995; Koslowski y Glaser, 1999) basándose principalmente en registros históricos de condiciones inusuales de hielo, volumen de hielo acumulado, extensiones de hielo, periodos de congelamiento, etc. La precipitación también ha sido tema de estudio y han logrado hacer reconstrucciones basándose en anillos de árboles y en registros históricos (Graumlich, 1993; LaMarche, 1974; Graybill y Funkhouser, 1999; Koslowski y Glaser, 1995).

Capítulo 4. Región del Báltico

4.1. Ubicación Geográfica

El mar Báltico es un mar semi-cerrado de aproximadamente 415,000 km² conectado al Mar del Norte y al Océano Atlántico (ubicado de 10°E a 30°E y de 53°N-66° N) (Hansson y Omstedt, 2007) (fig. 9). El mar báltico es el segundo más grande y salado mar del mundo con una superficie de 415000 km². El mar Báltico cubre 1.74 millones de km², incluyendo el territorio de un total de 14 países, con las mayores áreas en Suecia (25.3%), Rusia (19%), Polonia (17.8%) y Finlandia (17.4%) (Helcom, 2007).

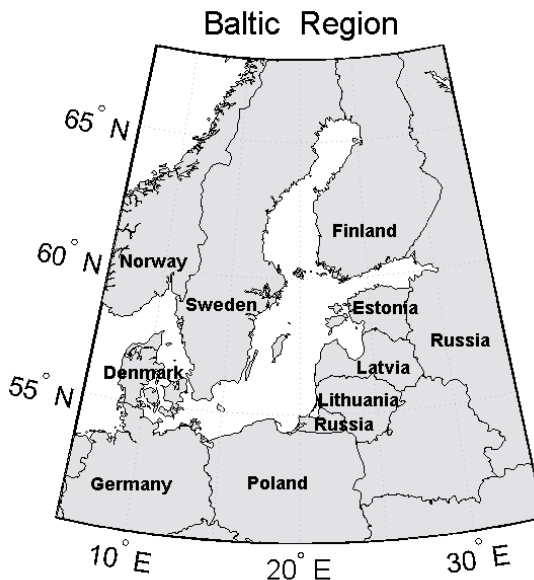


Figura 9. Mapa de la Región del Báltico.

4.2. Clima

El clima es dinámico y cambios en el son naturales. El clima del mar Báltico esta incrustado en el sistema de circulación atmosférica del hemisferio Norte con flujo de aire del oeste de intensidad variable. El fuerte flujo de aire marítimo del oeste ofrece la transportación de masa de aire húmedo sobre todo en el suroeste y sur de la cuenca del Mar Báltico, mientras que en el este y el norte de flujo de aire marítimo del oeste se debilita, lo que establece las condiciones climáticas cada vez más continentales. Hay dos tipos de climas dominantes en la región del mar Báltico: 1) En las zonas media y norte están dominadas por la zona de bosque templado de coníferas, mixtos con largos inviernos fríos y húmedos, donde la temperatura media del mes más cálido no es inferior a 10 ° C y la del mes más frío no es mayor que -3 ° C, y en donde la precipitación es, en promedio, moderado en cualquier época del año, y 2) la mayor parte del suroeste y sur pertenecen al clima marino de la costa oeste, donde los vientos imperantes constantemente traen humedad de los océanos y la

presencia de una corriente oceánica cálida provoca inviernos húmedos y no tan fríos, con frecuentes períodos de descongelación, incluso en pleno invierno (Helcom, 2007).

El área del mar Báltico está sujeta a influencias globales de emisiones de grandes cantidades de gases de efecto invernadero desde mediados del siglo 20. Cambios en el clima pueden deberse a factores naturales internos y externos o a factores antropogénicos (Helcom, 2007).

El área costera del mar del báltico está altamente poblado dando como resultado una alta influencia antropogénico. El separar el efecto de la influencia antropogénica de la natural es extremadamente difícil. Baltex (2006) valoró el cambio climático en el mar Báltico encontrando que no existe una relación directa entre el cambio climático y los gases de efecto invernadero. El IPCC (2007) estableció que las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GHG) eran probablemente los causantes del calentamiento global.

Muchos investigadores han realizado estudios, utilizando diferentes técnicas, sobre la extensión de la variabilidad climática referente a la temperatura del último milenio (Mann, et al., 1999; Esper, et al., 2002; Moberg, et al., 2005). Al final del siglo 19 la Pequeña era de Hielo, un periodo de 500 años con condiciones generalmente frías, llegó a su fin. La temperatura global en los últimos 100 años ha sufrido un incremento que ha causado preocupación sobre la posible influencia antropogénico en el clima global.

4.3. Hielo

Las condiciones de hielo son un sensible indicador del cambio climático (Jevrejeva, 2001). En el área del mar Báltico existen documentos que registran las condiciones de hielo extremos desde el año 690 D.C (Speerschneider 1915, Lamb 1977), sin embargo estos se limitan a registrar condiciones inusuales de hielo. Registros periódicos de observaciones de hielo empezaron hasta el siglo 16 en el área sur del mar Báltico cuando el gobierno obligó a la población de la zona costera a establecer marcas de navegación (Rudovic 1930). Estas marcas de navegación tenían que hacerse después de que el hielo desapareciera y eran recolectadas al inicio de la temporada de hielo. El monitoreo de hielo permitía establecer las rutas de navegación durante la temporada de invierno (Jevrejeva, 2001). Estas observaciones no eran regulares pero han contribuido enormemente al estudio de las variaciones del clima en la región del mar Báltico.

En el mar Báltico durante el último siglo se ha detectado una tendencia hacia condiciones de hielo menos extremas, y esto se ve reflejado en los datos anuales de las series de tiempo de la máxima extensión de hielo y en la longitud de la temporada de hielo en el mar Báltico. El mayor cambio ha sido en la longitud del periodo de duración de hielo, el cual ha decrecido de 44 a 14 días.

Muchos estudios se han hecho sobre reconstrucciones de clima basados en datos indirectos de parámetros de hielo, Camuffo (1987) investigó el congelamiento de la laguna de Venecia, Catchpole y Hanuta (1989) analizaron la cubierta de hielo en la bahía

Hudson, etc. Jurva (1944) construyó una serie de tiempo anual de la máxima extensión de hielo en el mar Báltico desde 1720 y este trabajo fue continuado por Seinä y Palosuo (1996). Gurljatowicz & Kozuchowski (1995) hicieron el análisis espectral de las series de tiempo anual de la máxima extensión de hielo en el mar Báltico encontrando periodicidades de 3.5, 5.3 y 7 años.

Tarand (1993) construyó una serie de tiempo de rompimiento del hielo en el puerto Tallin desde 1501. Koslowski (1996, 1995, 1999, 2011) en diferentes trabajos estudió las condiciones de hielo en la zona occidental del Báltico en términos del índice de la severidad de hielo en invierno. Koslowski hizo una reconstrucción utilizando 7 tipos de severidad de inviernos basados en el volumen de hielo superficial a lo largo de la costa Alemana durante 1501 a 1995. También se realizaron estudios sobre las condiciones de hielo a lo largo de la costa de Polonia en el periodo de 1896 a 1993 (Sztobryn, 1994). Jevrejeva (2001) hizo la reconstrucción de la severidad de invierno en el Mar Báltico basado en series históricas de rompimiento de hielo en el puerto de Riga entre 1529 y 1990.

4.4. Precipitación

La circulación atmosférica y las características (humedad, estabilidad) de las masas de aire determinan en gran medida la incidencia y la tasa de precipitación; Sin embargo, la orografía (ondulaciones en la superficie de la tierra, de las pequeñas colinas a grandes cordilleras) influye en gran medida la distribución espacial y la intensidad de las precipitaciones (Helcom, 2007).

Los patrones de precipitación pueden diferir considerablemente entre las zonas del Mar Báltico y de las zonas de la costa. Es difícil realizar buenas predicciones sobre la cantidad de precipitación que habrá en las zonas marítimas y para la nieve, debido entre otros a la variación a pequeña escala de las precipitaciones y las dificultades de pluviómetros para capturar toda la precipitación. La mayor cantidad de precipitación ocurre en las regiones montañosas Escandinavas y en el sur de Polonia, mientras que la menor cantidad de precipitación ocurre en la parte norte y noreste de la región del Báltico y en el centro del mar Báltico. La mayor precipitación ocurre durante los meses de Julio y Agosto (hasta 80 mm) y la mínima ocurre durante el periodo de Febrero a Abril (menos de 45 mm en promedio) (Helcom, 2007).

Cambios en los patrones climáticos en la región del Báltico están provocando cambios en los patrones de la precipitación, tanto geográficos como estacionales. El incremento en la precipitación ocurre principalmente en el invierno. Las zonas del Sur son generalmente más secas que las zonas del Norte. Estos cambios en la precipitación afecta la cantidad de agua que desemboca en el mar Báltico. En el verano el flujo de agua de los ríos tiende a decrecer mientras que en invierno incrementa (Helcom, 2007).

Capítulo 5. Análisis de series de tiempo

5.1. Introducción

Una serie de tiempo es un conjunto de mediciones tomadas secuencialmente en tiempo (Box-Jenkins, 1976). Los objetivos principales del análisis de las series de tiempo son caracterizar la señal, entender y modelar el sistema de generación de datos y realizar predicciones.

Dentro de las series de tiempo pueden identificarse ciertos elementos que son considerados como comportamientos o patrones de las series, estos elementos proporcionan una idea del futuro comportamiento de la serie. Las series pueden contener algunos de los siguientes elementos:

- a) **Tendencia:** Es un patrón de cambio sistemático en una serie de tiempo. Puede ser una tendencia lineal creciente, exponencial creciente, etc.
- b) **Variación estacional:** Indica que la serie se repite periódicamente con periodo de repetición menor o igual a un año.
- c) **Ciclo:** Indica que una serie de tiempo se repite periódicamente pero con periodos mayores a un año.
- d) **Fluctuaciones Aleatorias.** Son pequeñas irregularidades en la serie que se forman por todos aquellos factores que intervienen en el proceso y lo hacen impredecible.

Las series temporales se pueden clasificar en:

- a) **Estacionarias:** Una serie es estacionaria cuando la media y la variabilidad son constantes a lo largo del tiempo.
- b) **No estacionarias:** Son series en las cuales la media y/o variabilidad cambia en el tiempo.

El primer paso en la investigación de cualquier serie de tiempo siempre involucra un cuidadoso escrutinio de los datos graficados contra el tiempo. Este escrutinio generalmente sugiere el método de análisis así como la estadística que será útil para resumir la información de los datos. El análisis de datos puede ser tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, estas dos formas de analizar los datos no necesariamente son mutuamente excluyentes (Shumway y Stoffer, 2000).

El análisis en el dominio del tiempo es generalmente motivado por la presunción de que la correlación entre puntos adyacentes en tiempo es explicada en términos de una dependencia de los valores actuales con los valores anteriores. En el análisis en el dominio del tiempo es importante describir la distribución de las variables estudiadas. El análisis se enfoca en modelar algunos de los valores futuros de una serie de tiempo como una función paramétrica de los valores actuales y pasados. Este modelado utiliza los resultados en el dominio del tiempo como herramienta de predicción (Shumway y Stoffer, 2000).

El análisis en el dominio de la frecuencia asume que la principal característica de interés en la serie de tiempo está relacionada con sus variaciones periódicas. Estas variaciones periódicas son frecuentemente causadas por algún fenómeno físico o ambiental de interés. En el análisis espectral, la separación en varias oscilaciones periódicas de una serie de tiempo está acompañada por la evaluación separada de la potencia espectral de cada periodicidad de interés.

5.2. Análisis en el dominio del tiempo

A la secuencia de variables aleatorias, $\{x_t: t=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots\}$, es llamada proceso estocástico y sirve como modelo para una serie de tiempo.

La estructura probabilística completa de un proceso estocástico es determinada por el conjunto de distribuciones de todas las colecciones finitas de x . La mayor parte de estas distribuciones pueden ser descritas en términos de medias, varianzas y covarianzas (Cryer y Chan, 2008).

El análisis en el dominio del tiempo inicia con la exploración de los datos. Los datos son agrupados en distribuciones de frecuencias, estas se describen por medio de un conjunto de valores, mediante los cuales se pretende sintetizar la información. Los histogramas son una forma de representación gráfica de una distribución de frecuencias que consiste en representar las frecuencias por medio de áreas de rectángulos (barras). Las medidas que describen el comportamiento de un conjunto de datos son: las de tendencia central, las de colocación (posición), las de dispersión (variabilidad) y las de forma (fig. 10).

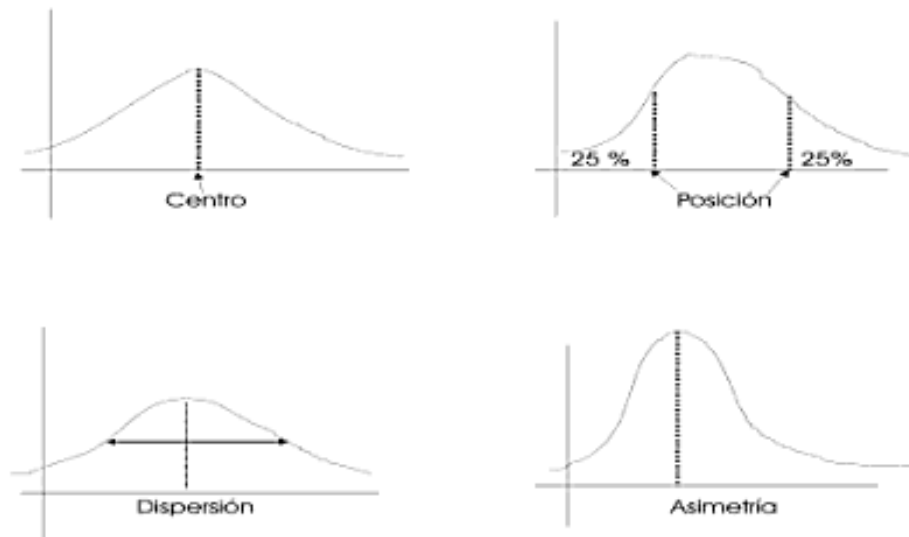


Figura 10 Ilustración de las medidas estadísticas.

La medida más importante que describe la tendencia central es la media aritmética. La media aritmética de cierto conjunto de números se encuentra sumando los números y

dividiendo después entre la cantidad de datos. Si x_1, x_2, \dots, x_n son números, entonces la media aritmética de este conjunto de números está dada por:

$$\mu = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} . \quad (1)$$

Una medida de colocación o de posición para una distribución de frecuencias es aquel valor para el cual una porción específica de la distribución queda debajo de él. La mediana, los percentiles y cuartiles son ejemplos de medidas de posición.

La mediana es el puntaje medio ordenado de un conjunto de datos.

El P -ésimo percentil es un valor tal que a lo más un $p\%$ de los datos tienen dicho o menos de ese valor y, al menos, un $(100-p)\%$ de los datos tienen este valor o más. Los Cuartiles son las medidas de posición correspondiente a un conjunto ordenado de datos divididos en cuatro partes iguales.

Algunas de las medidas de dispersión o variación de los datos pueden ser el rango o recorrido, la desviación de un dato, varianza y la desviación estándar.

El rango o recorrido se define como la diferencia entre el dato más alto y el más bajo.

La desviación de un dato se define como la diferencia entre el dato y la media del conjunto de datos de donde proviene dicho dato. Si x_1, x_2, \dots, x_n son números, entonces la desviación del dato x_i se define como:

$$\text{Desviación del dato} = x_i - \mu . \quad (2)$$

La varianza de una población se define como el promedio de los cuadrados de la desviaciones de los valores y se denota por σ^2 . La varianza de la población de los valores x_1, x_2, \dots, x_n está dada por la ecuación 3.

$$\sigma^2 = \frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n - 1} . \quad (3)$$

La desviación estándar de una población se define como la raíz cuadrada de la varianza de la población y está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(x_1 - \mu)^2 + (x_2 - \mu)^2 + \dots + (x_n - \mu)^2}{n - 1}} . \quad (4)$$

Para comparar las dispersiones de dos o más conjuntos de valores es necesario calcular el coeficiente de variación de Pearson. El coeficiente de variación de Pearson de un conjunto de datos se está dado por:

$$CV = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right) * 100\% . \quad (5)$$

Al dividir la desviación estándar entre la media aritmética se elimina la influencia de la escala de medida, convirtiéndose así en el coeficiente de variación en una medida útil para comparar conjuntos de datos con diferentes unidades de medida.

Las medidas de forma nos proporcionan información sobre cómo se distribuyen los datos. Las medidas de forma más importante son las medidas de asimetría o coeficiente de sesgo.

Una distribución de frecuencias es simétrica cuando lo es su representación gráfica, es decir, los datos equidistantes a una media central de la misma tienen frecuencias iguales. Esta medida central coincide con la mediana y la media. En caso de no cumplirse lo anterior la distribución es asimétrica, la asimetría puede presentarse a la derecha o a la izquierda de la gráfica (fig. 11).

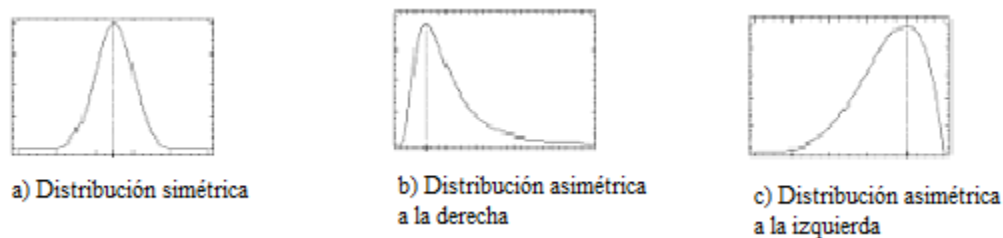


Figura 11 Tipos de distribuciones.

Las medidas de asimetría o coeficientes de sesgo tienen como finalidad elaborar un indicador que permita establecer el grado de simetría o asimetría que presenta una distribución. La medida de asimetría más utilizada es el coeficiente de Pearson.

El coeficiente de asimetría de Pearson se define como:

$$A_p = \frac{\mu - moda}{\sigma}, \quad (6)$$

donde la *moda* es el valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos. Si $A_p = 0$, la distribución es simétrica, si $A_p < 0$ la distribución es asimétrica a la izquierda y cuando $A_p > 0$ la distribución es asimétrica a la derecha.

5.2.1. Normalidad

Una de las distribuciones teóricas mejor estudiadas en los textos de estadística y más utilizada en la práctica es la distribución normal, también llamada distribución gaussiana. La distribución normal fue reconocida por primera vez por el francés Abraham de Moivre (1667-1754).

Una gráfica de probabilidad normal puede ayudarnos a verificar si los datos provienen o no de una distribución normal. Algunas veces, un histograma de una gráfica de probabilidad

normal nos muestra que nuestros datos no son normales, pero una transformación de dichos datos puede producir una curva simétrica con forma de campana.

Aunque las gráficas de probabilidad normal son mejores que los histogramas para evaluar visualmente desviaciones de la normalidad, nuestra percepción visual es todavía subjetiva.

Una medida objetiva de no normalidad se puede obtener realizando diferentes pruebas: la prueba de Shapiro-Wilk, la prueba de Kolmogorov – Smirnov (lilliefors), la prueba chi-cuadrado, y la prueba de Anderson – Darling entre otras, pero las dos más utilizadas son el contraste X^2 de Pearson, y la prueba de Kolmogorov–Smirnov.

La idea del contraste de Pearson es muy sencilla: se agrupan los datos en k clases ($k > 5$), como si fuéramos a construir un histograma, cubriendo todo el rango posible de valores, siendo deseable disponer, aproximadamente, del mismo número de datos en cada clase y al menos de tres datos en cada una. Llamamos O_i al número de datos observado en la clase i . Mediante el modelo de probabilidad que se desea verificar se calcula la probabilidad P_i asignada a cada clase, y por lo tanto, para una muestra de n datos, la frecuencia esperada según ese modelo de probabilidad es $E_i = n.P_i$.

Se calcula entonces el siguiente índice de discrepancia entre las frecuencias observadas y las que era previsible encontrar si el modelo fuera el adecuado:

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}, \quad (7)$$

que se distribuye aproximadamente como una X^2 si el modelo es correcto.

Si el modelo se especifica de forma completa con las probabilidades P_i , conocidas antes de tomar los datos, el número de grados de libertad es $k-1$. Pero si se han estimado r parámetros del modelo a partir de los datos, entonces los grados de libertad son $k-r-1$.

El método más recomendable para el caso en que las variables sean continuas. Consiste en una prueba de hipótesis en el que la hipótesis nula afirma que los datos sí se ajustan a la distribución $F(x)$ y la hipótesis alterna establece que no se ajustan. El estadístico de prueba está dado por:

$$D_c = \text{Max}\{|H_{i-1} - F_i|, |H_i - F_i|\}. \quad (8)$$

Este valor se compara con el valor crítico que se encuentra en una tabla. Se rechaza la hipótesis nula si D_c es mayor que el valor de tabla para el nivel de confianza y el tamaño de muestra que se estén considerando.

Cuando las series de tiempo no pasan las pruebas de normalidad, como regla general, se trata de elegir una transformación que conduzca a una distribución simétrica, y más

cercana a la distribución normal. De este modo, se pueden aplicar numerosas técnicas de inferencia estadística.

Cuando se tienen distribuciones de frecuencias con asimetría negativa (frecuencias altas hacia el lado derecho de la distribución), es conveniente aplicar la transformación $y = x^2$. Esta transformación comprime la escala para valores pequeños y la expande para valores altos.

Para distribuciones asimétricas positivas se usan las transformaciones \sqrt{x} , $\ln(x)$ y $1/x$, que comprimen los valores altos y expanden los pequeños. El efecto de estas transformaciones está en orden creciente: menos efecto \sqrt{x} , más $\ln(x)$ y más aún $1/x$

Las transformaciones de potencia constituyen una familia de transformaciones muy utilizadas. El método de Box-Cox ofrece un método simple para elegir la transformación de potencia más apropiada.

5.2.2. Estacionariedad

Un proceso es estacionario si su media y varianza son constantes en el tiempo, y si el valor de la covarianza entre dos periodos solo depende de la distancia entre estos dos periodos y no del momento en que se mida. Si la media depende del tiempo (no estacionariedad en la media), se dice que la serie tiene una tendencia determinista o que la serie es estacionaria alrededor de la tendencia. Si la varianza depende del tiempo (no estacionariedad en la varianza) se dice que la serie tiene una tendencia estocástica. También pueden presentarse tendencias estocásticas junto con deterministas como en el caso de un paseo aleatorio con deriva.

La no estacionariedad afecta las propiedades de los estimadores Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) y los procedimientos convencionales de inferencia estadística. El problema está en que la combinación lineal de series no estacionarias es generalmente no estacionaria; la excepción es lo que se denomina cointegración: Engle y Granger (1987), por lo que los errores de una regresión de variables no estacionarias serán no estacionarios si estas no están cointegradas. Al dejar de ser los errores un ruido blanco, no se cumplirán entonces los supuestos que garantizan las propiedades de los estimadores MCO. La no estacionariedad conduce también a que la distribución asintótica de los estimadores MCO no sea normal, por lo que los procedimientos de inferencia estadística, como las pruebas t y F , dejan de tener validez y pueden generar resultados engañosos.

La estacionariedad se puede observar obteniendo la función de auto-correlación. La autocorrelación se define como la correlación existente entre los miembros de una serie de tiempo. La Función de auto-correlación en una serie temporal no estacionaria, no decaerá, ni se extinguirá rápidamente.

La autocorrelación puede deberse a la existencia de tendencia y /o un comportamiento cíclico en una serie de tiempo. La existencia de tendencias crecientes en el tiempo

provocaría la presencia de una autocorrelación positiva. La existencia de un comportamiento cíclico también provocaría la presencia de una autocorrelación positiva.

La función de auto-covarianza, para $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, es definida como:

$$Cov(x_t, x_t) = E[(x_t - \mu_t)(x_t - \mu_t)]. \quad (9)$$

La función de auto-correlación $Corr(x_t, x_t)$ para $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, es definida como:

$$Corr(x_t, x_t) = \frac{Cov(x_t, x_t)}{\sqrt{Var(x_t)Var(x_t)}}. \quad (10)$$

Los resultados de la observación de la función de auto-correlación pueden darnos una idea de estacionariedad pero se requiere de pruebas para afirmar si una serie de tiempo es estacionaria o no.

Un procedimiento sencillo que no requiere la aplicación de ningún contraste para determinar la presencia de raíces unitarias en las series, es el de observar la representación gráfica de la función de autocorrelación total (FAT). Distintos trabajos, pero en especial los presentados por Hoskin (1989), Diebold y Rudebusch y Lo (1991), se han centrado en analizar las variaciones de la función de autocorrelación de una serie de tiempo.

En general, la regla a aplicar será sencilla: los valores de la FAT de una serie con raíces unitarias descienden muy suavemente hacia el cero mientras que cuando no hay presencia de raíces unitarias el descenso es exponencial.

Dickey y Fuller (1981) diseñaron un procedimiento para probar formalmente la presencia de Raíces Unitarias. Para que una serie sea estacionaria, las raíces (soluciones) del polinomio en el operador de rezagos, si son reales, su módulo debe ser mayor que 1, y si son complejas deben estar fuera del círculo unitario. Por ejemplo, un proceso AR(1):

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + e_t, \quad (11)$$

$$(1 - \alpha_1 L)y_t = e_t, \quad (12)$$

donde L es el operador de rezagos y e_t es un ruido blanco, será estacionario si el módulo del coeficiente del término autorregresivo es menor que 1, ($|\alpha_1| < 1$). Si $|\alpha_1| = 1$ entonces la serie tiene una raíz unitaria; en este caso la varianza de la serie es una función del tiempo y, por tanto, es no estacionaria.

5.2.3. Modelado de series de tiempo

Al instrumento de análisis que permita reproducir el comportamiento de la variable de interés de una serie de tiempo se le conoce como Modelo.

Los modelos de series temporales pueden ser uni-variantes (sólo se analiza una serie temporal en función de su propio pasado) o multi-variantes (se analizan varias series temporales a la vez). Los modelos más comunes son:

- Modelos autorregresivos (AR)
- Modelos de integración (I)
- Modelos medias móviles(MA)

Aunque la distribución normal es la piedra angular de las aplicaciones estadísticas, los datos no siempre se ajustan a los criterios de la distribución normal. En tales casos, los investigadores a menudo transforman los datos no normales en datos que siguen una distribución aproximadamente normal. Las transformaciones de potencia constituyen una familia de transformaciones que incluye las transformaciones logarítmicas y fraccional exponente. El método de Box-Cox ofrece un método simple para elegir la transformación de potencia más apropiada.

5.3. Análisis en el dominio de la frecuencia

En el análisis de señales en el dominio de la frecuencia existe un gran número de herramientas que han sido desarrolladas a lo largo del tiempo. La transformada de Fourier ha sido muy utilizada para analizar señales estacionarias. Sin embargo no todas las señales tienen un comportamiento estacionario. En el caso de las señales no-estacionarias, es decir, aquellas cuya frecuencia varía en el tiempo, al tener la señal producto de la transformada de Fourier resulta inútil realizar el paso al dominio del tiempo porque no permite determinar en qué momento se presentan un cambio en la frecuencia. Surge entonces la necesidad de contar con una representación localizada en el tiempo y la frecuencia. De esta manera surge el desarrollado de nuevas herramientas como la transformada de Fourier con ventanas o la transformada wavelet (Daubechies, 1990) han permitido el análisis de señales no estacionarias.

5.3.1. Transformada de Fourier con ventanas

Una señal no estacionaria es dividida en una secuencia de segmentos de tiempo en los cuales la señal puede ser considerada como cuasi-estacionaria y la Transformada de Fourier es aplicada a cada segmento local de la señal. Gabor, en 1940, fue el primero en introducir la Transformada rápida de Fourier de, conocida como la Transformada de Fourier con Ventana Deslizante, definida como:

$$S_f(\omega, \tau) = \int f(t)g(t - \tau) * \exp(-i\omega t) dt , \quad (13)$$

donde $g(t)$ es una ventana deslizante, la cual tiene un ancho fijo y cambia a lo largo del eje x por un factor t (Shenh, 1996). Con la transformada de Fourier con ventanas se logra una mejor localización de la aparición de una singularidad de una señal. Pero solo se conocerá en que intervalo de tiempo se produce, debido a que la localización depende del ancho

elegido para la función de la ventana (tamaño fijo). Además, la aparición de eventos muy cercanos no podrá ser distinguida si aparecen dentro de una misma ventana.

Al utilizar la transformada de Fourier por ventanas se presenta una nueva deficiencia, el tamaño fijo de la ventana temporal, que impide analizar pequeños detalles en señales de frecuencia variable.

5.3.2. Transformada Wavelet

La Transformada Wavelet es una versión mejorada de la transformada de Fourier con ventanas. Esta Transformada es eficiente para el análisis local de señales no estacionarias y de rápida transitoriedad y, al igual que la Transformada de Fourier con Ventana, mapea la señal en una representación de tiempo-escala. El aspecto temporal de las señales es preservado. La Transformada Wavelet provee análisis de multi-resolución con ventanas dilatadas. El análisis de las frecuencias de mayor rango se realiza usando ventanas angostas y el análisis de las frecuencias de menor rango se hace utilizando ventanas anchas (Sheng, 1996). En la Figura 12 se muestra una comparación entre la transformada de Fourier por ventanas y la transformada Wavelet.

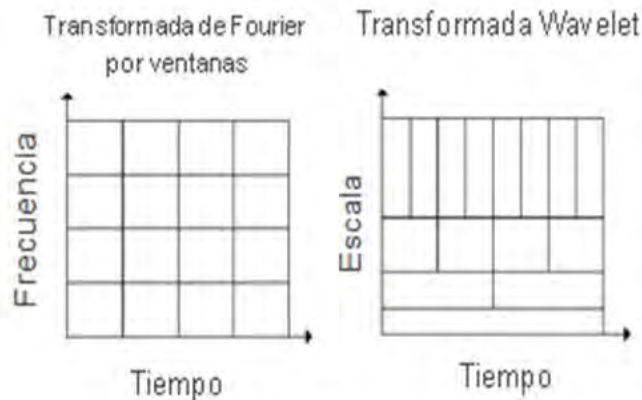


Figura 12 Ilustración de la Transformada de Fourier por Ventanas y la Transformada Wavelet.

La Transformada Wavelet de una función $f(t)$ es la descomposición de $f(t)$ en un conjunto de funciones escaladas móviles de la *wavelet original* (*wavelet madre*). Las funciones wavelet se deben elegir tomando en cuenta la que más se adapte al tipo de señal que se está analizando y para ello se deben tomar en cuenta varias consideraciones (Torrence y Compo, 1998):

- **Ortogonales o no ortogonales:** En los wavelets ortogonales el número de convoluciones a cada escala es proporcional al ancho del wavelet base a esa escala. Este tipo de wavelet es de gran ayuda para el procesamiento de señales ya que proporciona la representación más compacta de la señal. El wavelet no ortogonal es muy redundante a las escalas grandes, donde el espectro wavelet a tiempos

adyacentes es altamente correlacionado, este tipo de análisis es muy útil para análisis de series de tiempo donde suaves variaciones continuas de amplitud son esperadas.

- **Compleja o real:** Una función wavelet compleja proporcionara información tanto de amplitud como de fase y está mejor adaptada para capturar el comportamiento de los osciladores. Una función real solamente dará una componente simple que puede ser utilizada para aislar picos o discontinuidades.
- **Ancho:** El ancho de una función wavelet está definido como el tiempo de doblamiento (e-folding) de la amplitud wavelet. La resolución de una función wavelet está determinada por el balance entre el ancho en espacio real y el ancho en el espacio de Fourier. Un una función muy angosta en tiempo tendrá una muy buena resolución en tiempo pero muy pobre resolución en frecuencia, mientras que una función muy amplia en tiempo producirá una mala resolución en tiempo y muy buena en frecuencia.
- **Forma.** La función wavelet debe reflejar el tipo de características presentes en las series de tiempo. Para análisis de wavelets ortogonales se pueden utilizar las funciones Harr o Daubechies. Para wavelets no ortogonales pueden utilizarse las funciones de Morlet, Paul o Dog.

Las wavelets se pueden separar en dos grupos: la transformada wavelet continua (CWT) (wavelets no ortogonales) y la transformada wavelet discreta (DWT) (wavelets de bases ortogonales). Las CWT producen mejores resultados en el análisis de señales, y en la detección y extracción de características, ya que brindan una completa descripción espectro-temporal de la señal analizada. Las DWT, presentan resultados muy buenos cuando se necesita comprimir cierta cantidad de datos para su almacenamiento o transmisión. Dadas las características de la CWT enfocaremos nuestro estudio solo este tipo de transformada wavelet.

La elección de la función wavelet madre es la parte más importante del proceso de descomposición. Esta función puede afectar la resolución tiempo-frecuencia de los resultados. Existen muchas funciones que pueden ser utilizadas en la CWT como función wavelet madre: Morlet, Sombrero Mexicano, Paul, DOG, etc. Algunas de estas funciones dan mejor resolución en frecuencia que en tiempo y otras dan mejor resolución en tiempo que en frecuencia. En la figura 13 se muestran 3 ejemplos de wavelet madre.

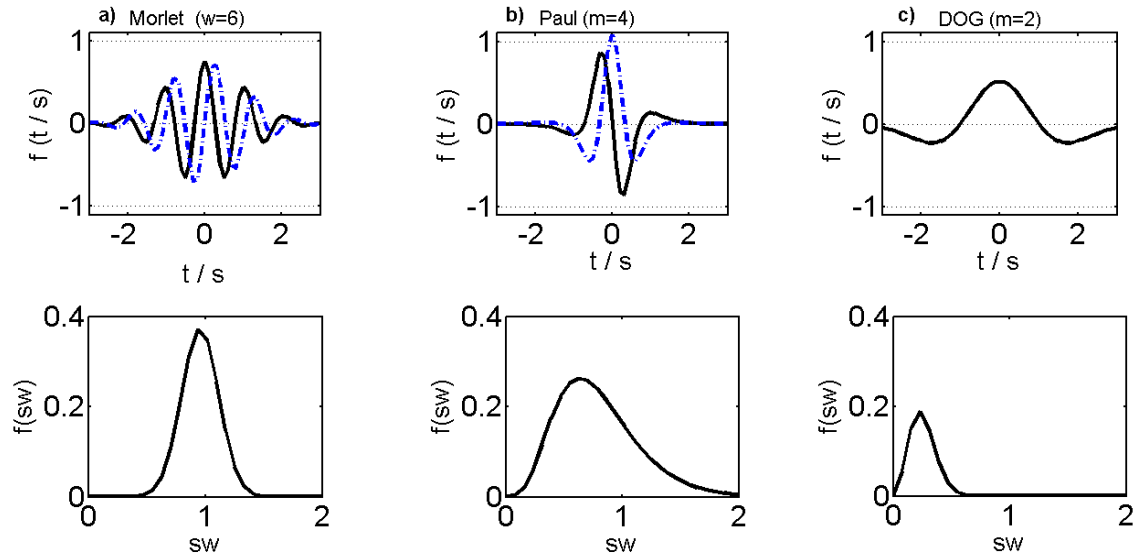


Figura 13 Wavelets madre.

Las gráficas de la parte superior muestran los wavelets madre en el dominio del tiempo, la parte real se muestra en líneas continuas y la parte imaginaria en líneas punteadas. Las gráficas de la parte inferior muestran los wavelets madre en el dominio de la frecuencia. (a) Morlet, (b) Paul ($m = 4$), (c) Sombrero mexicano (DOG, $m = 2$)

Para este trabajo se eligió la Transformada wavelet de Morlet ya que proporciona una buena resolución tanto en tiempo como en frecuencia y además es compleja lo que implica que proporcionará información de fase de las señales analizadas.

Una función wavelet de Morlet consiste de una onda plana modulada por una gaussiana (Torrence y Compo, 1998).

$$\psi_0(\eta) = \pi^{1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2} \quad , \quad (14)$$

donde ω_0 es la frecuencia adimensional, aquí tomada como 6 para satisfacer la condición de admisibilidad. La función wavelet es “admisble” como wavelet siempre y cuando su media sea cero y este localizada tanto en el espacio de tiempo como en el de frecuencia (Farge, 1992). Esta función wavelet de Morlet se puede observar en la figura 13 a.

La transformada wavelet continua de una secuencia discreta x_n se define como la convolución de x_n con una versión escalada y trasladada de $\psi_0(\eta)$:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \psi^* \left[\frac{(\eta' - \eta)\delta t}{s} \right] \quad , \quad (15)$$

donde el “*” indica el complejo conjugado, s es la escala y η es el desplazamiento en tiempo. Es posible calcular la transformada wavelet usando la ecuación anterior pero es

considerablemente más rápido hacer el cálculo en el dominio de la frecuencia. La transformada discreta de Fourier de x_n es:

$$\hat{X}_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-2\pi i k n / N} , \quad (16)$$

donde $k=0\dots N-1$ es el índice de frecuencia. Por el teorema de la convolución la transformada wavelet es la transformada de Fourier inversa del producto:

$$W_n(s) = \sum_{k=0}^{N-1} \hat{X}_k \hat{\psi}^*(s\omega_k) e^{i\omega_k n \delta t} , \quad (17)$$

donde la frecuencia angular se define como:

$$\omega_k = \begin{cases} \frac{2\pi k}{N\delta t} & : k \leq \frac{N}{2} \\ -\frac{2\pi k}{N\delta t} & : k > \frac{N}{2} \end{cases} . \quad (18)$$

Utilizando $W_n(s)$ y la rutina estándar de transformada de Fourier es posible calcular la transformada wavelet continua (para una escala s dada) para todos los valores de n al mismo tiempo y de una manera eficiente. Para asegurar que la transformada wavelet a cada escala s es comparable entre ellas y también comparable a la transformadas de otras series, la función wavelet a cada escala s es normalizada para tener energía unitaria.

$$\hat{\psi}(s\omega_k) = \left(\frac{2\pi s}{\delta t}\right)^{1/2} \hat{\psi}_0(s\omega_k) . \quad (19)$$

Usando esta normalización, a cada escala s tenemos:

$$\sum_{k=0}^{N-1} |\hat{\psi}(s\omega_k)|^2 = N , \quad (20)$$

donde N es el número de puntos. Así la transformada wavelet es pesada solo por la amplitud de los coeficientes de la transformada de Fourier \hat{x}_k y no por la función wavelet. Si se utiliza la fórmula de la convolución la normalización será:

$$\psi\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] = \left(\frac{\delta t}{s}\right)^{1/2} \psi_0\left[\frac{(n'-n)\delta t}{s}\right] , \quad (21)$$

donde $\psi_0(\eta)$ es normalizado para tener energía unitaria.

La potencia espectral del wavelet está dado por $|W_n(s)|^2$. Los valores esperados para $|W_n(s)|^2$ es igual a N veces los valores esperados para $|\hat{x}_k|^2$. Para series de tiempo con ruido blanco este valor esperado es σ^2/N , donde σ^2 es la varianza. Así para procesos de ruido blanco, el valor esperado para la transformada es $|W_n(s)|^2 = \sigma^2/N$ para todas las n y s .

Debido a que trabajamos con series de tiempo de longitudes finitas errores ocurrirán tanto al inicio como al final del espectro de potencia wavelet. Una solución a este problema es agregar ceros al final de la serie y removerlos después de la transformada wavelet. La serie de tiempo es rellenada con ceros hasta hacer la longitud de la serie igual a la siguiente potencia de dos con la finalidad de limitar los efectos de borde y aumentar la velocidad de la transformada de Fourier.

El cono de influencia (COI) es la región del espectro wavelet donde los efectos de borde son importantes y se define como el tiempo e-folding para la autocorrelación de la potencia wavelet a cada escala. El tiempo e-folding se elige para que la potencia wavelet en el borde caiga por un factor e^{-2} y asegurar que los efectos de borde sean despreciables mas allá de este punto.

La transformada wavelet descompone una serie de tiempo en sus principales componente. Es posible reconstruir la serie de tiempo a partir de la suma de la parte real de la transformada wavelet sobre todas las escalas.

$$x_n = \frac{\delta_j \delta t^{1/2}}{C_\delta \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\Re\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}}, \quad (22)$$

donde el factor $\psi_0(0)$ remueve la energía de escalamiento, mientras que $s_j^{1/2}$ convierte la transformada wavelet a densidad de energía. C_δ es constante para cada función wavelet (Morlet, $C_\delta = 0.776$)

Para determinar los niveles de significancia es necesario escoger un apropiado espectro de fondo. Para muchos de los fenómenos geofísicos un espectro de fondo podría ser ruido blanco (con un espectro de Fourier plano) o ruido rojo (incremento en la potencia con decremento en la frecuencia).

El ruido blanco o puramente aleatorio es una secuencia de variables aleatorias con media cero, varianza constante y covarianzas. Se denotará comúnmente por a_t , $t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, $E(a_t) = 0$, $V(a_t^2) = \sigma_a^2$, y $Cov(a_t a_s) = 0$ para $t \neq s$.

En la figura 14 podemos observar la gráfica de un proceso de ruido blanco.

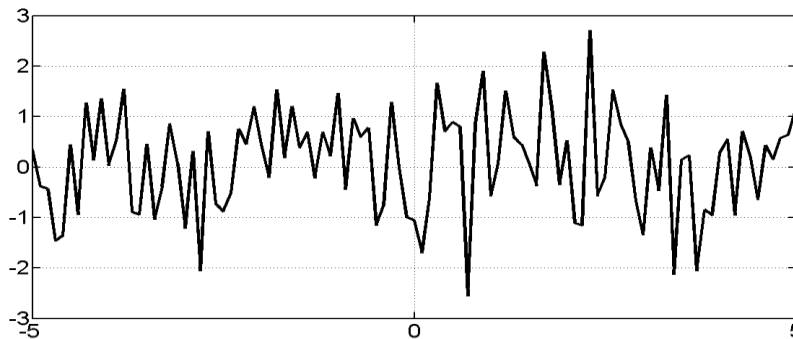


Figura 14 Proceso ruido blanco normal con media=0, varianza= 1.

Se observa que la serie simulada oscila en torno a un nivel constante nulo con una dispersión constante y de forma aleatoria, sin ningún patrón de comportamiento, como corresponde a la ausencia de correlación en el tiempo entre sus observaciones.

Ward y Shapiro (1960, 1961a, 1961b, 1962) encontraron que los espectros de potencia de las series de tiempo atmosféricas y de índices solares presentan una auto-correlación apreciable entre datos sucesivos, hay una supresión de la variancia relativa a las altas frecuencias y una elevación de la variancia a las bajas frecuencias. A este fenómeno se le denomina “ruido rojo” (Gilman, et al., 1963), en la figura 15 se muestra una gráfica del proceso de ruido rojo. Un modelo simple para el ruido rojo es el proceso autorregresivo Lag-1 (AR1, o Markov)

$$x_n = \alpha x_{n-1} + z_n , \quad (23)$$

donde α el valor de la auto-correlación lag-1, $x_0 = 0$ y z_n es tomado de ruido blanco Gaussiano. El espectro de potencia discreta de Fourier después de la normalización es:

$$P_k = \frac{1-\alpha^2}{1+\alpha^2-2\alpha\cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right)} , \quad (24)$$

donde $k=0, \dots, N/2$ es el índice de frecuencia. Así, eligiendo un apropiada auto-correlación lag-1 podemos modelar el espectro del ruido rojo. En la figura 16 se muestra el espectro del ruido rojo para algunos valores de auto correlación α .

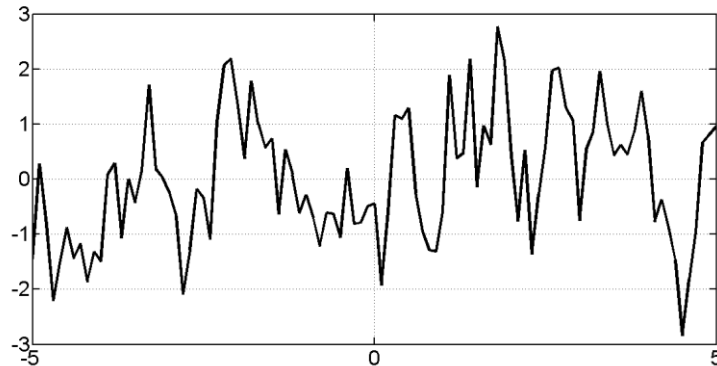


Figura 15 Proceso de ruido rojo con $\alpha = 0.7$, varianza= 1.

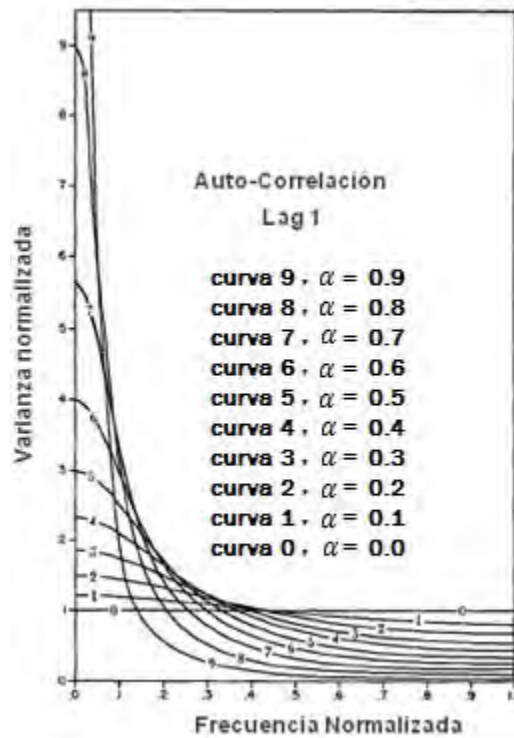


Figura 16 Espectro del ruido rojo para algunos valores de auto correlación α (Gilman, et al., 1963).

Si la serie de tiempo puede ser modelada como un proceso AR lag-1. La hipótesis nula se define para el espectro wavelet de potencia como: Se asume que la serie de tiempo tiene un espectro de potencia medio P_k , si un pico en el espectro de potencia wavelet está significativamente arriba de este espectro de fondo, entonces se puede suponer que es una característica verdadera con un porcentaje de confianza. Por definición, “el 95% nivel de confianza” implica una prueba contra cierto nivel de fondo, mientras que “95% intervalo de confianza” se refiere al rango de confianza alrededor de un nivel dado.

Si x_n es una variable aleatoria normalmente distribuida, entonces tanto la parte real como la imaginaria están normalmente distribuidas (Chatfield, 1989). El cuadrado de una variable normalmente distribuida es una distribución chi-cuadrada con un grado de libertad (degree of freedom, DOF) entonces $|\hat{x}_k|^2$ es chi-cuadrada distribuida con dos DOF denotada por X_2^2 (Jenkins and Watts 1968). Para determinar el nivel de confianza (significancia al 5%), multiplicamos el espectro de fondo (P_k) por el valor 95th percentil de X_2^2 (Gilman et al. 1963).

El intervalo de confianza está definido como la probabilidad de que la potencia wavelet real (ω_n^2) en cierto tiempo y escala este dentro de cierto intervalo de potencia estimada. El intervalo de confianza para la potencia wavelet real ω_n^2 es:

$$\frac{2}{X_2^2(\frac{\beta}{2})} |W_n(s)|^2 \leq \omega_n^2 \leq \frac{2}{X_2^2(1-\frac{\beta}{2})} |W_n(s)|^2 \quad , \quad (25)$$

donde p es la significancia deseada ($P=0.05$ para un intervalo de confianza del 95%) y $X^2_{\frac{p}{2}}(\frac{p}{2})$ representa el valor de X^2 a $\frac{p}{2}$.

5.4. Relación entre dos series de tiempo

Para determinar si existe relación entre dos series que contienen frecuencias similares se pueden realizar análisis tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia para establecer estas relaciones. En el dominio del tiempo se puede encontrar la correlación de amplitudes entre las series utilizando el coeficiente de correlación entre las series analizadas. En el dominio de frecuencia podemos calcular la transformada wavelet de coherencia entre las series de tiempo. Este análisis muestra una relación de amplitudes y fases entre las series de tiempo para cada frecuencia. El que no exista una relación de amplitudes o fases no necesariamente implica que estas series no estén relacionadas, usualmente las relaciones que existen entre las series no son directas. La coherencia de fase media nos muestra la relación que existe entre las fases instantáneas de dos series de tiempo a pesar de que una de estas series contenga un retardo de tiempo.

5.4.1. Covarianza y correlación

La covarianza y la correlación son medida de la dependencia entre variables aleatorias. Dadas dos series de tiempo (x_t y x_s), la función de covarianza, $Cov(x_t, x_s)$ y la función de correlación, $Corr(x_t, x_s)$ para $t, s = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, están definidas como:

$$Cov(x_t, x_s) = E[(x_t - \mu_t)(x_s - \mu_s)] = E(x_t x_s) - \mu_t \mu_s , \quad (26)$$

$$Corr(x_t, x_s) = \frac{Cov(x_t, x_s)}{\sqrt{Var(x_t)Var(x_s)}} = \frac{x_{t,s}}{\sqrt{x_{t,t}x_{s,s}}} , \quad (27)$$

donde μ_t es el valor esperado del proceso al tiempo t , Cuando la correlación es cercana a ± 1 indica una fuerte relación lineal mientras que valores de correlación cercanos a cero implican que no existe una relación lineal (Cryer y Chan, 2008).

5.4.2. Wavelet de coherencia

El wavelet de coherencia es usado para identificar bandas de frecuencia e intervalos de tiempo en los cuales dos series de tiempo están covariando (Liu 1994). Es necesario suavizar el espectro cruzado antes de calcular la coherencia.

El wavelet de coherencia es suavizado tanto en tiempo como en escala, donde el suavizado depende de la escala y del wavelet elegido. Dadas dos series de tiempo X y Y , con transformadas de Fourier $WX(s)$ y $WY(s)$, donde n es el índice de tiempo y s es la escala, el espectro wavelet cruzado está dado por (Torrence and Webster 1998):

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s)W_n^{Y*}(s) , \quad (28)$$

donde (*) indica el complejo conjugado. El wavelet de coherencia cuadrado está definido por el valor absoluto del espectro wavelet cruzado, normalizado por la potencia espectral de los wavelets suavizados:

$$R_n^2 = \frac{|(s^{-1}W_n^{XY}(s))|}{\langle s^{-1}|W_n^X(s)|^2 \rangle \langle s^{-1}|W_n^Y(s)|^2 \rangle}, \quad (29)$$

donde $\langle \rangle$ indicas el suavizado en tiempo y en escala. El factor s^{-1} es usado para convertir a densidad de energía. $0 \leq R_n^2 \leq 1$, el wavelet de coherencia es una representación exacta de la covarianza entre dos series (Torrence and Webster 1998).

La diferencia de fase del wavelet de coherencia está dado por:

$$\phi_n(s) = \tan^{-1} \left(\frac{\Im\{(s^{-1}W_n^{XY}(s))\}}{\Re\{(s^{-1}W_n^{XY}(s))\}} \right), \quad (30)$$

donde \Re es la parte real e \Im la parte imaginaria suavizadas del wavelet cruzado.

La coherencia de fase media (Mokhov y Smirnov 2006) es utilizada para identificar interacciones no-lineales entre dos series de tiempo que pueden ser caóticas. La transformada wavelet continua es aplicada como filtro paso banda a la serie de tiempo (Moore et al., 2007; Jevrejeva et al., 2007). Para este análisis utilizamos el wavelet de Paul ya que no es muy localizado en el espacio de la frecuencia y esto permite que señales relativamente aperiódicas puedan ser incluidas en el análisis. La transformada Paul del periodo deseado ($\lambda = 4\pi s / (2m + 1)$) (Torrence and Compo, 1998) está definida como:

$$\psi_0(\eta) = \frac{2^{m_i m_m!}}{\sqrt{\pi(2m)!}} (1 - i\eta)^{-(m+1)} \quad (31)$$

donde η es el tiempo adimensional y m es el orden ($m=4$).

Una medida de coherencia entre dos series de tiempo es la diferencia de fase entre las dos series de tiempo (X y Y) (Moore et al., 2007), ρ :

$$\rho = \frac{1}{N} \sqrt{[\sum_{n=1}^N \cos(\phi_{x,n} - \theta_{y,n})]^2 + [\sum_{n=1}^N \sin((\phi_{x,n} - \theta_{y,n}))]^2} \quad (32)$$

donde N es la longitud de la series de tiempo; ϕ_x y θ_y son las fases de las series de tiempo. Para evitar efectos de bordes debidos al filtrado wavelet ignoramos los segmentos de longitud 1.4s. Una detección confiable de acoplamiento direccional se alcanza cuando se tienen regímenes no síncronos, esto es cuando la fase media de coherencia es menor a 0.4 ($\rho > 0.4$ para señales síncronas) (Mokhov y Smirnov 2006). Pruebas de significancia para ρ se hacen utilizando el método Monte Carlo contra 1000 realizaciones de ruido rojo de fondo (Moore et al. 2007).

5.4.3. Wavelet de Coherencia Parcial

La coherencia entre dos series de tiempo puede ser condicional a una tercer serie (Sun et al., 2004), el wavelet de coherencia parcial es una técnica utilizada para encontrar el wavelet de coherencia entre dos series de tiempo $X(t)$ y $Y(t)$ después de eliminar la influencia de una tercer serie $R(t)$, y esta puede ser descrita como (Ng and Chan, 2012):

$$R_{XY/R}^2(s) = \frac{|R_{XY}(s) - R_{XR}(s)R_{RY}(s)|^2}{(1 - R_{XR}(s))^2(1 - R_{RY}(s))^2} \quad (33)$$

El wavelet de coherencia parcial es como un wavelet de coherencia con valores entre 0 y 1. Una baja coherencia parcial implica que las series Y no tiene una influencia significativa en la serie X a una frecuencia y tiempo particulares y que la serie R domina el efecto en la varianza de X , y viceversa para el caso opuesto. Si $R_{XY/R}^2(s)$ y $R_{XR/Y}^2(s)$ tienen bandas significativas implica que tanto las series Y como R tienen una influencia significativa en X . Pruebas de significancia son realizadas utilizando el método Monte Carlo contra 1000 realizaciones de ruido rojo de fondo (Moore et al. 2007; Ng and Chan, 2012).

5.4.4. Acoplamiento de frecuencia cruzada de amplitud-fase

El hecho de que dos series de tiempo no estén relacionadas directamente no significa que no tengan algo en común, por esta razón algunos autores han propuesto que algunas series de tiempo pueden interactuar con otras de manera indirecta. Rennert y Wallace (2009) propusieron que las series de tiempo geofísicas de diferentes frecuencias pueden interactuar entre ellas. Muchos esfuerzos se han hecho para identificar y medir este tipo de acoplamiento pero ningún método se ha sido suficientemente efectivo para detectar este fenómeno. En el acoplamiento de frecuencias cruzadas de amplitud-fase la amplitud de una señal de alta frecuencia es modulada por la fase de una señal de baja frecuencia (Tort et al., 2010; Canolty et al., 2006; Demiralp et al., 2007). Este tipo de estudio ha sido observado en estudios de oscilaciones del cerebro, sistemas climáticos, dispositivos electrónicos, etc. (Knyazev, 2011; Wei et al., 2007; Mokhov et al., 2011; Blasius y Stone, 2000). Hay muchos métodos que se utilizan en este tipo de análisis, pero están limitados ya que son sensitivos a variaciones en frecuencias cruzadas sobre tiempo (Cohen, 2008). Aquí presentamos un nuevo método para estudiar el acoplamiento de frecuencias cruzadas que elimina la limitación principal de los métodos anteriores ya que no es sensible a las variaciones de frecuencia en el tiempo. El nuevo método se basa principalmente en la utilización de la transformada wavelet, explicada anteriormente, y la desmodulación de amplitud coherente.

5.4.4.1. Desmodulación Coherente

La desmodulación de amplitud (AM) es el proceso inverso a la modulación AM. Consiste en recuperar la señal de información contenida en la envolvente de la señal portadora. Antes de estudiar la desmodulación vamos a hacer una breve revisión de la modulación AM.

La modulación AM es el proceso de cambiar la amplitud de una señal portadora de frecuencia relativamente alta en proporción con el valor instantáneo de la señal modulante (información). En la figura 17 se muestra la gráfica de la señal de información, la señal portadora y la señal modulada.

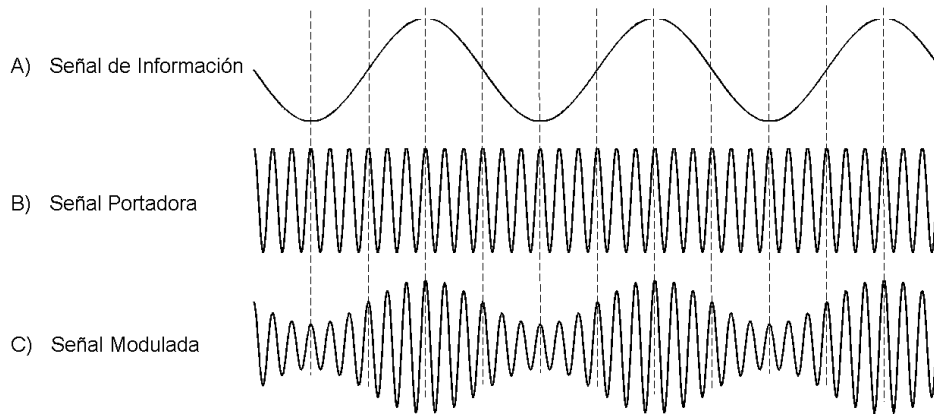


Figura 17 Grafica de la modulación AM. A) Señal de información, B) Señal portadora y C) Señal modulada.

La señal modulada está dada por:

$$s(t) = A_c[1 + m(t)]\cos(2\pi f_c t) \quad , \quad (34)$$

donde $m(t)$ es la señal de información, A_c es la amplitud de la señal portadora y f_c es la frecuencia de la señal portadora.

El índice de modulación está definido por M :

$$M = \frac{Am}{Ac} \quad , \quad (35)$$

donde Am es la amplitud de la señal de información, A_c es la amplitud de la señal portadora. El porcentaje de modulación esta dado por (Chattopadhyay, 2006):

$$\%M = \frac{100(A_{smax} - A_{smin})}{A_{smax} + A_{smin}} \quad , \quad (36)$$

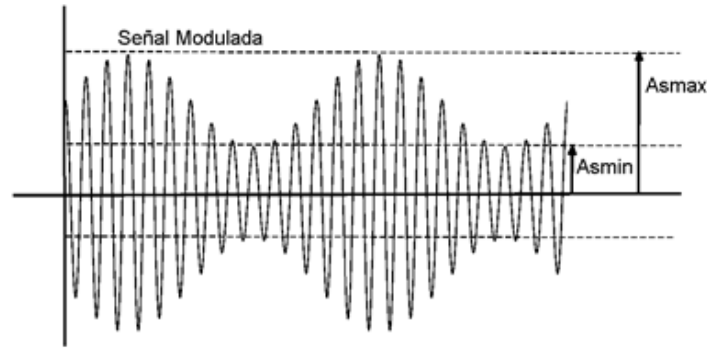


Figura 18 Parámetros de la señal de AM.

donde A_{min} y A_{max} , son las amplitudes máximas y mínimas de la señal modulada, calculadas como se muestra en la figura 18.

La desmodulación de una señal AM puede realizarse aplicando detección de envolvente (detección no coherente) o la desmodulación coherente. La detección de envolvente puede realizarse utilizando un rectificador y un filtro paso bajas. Es la forma más sencilla de desmodulación pero solamente puede ser aplicada cuando el índice de modulación $M \leq 1$. Este tipo de desmodulación es muy sensible a distorsiones de amplitud. La desmodulación coherente se puede realizar utilizando un lazo de amarre de fase (PLL) como sincronizador de portadora. La señal AM es multiplicada por una señal senoidal de la misma frecuencia y fase de la portadora. La portadora es recuperada por el PLL. El detector coherente no es sensible a distorsiones en la envolvente de la señal.

La desmodulación coherente es utilizada para la desmodulación de amplitud cuando se tienen condiciones de señal/ruido pobres o cuando la señal modulada presenta sobre modulación ($M \geq 1$). En estas circunstancias el PLL (Phase Locked Loop - lazo de amarre de fase) ofrece considerables ventajas en desempeño sobre la detección de envolvente (Kenington, 1990) (fig. 19).

$X(t)$ es una señal modulada con una frecuencia y fase representadas por f_x y ϕ_x . El PLL genera una señal $Y(t)$ con una frecuencia y fase representadas por f_y y ϕ_y . La tarea del PLL es modificar ϕ_y hasta que $f_y = f_x$ and $\phi_x = \phi_y$. Cuando estas condiciones se cumplen, la señal generada está amarrada en fase con la señal externa. El PLL ha extraído la señal portadora.

Entonces la desmodulación se basa en un simple multiplicador y en un filtro paso bajas; la señal modulada es multiplicada por la señal generada $Y(t)$ y pasada por un filtro paso bajas (fig. 18). La señal desmodulada muestra si existe una modulación de amplitud.

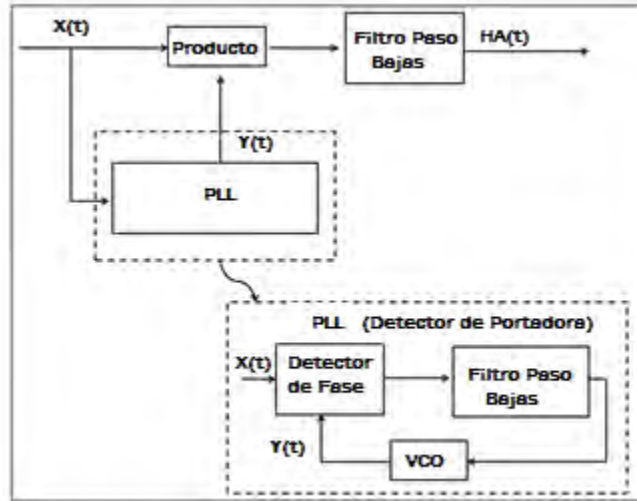


Figura 19 Desmodulador coherente utilizando PLL como sincronizador de portadora.

5.4.4.2. Índice de acoplamiento de frecuencias cruzadas de Amplitud-Fase

El índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase (CFCI) es una medida del acoplamiento de amplitud-fase entre dos señales: la señal moduladora (L) y la señal de amplitud modulada (H).

El CFCI se calcula de la gráfica de distribución de amplitud-fase (Tort et al., 2010), el cual se obtiene con el siguiente procedimiento:

- I. La señal de interés es detectada utilizando la transformada wavelet (WT). La WT muestra las principales periodicidades de la serie de tiempo y muestra si alguna modulación podría existir en alguna de las componentes. La señal moduladora (L) la señal de amplitud modulada (H) son extraídas de la serie de tiempo usando filtraje wavelet. La fase de la señal H se obtiene usando WT.
- II. La señal modulada H se desmodula usando el método de demodulación coherente (HA , señal desmodulada).
- III. La fase de la señal H es discretizada y la amplitud media de HA sobre cada valor de fase es calculada y normalizada. La razón de modulación (RM) se infiere de la gráfica de amplitud-fase (Chattopadhyay, 2006) como $MR = (h_{max} - h_{min}) / (h_{max} + h_{min})$, donde h_{max} y h_{min} son los valores de amplitud máximos y mínimos, respectivamente, obtenidos de la gráfica de amplitud-fase. El CFCI es calculada como $CFCI = MR(HA_{max} - HA_{min})$, HA_{max} y HA_{min} son las amplitudes máximas y mínimas de la señal desmodulada.

Nosotros dividimos el acoplamiento de frecuencia cruzada en cuatro clases de acoplamiento basado en CFCI (Leal-Silva y Velasco, 2012), Tabla 2.

Tabla 2 Tipos de acoplamiento de frecuencias cruzadas basadas en la medición de CFCI.

Tipos de Acoplamiento	CFCI
Débilmente modulada	0.05 – 0.2
Moderadamente modulada	0.2 – 0.35
Fuertemente modulada	0.35 – 0.5
Sobre-modulada	> 0.5

Capítulo 6. Metodología Propuesta

6.1. Introducción

En este capítulo describimos la metodología propuesta para el análisis de series de tiempo geofísicas. La metodología propuesta utiliza análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia. El primer paso para el análisis de series de tiempo es adecuar la serie de tiempo para su análisis, esto es, verificar que la serie de tiempo no tenga datos faltantes y que los datos estén normalmente distribuidos. En caso de que existan datos faltantes será necesario utilizar alguna metodología para obtener los datos faltantes, esto no es discutido en este trabajo. En caso de que los datos no estén normalmente distribuidos es necesario aplicar alguna transformación para adecuar los datos. También se realizan pruebas para establecer si las series de tiempo son estacionarias o no, de esto depende el tipo de análisis a realizar. En este trabajo se desean estudiar series de tiempo geofísicas, es decir, series de tiempo no estacionarias, por lo que el método desarrollado es una herramienta útil cuando se desean estudiar este tipo de series de tiempo.

Una vez que las series de tiempo no estacionarias son adecuados para el análisis se aplica la transformada wavelet de Morlet para caracterizar las series de tiempo (encontrar sus periodicidades principales). De aquí se pueden observar similitudes directas entre dos series y al aplicar transformada wavelet de coherencia se puede verificar si las similitudes observadas representan una relación entre las series de tiempo o no.

Algunas series de tiempo presentan relación entre diferentes frecuencias, periodicidades de alta frecuencia se encuentran moduladas por señales de baja frecuencia, en este trabajo aplicamos el análisis de acoplamiento de frecuencias cruzadas para estudiar este tipo de relación.

6.2. Ilustración de la metodología utilizando series de tiempo sintéticas

Para ilustrar el método usamos dos series de tiempo sintéticas X y Y . Las señales fueron modeladas como: $X = (1 + M \cos(2\pi f_L t)) \cos(2\pi f_H t) + \cos(2\pi f_L t) + \text{ruido rojo}$ y $Y = \cos(2\pi f_L t) + \text{ruido rojo}$, donde M es el índice de modulación AM ($M=1$), $f_L = 1/70$ años and $f_H = 1/11$ años son las frecuencias, y el ruido rojo tiene un coeficiente auto-regresivo de primer orden de 0.7, media=0 y varianza=0.7.

- El primer paso en el análisis de series de tiempo, consiste en graficar la serie. Esto nos permite detectar las componentes esenciales de la serie. Las series de tiempo se grafican se pueden observar en la (figs. 20a y 20b).

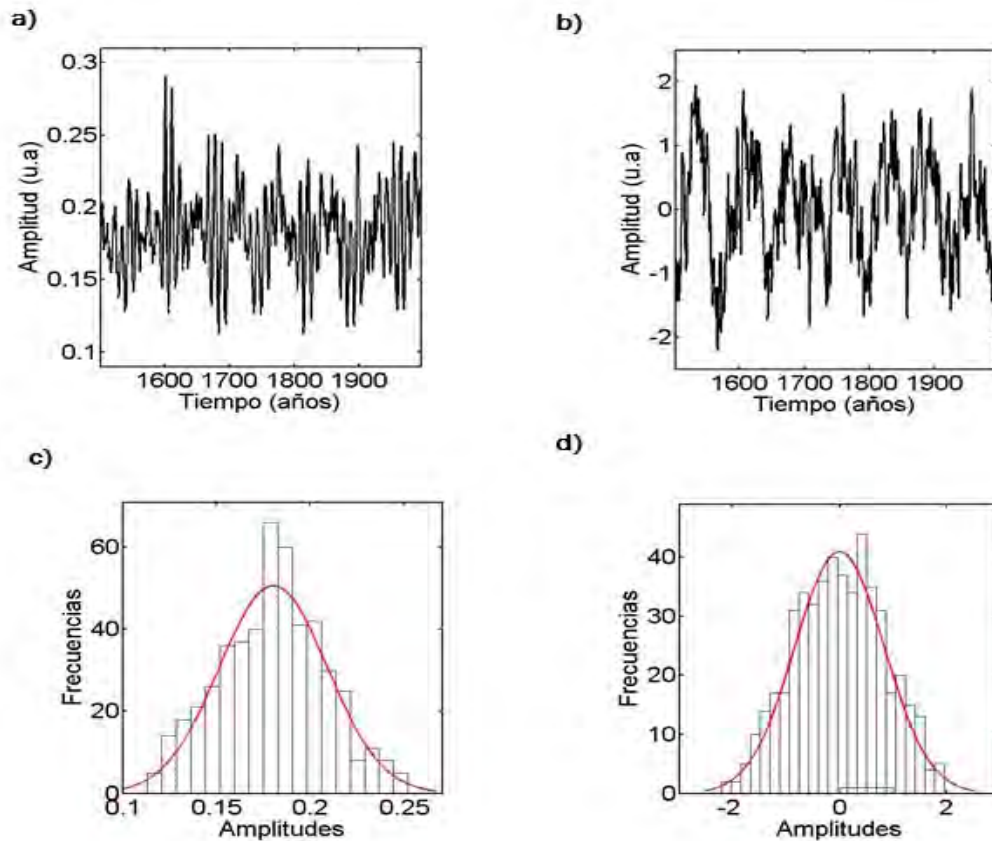


Figura 20 Representación gráfica de las series de tiempo y sus histogramas.

a) Series sintéticas X , b) Series sintéticas Y , c) Histograma de las series sintéticas X y d) Histograma de las series sintéticas Y .

La estructura probabilística de un proceso estocástico es determinada por el conjunto de distribuciones de las series de tiempo. En las figuras 20c y 20d se muestran los histogramas de las series de tiempo, la gráfica de color rojo muestra una distribución normal y las barras muestran la distribución de cada una de las series de tiempo. Después de analizar la distribución de los datos calculamos las medidas que describen estas series de tiempo. Estas medidas se muestran en la tabla 3. Las series presentan una distribución cercana a la normal, son asimétricas, la serie X tiene una distribución asimétrica a la derecha y la serie Y tiene una distribución asimétrica a la izquierda.

La serie X no está normalmente distribuida por lo que es necesario aplicar una transformación a la serie de tiempo. Se aplicó una transformación de potencia a la serie de tiempo X y aplicamos la prueba de normalidad para verificar la normalidad de los datos. En la figura 21 a y 21 b se muestra la serie X después de la transformación y su histograma.

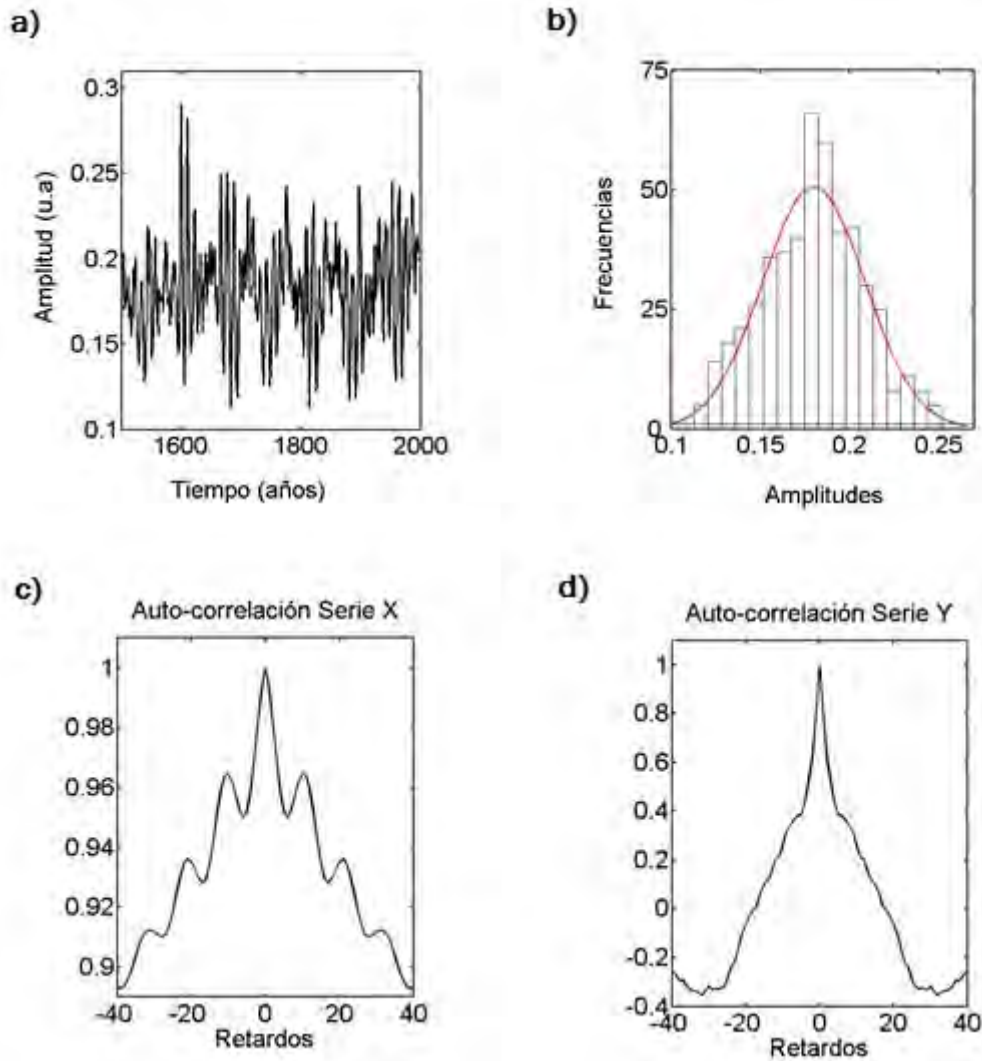


Figura 21 Representación gráfica de la serie de tiempo X transformada y las auto-correlaciones de las series X y Y .

a) Serie de tiempo después de la transformación de potencia y b) su histograma, c) Auto-correlación serie X y d) Auto-correlación serie Y .

La estacionariedad se puede observar obteniendo la función de auto-correlación de las series de tiempo (fig. 21 c y d). La función de auto-correlación de las series de tiempo no decae ni se extingue rápidamente lo cual es un indicador de no estacionariedad. Los resultados de la observación de la función de auto-correlación nos dan una idea de estacionariedad pero se requiere de pruebas para afirmar si una serie de tiempo es estacionaria o no. En este trabajo se aplicó el método más tradicional para estudiar la presencia de raíces unitarias en una serie temporal parte del contraste ADF (Prueba aumentada Dickey-Fuller).

La hipótesis nula identifica si la serie de tiempo tiene una raíz unitaria.

Planteamiento de hipótesis:

$H_0 = 0$ Serie no estacionaria

$H_1 \neq 0$ Serie estacionaria

Las series de tiempo analizadas no pasaron la prueba de estacionariedad.

Tabla 3 Medidas que caracterizan las series de tiempo X y Y.

Medidas	Serie X	Serie Y
Media	-0.0053	-0.0049
Mediana	-0.1815	-0.0098
Moda	-1.7981	0.2405
Valor mínimo	3.4839	1.9205
Valor máximo	-2.5219	-1.6053
Desviación estándar	1.0527	0.6318
Varianza	1.1082	0.3992
Coefficiente de Asimetría de Pearson	1.7029	-0.3884
Prueba de normalidad	No Pasa	Pasa
Requiere transformación de normalidad	Si	No

Wavelet de Morlet de las series de tiempo

La figura 22 muestra la transformada wavelet a la serie de tiempo X (fig. 22a) la cual fue aplicada para encontrar las principales periodicidades. El espectro global (fig. 22c) muestra dos periodicidades principales a 11 y 70 años. La periodicidad de 70 años muestra potencia constante durante todo el periodo de tiempo y la periodicidad de 11 años muestra potencia intermitente (fig. 22b), lo cual sugiere una modulación. También aplicamos la transformada wavelet a la serie Y (fig. 23a). El espectro global (fig. 23c) muestra una periodicidad principal a 70 años. La periodicidad de 70 años muestra potencia constante durante todo el periodo de tiempo (fig. 23b).

Wavelet de Coherencia entre las series de tiempo

Los espectros wavelets muestran características similares entre las series de tiempo pero es necesario aplicar la transformada wavelet de coherencia para verificar si existe una relación directa entre estas series de tiempo.

En la figura 24 se muestran los resultados obtenidos de la transformada wavelet de coherencia. En el panel a) se muestran las series de tiempo, el panel b) presenta la transformada wavelet de coherencia, el cual muestra que no existe una relación directa entre las amplitudes de las señales, el panel c) presenta el espectro global de potencia, en el cual no podemos observar ninguna periodicidad importante y el panel d) muestra la coherencia de fase de las series de tiempo, aquí podemos

observar que a la periodicidad de 70 años existe una coherencia de fase entre ambas señales.

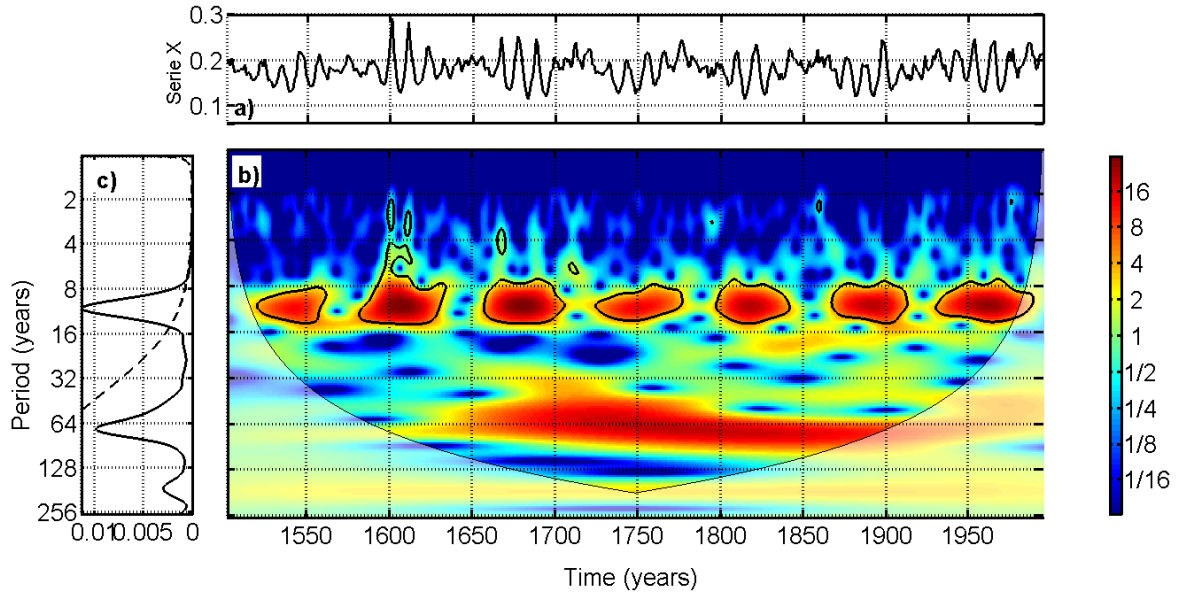


Figura 22 Análisis de la serie de tiempo *X*

a) Serie de tiempo *X*, b) transformada wavelet y c) espectro global de potencia.

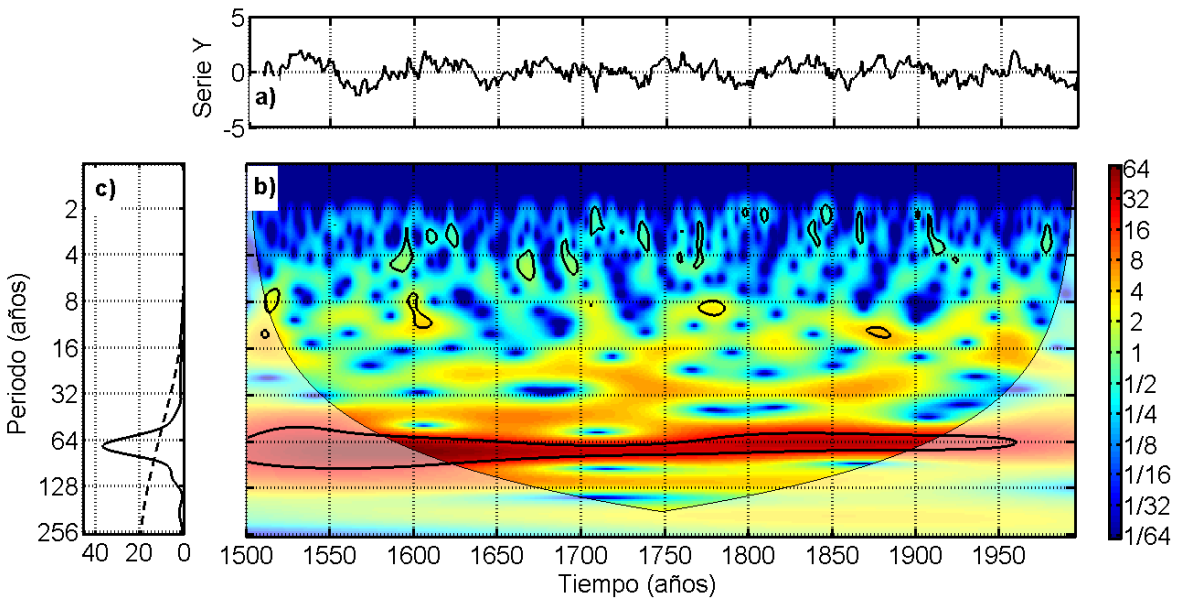


Figura 23 Análisis de la serie de tiempo *Y*

a) Serie de tiempo *Y*, b) transformada wavelet y c) espectro global de potencia.

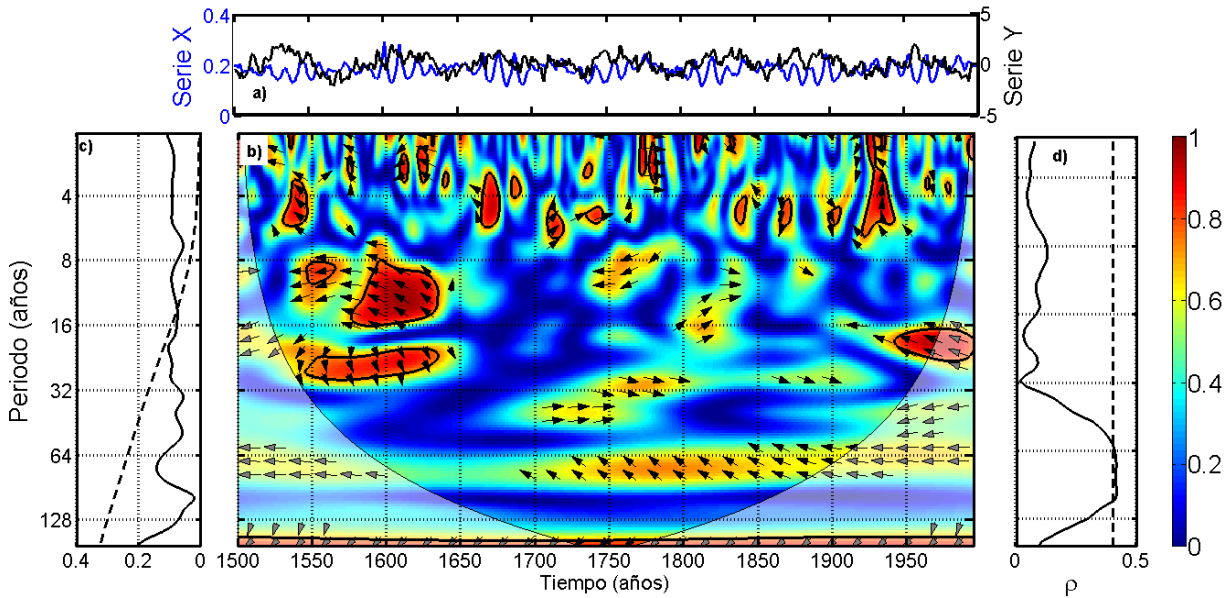


Figura 24 Análisis de coherencia entre las series de tiempo X y Y . a) Series de tiempo X y Y , b) transformada wavelet de coherencia y c) espectro global de potencia.

De los resultados obtenidos de la transformada wavelet de coherencia solo podemos afirmar que las señales están relacionadas en forma directa a la periodicidad de 70 años ya que ambas señales presentan sincronización a esta periodicidad

Wavelet de Coherencia Parcial

El wavelet de coherencia parcial es una herramienta útil para encontrar el wavelet de coherencia entre dos series de tiempo $X(t)$ y $Y(t)$ después de eliminar la influencia de una tercer serie $R(t)$. Para ilustrar este análisis utilizaremos la serie X , la serie Y y una serie R (en este caso la misma serie X).

Calculamos el wavelet de coherencia parcial entre las series X y Y quitando el efecto de la serie R . En este caso, obtenemos una baja (0) coherencia parcial, lo cual implica que las series Y no tiene una influencia significativa en la serie X y que la serie R domina el efecto en la varianza de X .

También calculamos el wavelet de coherencia parcial entre las series X y R quitando el efecto de la serie Y . En este caso, obtenemos una alta (1) coherencia parcial, lo cual implica que las series R tiene una influencia significativa en la serie X y que la serie Y no tiene efecto en la varianza de X .

Acoplamiento de Frecuencias Cruzadas de Amplitud-Fase

Los resultados anteriores muestran que la serie X presenta una periodicidad de 11 años que podría estar modulada. Aquí analizaremos si esta periodicidad de 11 años en la serie X esta modulada por la periodicidad de 70 años de la serie Y .

Para realizar el análisis extraemos la periodicidad de 11 años (señal H) de la serie de tiempo X (figura 25a) como nuestra señal de alta frecuencia y la periodicidad de 70 años (señal L) de la serie de tiempo Y (Figura 25b) como nuestra señal de baja frecuencia. Entonces la señal H es desmodulada (HA) usando un lazo de amarre de fase (PLL) como detector de portadora. También se calcula la fase de la señal L (Figura 25c). A simple vista podemos ver que la señal desmodulada (HA) tiene características en común con la señal L pero no estamos seguros por eso debemos de aplicar el método de acoplamiento de frecuencias cruzadas para cuantificar la relación entre las señales. La grafica de amplitud-fase (Figura 25d) es calculada y a partir de esta se obtiene el CFCI (CFCI=0.46), los resultados muestran que existe un fuerte acoplamiento entre las señales.

6.3. Validación del método

Hay muchos métodos que se utilizan el análisis de frecuencias cruzadas, pero están limitados ya que son sensitivos a variaciones en frecuencias cruzadas sobre tiempo (Cohen, 2008). Otra de las limitaciones que tienen los métodos actuales es que utilizan desmodulación de amplitud no coherente. Esta es la forma más sencilla de desmodulación pero solamente puede ser aplicada cuando el índice de modulación $M \leq 1$ y en señales con muy bajo ruido.

En la figura 26 mostramos los resultados obtenidos utilizando ambos métodos de desmodulación para el análisis de casos similares de acoplamiento de frecuencia cruzadas de amplitud-fase. Para los mismos casos nosotros analizamos el desempeño del método con (fig. 26b) y sin presencia de ruido (fig. 26a). En ambos casos para $M < 1$ el método es capaz de detectar y medir el CFCI. El método de detección de envolvente es incapaz de dar una medida confiable de CFCI cuando el índice de modulación es mayor a 1 ($M > 1$).

También analizamos el efecto del retardo de fase entre la señal moduladora y la señal desmodulada (fig. 27). La figura 27 muestra la comparación entre 4 diferentes retardos de fase entre las señales. Los resultados muestran que la medida del CFCI no depende del retardo de fase entre las señales como sucede en las medidas de correlación.

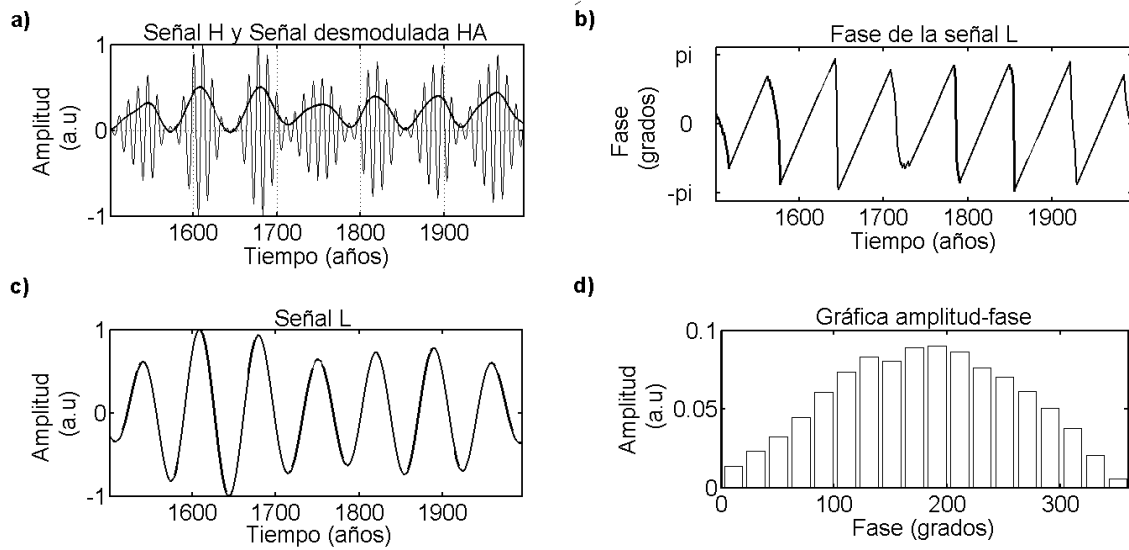


Figura 25 Ilustración del acoplamiento de frecuencias cruzadas amplitud-fase. a) Señal modulada y desmodulada, b) componente de baja frecuencia, c) fase de la señal de baja frecuencia y d) grafica amplitud-fase.

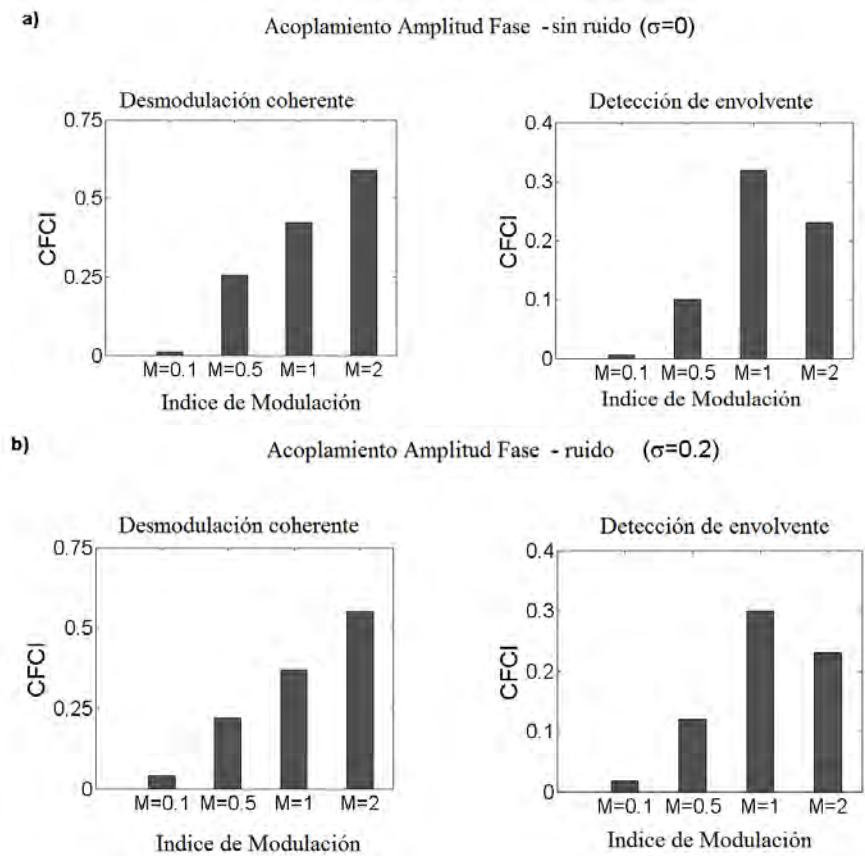


Figura 26 Análisis de cuatro casos diferentes de fuerza de acoplamiento para cada método de modulación.

a) Series de tiempo sin ruido. b) Series de tiempo con ruido, $\sigma=0.2$

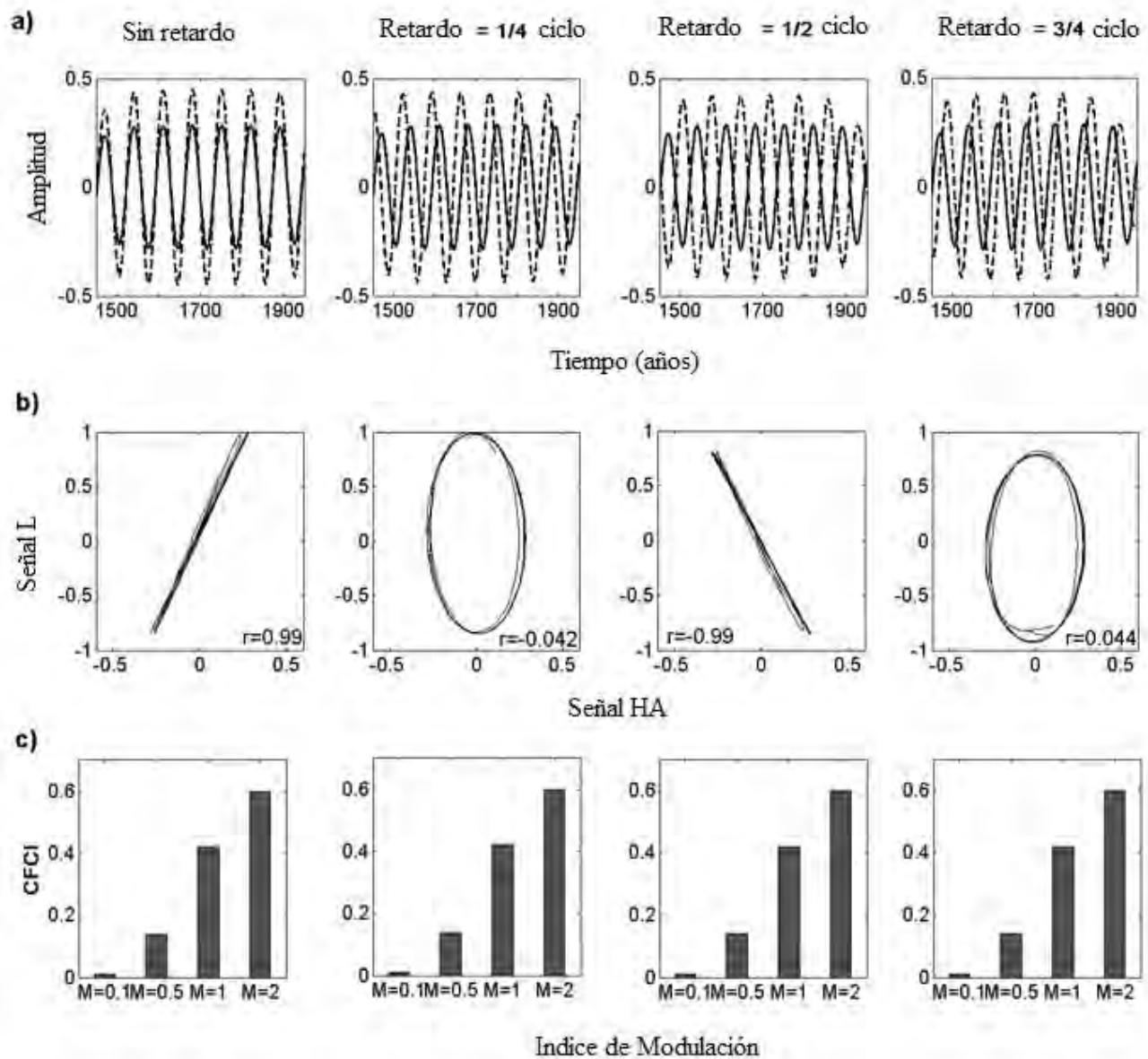


Figura 27 a) Señal moduladora (L, línea sólida) y señal desmodulada (HA, línea punteada). b) graficas de distribución entre las señales L y HA, las cuales muestran que el coeficiente de correlación, r , depende del retardo entre las señales. c) muestra los valores de CFCI para diferentes índices de modulación (0.1, 0.5, 1, y 2).

Capítulo 7. Resultados

7.1. Aplicación de la metodología propuesta

La metodología propuesta se utilizará para estudiar las siguientes series de tiempo climáticas, series de tiempo de actividad solar y series de tiempo del baricentro. Las series de tiempo utilizadas en este trabajo se describirán a continuación y los datos se presentan en el Apéndice A.

7.2. Datos

- a) **Series de tiempo climáticas:** Severidad de Hielo en invierno, temperatura y precipitación en la zona del Báltico desde 1501-1995. Estas series de tiempo fueron obtenidas del Banco de Datos climático Histórico "HISKLID" (Koslowski et al. 1995 and 1999) [www.hisklide.de]. La severidad de hielo en invierno (IWSIB) desde 1501-1995 en la región oeste del Mar Báltico (fig. 28a). La serie de tiempo del IWSIB es una reconstrucción de 7 tipos de severidad de invierno basados en el volumen de hielo de área acumulada en la costa Alemana de la región del Báltico durante 1501-1995 (Koslowski et al. 1995 and 1999). La temperatura (fig. 28b) y la precipitación (fig. 28c) (Glaser, 1997, 2001; Glaser et al., 1999). Las series de tiempo describen los promedios climáticos de Alemania. La temperatura y la precipitación son representados con índices que pueden tomar 7 valores (-3, -2, -1, 0, -1, -2, -3), donde el 0 se refiere al promedio entre 1901 y 1960. El índice +3 se refiere al extremo más caliente o húmedo y el índice -3 se refiere al índice más frío o seco. Los índices están definidos como desviaciones estándares promedio desde 1901-1960 (Glaser et al., 1999), los valores de temperatura y precipitaciones reales fueron derivadas de estos índices. Pfister (1988) señala que los márgenes de error para los valores mensuales esta entre un 6% y un 18%. Las series de tiempo son de diferentes longitudes por lo que nosotros utilizaremos un periodo común entre 1501 y 1985.
- b) **Series de tiempo de actividad solar:** utilizamos la serie de tiempo de reconstrucción de Be-10, las series del Grupo de Manchas Solares, la serie de la Irradiancia Solar Total y la serie de Rayos Cósmicos.

La serie de tiempo del Berilio 10 (1389-1994) se obtuvo de medidas en un sondeo en Groenlandia (Beer et al., 1994) (fig. 29a). También utilizamos una serie extendida del Grupo de Manchas solares (GMS), de la Irradiancia Solar Total (TSI), del número de manchas solares (SNN) y de los rayos cósmicos (RC) de 1500 y 1995. Para la extensión de la serie se utilizó la media de la TSI anual obtenida de datos diarios de Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos (PMOD) (Fröhlich 2006) entre 1979 y 2012 [<http://www.pmodwrc.ch>]. También se utilizó el grupo de número de manchas solares de 1610 a 1995 (Hoyt y Schatten 1998) y los datos del número histórico de manchas solares (SSN) de Schöve (1983). La extensión de las series de tiempo fue hecha aplicando el algoritmo descrito por Velasco, et al. (2013). Un método no lineal y no paramétrico fue utilizado en la reconstrucción de los datos y

el cual se basa en un modelo de regresión de máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados (SVM) con kernels de funciones de base radial (RBF). La SVM está definida como (Vapnik 1998; Suykens et al. 2005):

$$\hat{I} = \sum_k \Omega_k I_k + b \quad , \quad (37)$$

donde \hat{I} es la salida estimada, I_k es la entrada de datos a un tiempo k , Ω_k es el peso y b es el término “bias”. El SVM fue calibrado con los datos de PMOD, con la finalidad de encontrar los pesos (Ω_k) y el bias (b), se utilizaron los datos de GSN de 1979 a 2012. La SVM fue entrenada con el 80% de los datos de la serie PMOD entre 1979 y 2012 tomados aleatoriamente, y fue probada con los datos restantes (20%). Las series reconstruidas presentan características espectrales que coinciden con lo esperado, muestran periodicidades a 11, 120 y 240 años. Los datos estimados presentan una buen coeficiente de correlación con los datos originales de 0.86 (nivel de significancia al 14%). Las series de tiempo del Grupo de Manchas Solares (GMS), la Irradiancia Solar Total (TSI) y los Rayos C3smicos (RC) se muestran en las figuras 29b, 29c y 29d.

- c) **Series de tiempo de movimiento del sol alrededor del sistema solar (baricentro):** La relaci3n entre el Sol y el baricentro del sistema Solar (longitud y distancia en radios solares, desde 3000 AC a 3000 DC) [<http://landscheidt.wordpress.com/6000-year-ephemeris/>] (figs. 30b y 30c).

Iniciaremos el an3lisis de las series de tiempo realizando una inspecci3n de los datos. Primeramente las graficaremos, obtendremos sus histogramas y realizaremos las pruebas necesarias para detectar si est3n normalmente distribuidas, en caso de no cumplir con este requisito aplicaremos la transformaci3n adecuada. Tambi3n verificaremos si se trata de se3ales estacionarios o no.

La estructura probabilística de un proceso estoc3stico es determinada por el conjunto de distribuciones de las series de tiempo. En la figura 31 se muestran los histogramas de las series de tiempo, la gr3fica de color rojo muestra una distribuci3n normal y las barras muestran la distribuci3n de cada una de las series de tiempo. Despu3s de analizar la distribuci3n de los datos calculamos las medidas que describen estas series de tiempo. Estas medidas se muestran en la tabla 4. Las series presentan una distribuci3n diferente a la normal y son asim3tricas.

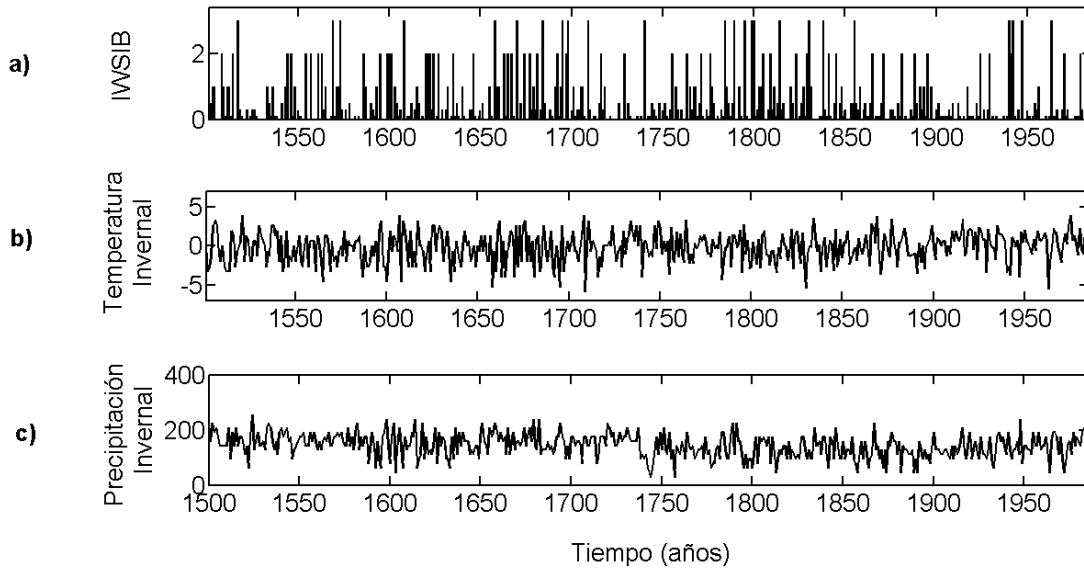


Figura 28 Análisis de las series de tiempo climáticas.

a) Serie de tiempo de la severidad de hielo en invierno, b) serie de tiempo de la temperatura invernal y c) serie de tiempo de la precipitación invernal en la zona del Báltico.

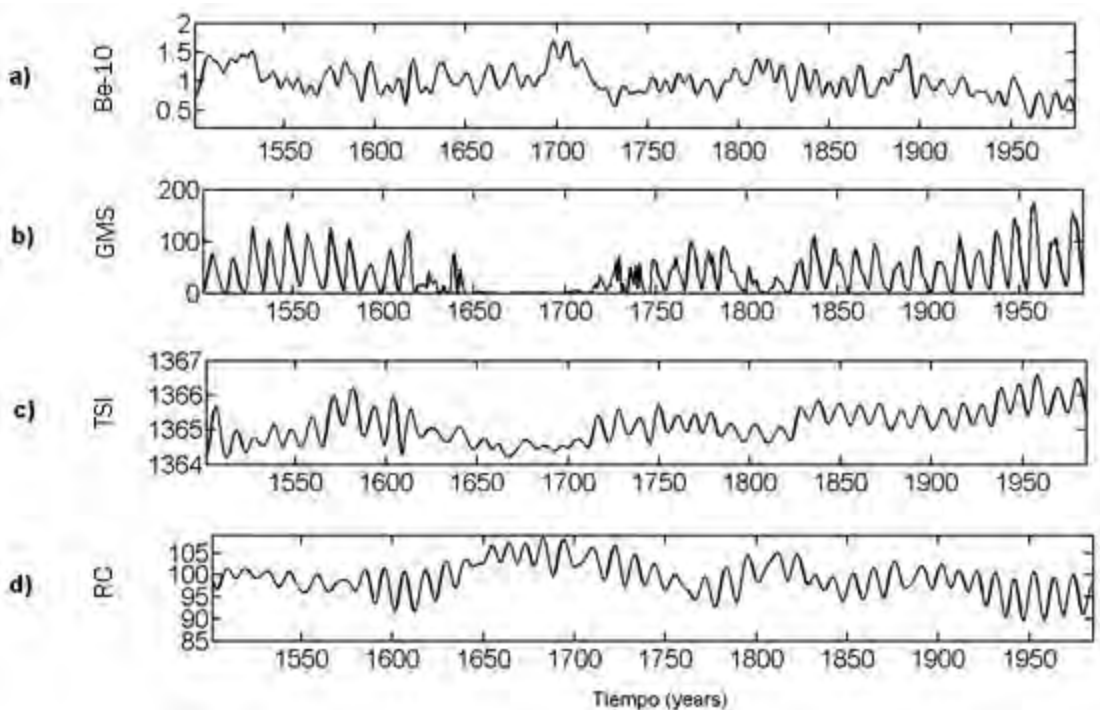


Figura 29 a) Serie de tiempo del Berilio 10, b) serie de tiempo del Grupo de Manchas Solares (GMS), c) serie de tiempo de la Irradiancia Solar Total (TSI), d) serie de tiempo de los Rayos Cósmicos (RC).

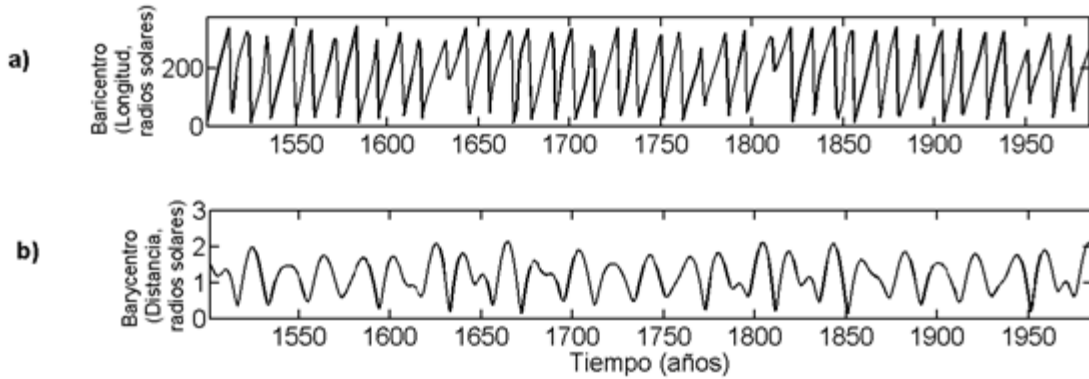


Figura 30 a) Serie de tiempo del baricentro (longitud), b) serie de tiempo del baricentro (radio).

7.3. Resultados del análisis en el dominio del tiempo

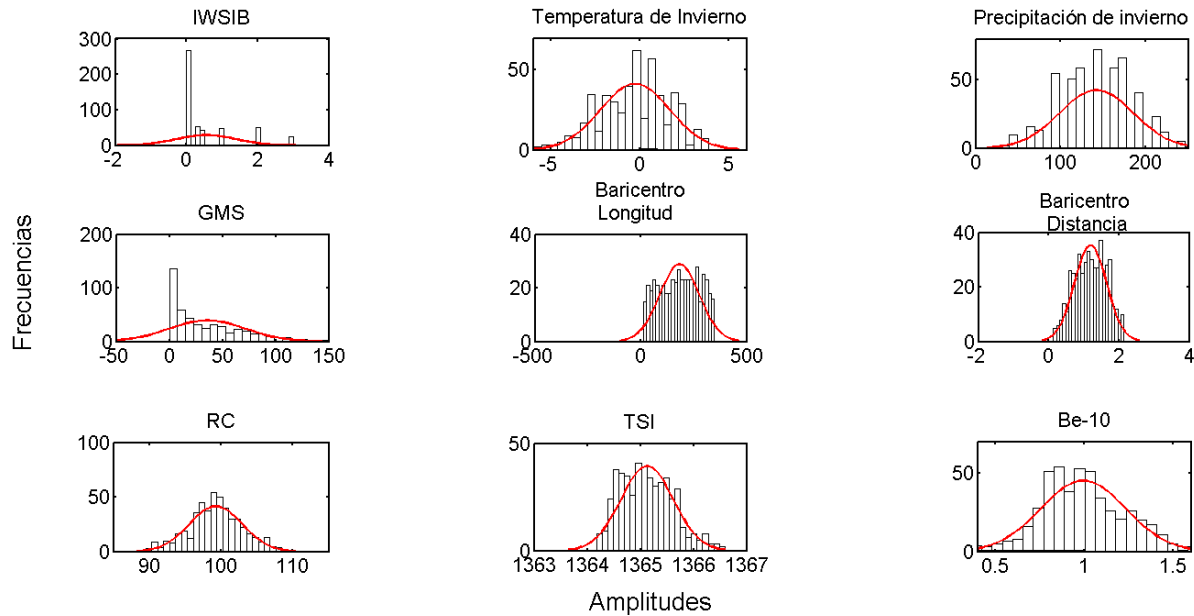


Figura 31 Histogramas de las series de tiempo.

Los resultados del coeficiente de Pearson muestran que la serie del IWSIB, la de Be-10, la de GMS, la de los RC y las del Baricentro tienen una distribución asimétrica a la derecha. La serie de tiempo de la temperatura de invierno, la precipitación de invierno la de la Irradiancia solar total tiene una distribución asimétrica a la izquierda.

Los resultados de la auto-correlación de cada una de las series de tiempo (no mostrados aquí) y la prueba Dickey-Fuller aumentada realizada a cada serie de tiempo indican que las series son no estacionarias.

Ninguna de las series utilizadas esta normalmente distribuida, por esta razón aplicamos transformaciones a cada una de las series de tiempo. Las series transformadas y sus respectivos histogramas se muestran en la figura 32.

7.4. Resultados del análisis en el dominio de la frecuencia

El análisis en el dominio de la frecuencia se realiza utilizando la transformada wavelet de Morlet. Para estudiar la relación entre frecuencias similares entre las series de tiempo se aplica la transformada wavelet de coherencia. Y para estudiar la relación que puede existir entre bandas de diferentes frecuencias utilizamos el acoplamiento de frecuencias cruzadas.

Tabla 4 Medidas que caracterizan las series de tiempo estudiadas.

Medidas	IWSIB	Temp. Inv.	Prec. Inv.	Be-10	GMS	TSI	RC	Bar. Long.	Bar. Dist.
Media	0.55	-0.267	142.00	0.99	35.67	1365.1	99.26	182.6	1.189
Mediana	0.1	-0.050	143.00	0.97	24.00	1365.1	99.26	184.59	1.208
Valor mínimo	0	-5.92	29.8	0.36	0	1364.2	89.53	12.4	0.134
Valor máximo	3	3.87	256.1	1.69	175.1	1366.6	108.46	347.405	2.139
Desviación estándar	0.83	1.948	42.9	0.23	35.83	0.4923	3.677	93.54	0.458
Varianza	0.68	3.7959	1842.4	0.05	1283.8	0.2424	13.52	8750	0.210
Coefficiente de Asimetría de Pearson	0.66	-0.112	-0.026	0.7278	0.9924	-0.811	0.540	1.8164	1.336
Prueba de normalidad	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa	No pasa
Requiere transformación de normalidad	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si

7.4.1. Wavelet de Morlet

En esta sección se presenta el análisis Wavelet realizado para las series de tiempo temporales de IWSIB, Temperatura de Invierno, Precipitación de Invierno, Berilio 10, Grupo de Manchas Solares, Irradiancia Solar Total, Rayos Cósmicos, Baricentro (Longitud) y Baricentro (Distancia). En el panel superior de cada figura (a) se muestra la serie de tiempo. En el panel central (b) se muestra el espectro de potencias de wavelet, donde la curva en forma de U representa el cono de influencia y la información contenida dentro de este tiene una significancia mayor al 95%. En el panel del lado izquierdo (c) se presenta el espectro global wavelet de cada serie de tiempo, la línea punteada corresponde al ruido rojo que muestra el nivel de confiabilidad de los resultados (los resultados arriba de este nivel presentan una confiabilidad arriba del 95%).

La transformada wavelet del WSIB se muestra en la figura 33 A. La serie de tiempo se muestra en el panel a, la transformada wavelet muestra periodicidades de 3, 7.5, 12.7, 29, 50, 96 y 167 años, panel b. Las periodicidades de 3, 7.5 y 12.7 son las más importantes y están arriba del 95% de confiabilidad (panel c).

En la figura 33 B se muestra la transformada wavelet de la Temperatura de Invierno. La serie de tiempo se muestra en el panel a, la transformada wavelet, panel b, muestra periodicidades de 2.5, 5, 8, 12.3, 62, 121 y 242 años. Las periodicidades de 2.5, 5, 8 y 12.3 son las más importantes y están arriba del 95% de confiabilidad (panel c).

La transformada wavelet de la Precipitación de Invierno se presenta la figura 33 C. La serie de tiempo se muestra en el panel a, la transformada wavelet muestra periodicidades de 5.05, 8.2, 14.7, 18.5, 36, 62 y 148 años (panel b). El wavelet global muestra que las periodicidades de 5.05, 8.2, 14.7 y 18.5 son las más importantes (c) y están cercanas al 95% de confiabilidad.

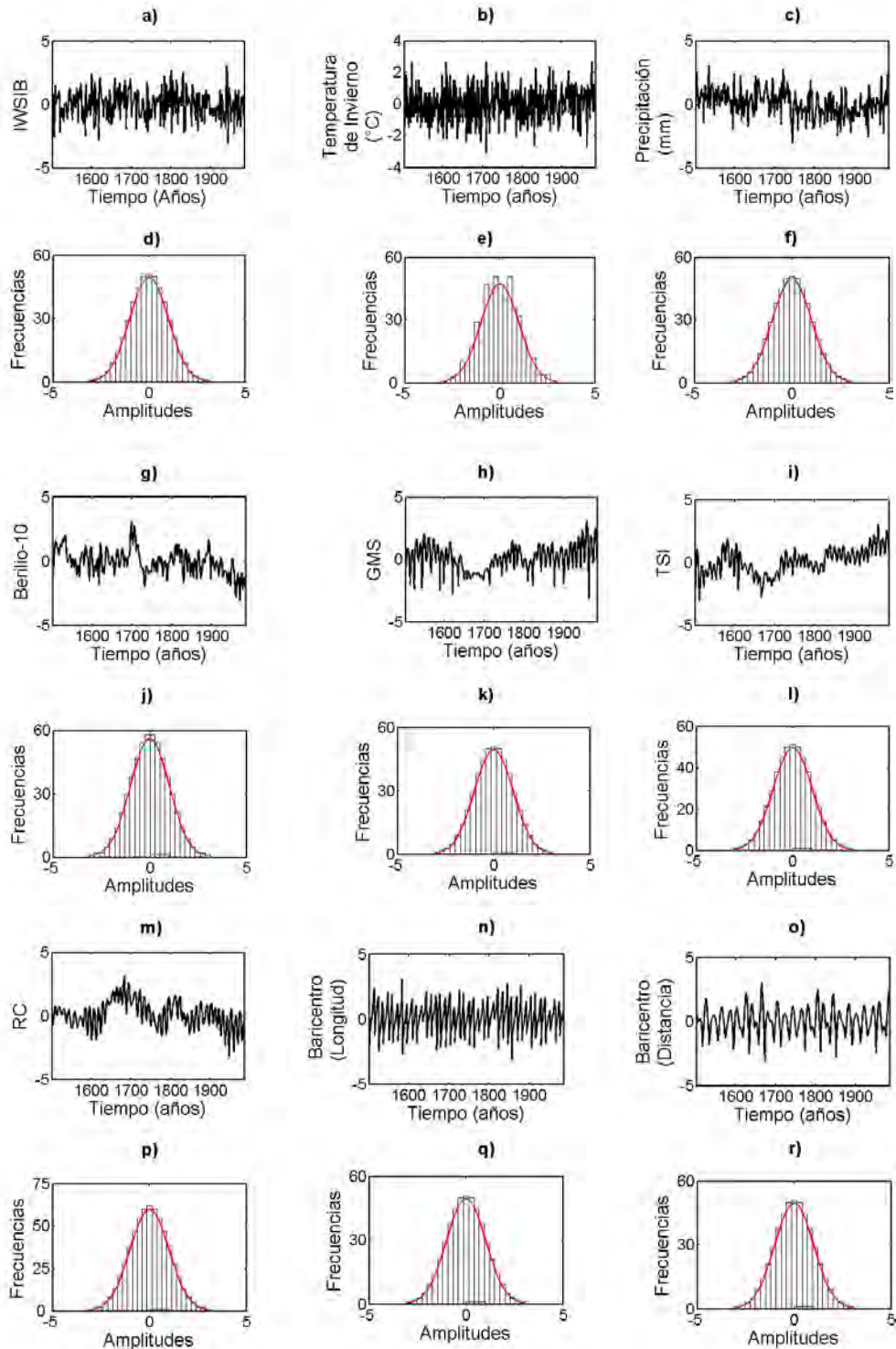


Figura 32 Series de tiempo transformadas y sus histogramas.

a) y d) IWSIB b) y e) Temperatura de invierno. c) y f) Precipitación de invierno. g) y j) Berilio-10. h) y k) Grupo de Manchas Solares. i) y l) Irradiancia Solar Total. m) y p) Rayos CósMICOS. n) y q) Baricentro (Longitud). o) y r) Baricentro (Distancia).

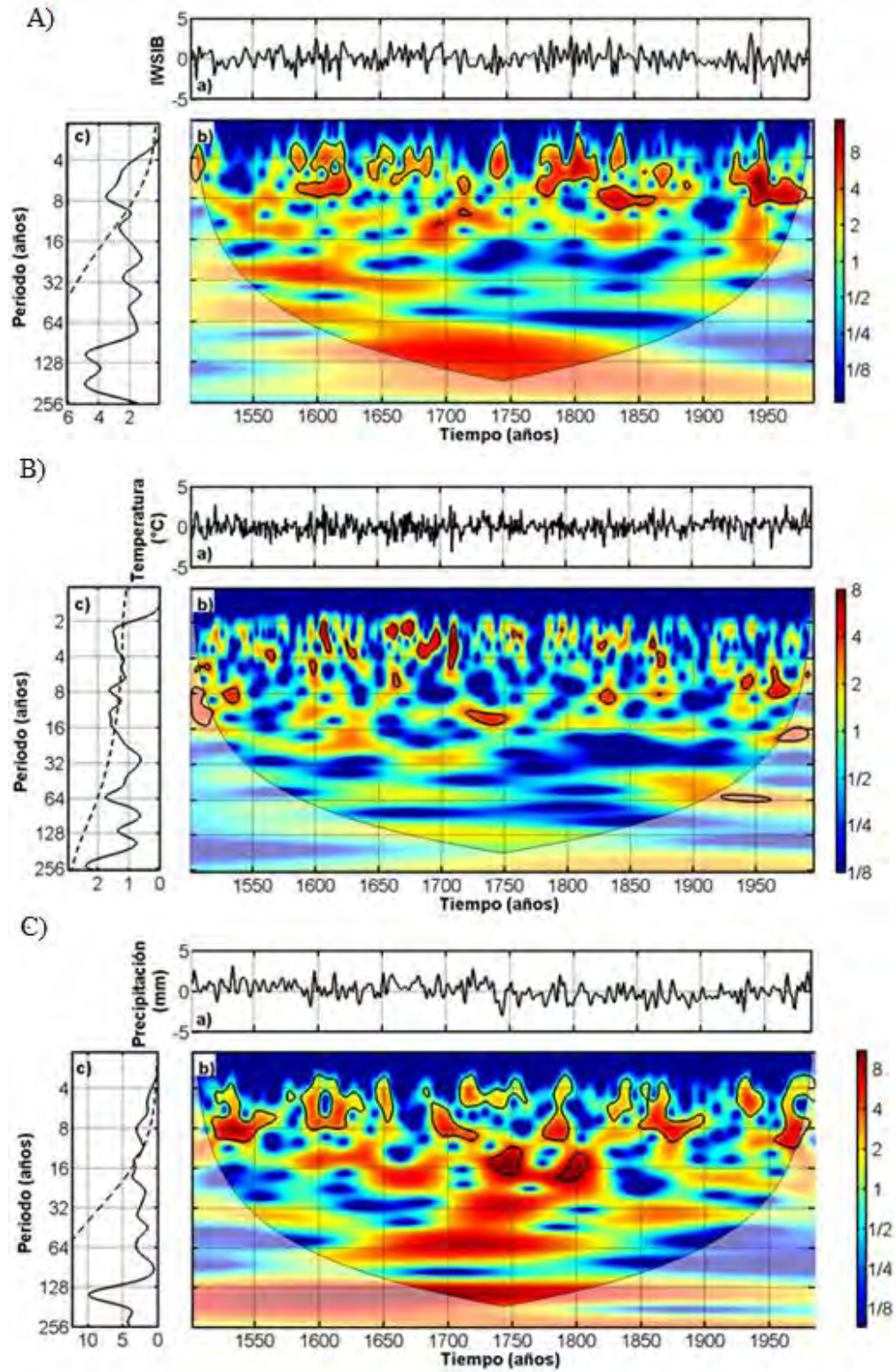


Figura 33 Wavelets de las series de tiempo climáticas.
 A) IWSIB, B) Temperatura de Invierno, C) Precipitación de Invierno.

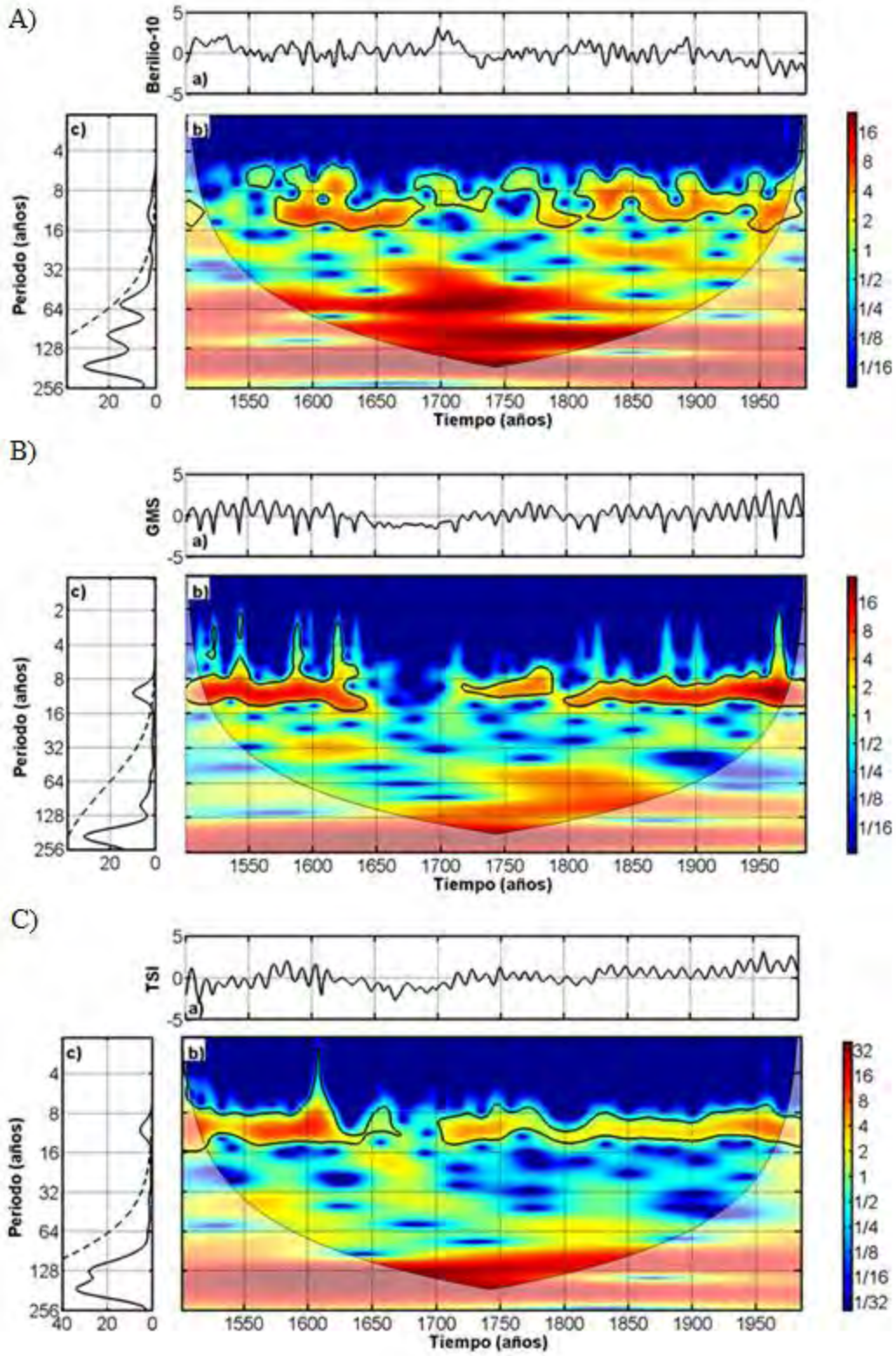


Figura 34 Wavelets de las series de tiempo. A) Berilio-10, B) GMS y C) TSI.

La transformada wavelet del Berilio 10 se muestra en la figura 34 A. La serie de tiempo se muestra en el panel a, la transformada wavelet (panel b) muestra periodicidades de 12, 22, 58.9, 102 y 176 años. El espectro global muestra que las periodicidades de 12, 22 y 58.9 son las más importantes y están arriba del 95% de confiabilidad (panel c).

En la figura 34 B se presentan los resultados de la transformada wavelet del Grupo de Manchas Solares. La serie de tiempo se muestra en el panel a, la transformada muestra periodicidades de 10.4, 28, 57, 105 y 198 años (panel b). El espectro global (panel c) muestra que la periodicidad principal es la de 10.4 años.

Los resultados de la transformada wavelet de la TSI se muestran en la figura 34 C. La serie de tiempo se presenta en el panel a. El espectro wavelet muestra que la serie de tiempo tiene periodicidades a 11, 20, 38, 66, 128 y 176 años (panel b). El espectro global (panel c) muestra que la periodicidad principal es la de 11 años.

La figura 35 A muestra los resultados de la transformada wavelet de la serie de tiempo de los Rayos Cósmicos. La serie de tiempo se muestra en el panel a. El espectro muestra periodicidades de 11 y 181 años (panel b). El espectro global muestra que la periodicidad más importante es la de 11 años (panel c).

Los resultados de la transformada wavelet del Baricentro (Longitud) se muestran en la figura 35 B. La serie de tiempo se presenta en el panel a. El espectro wavelet muestra que la serie de tiempo tiene periodicidades a 5.6, 11.5, 29, 85 y 170 años (panel b). El espectro global (panel c) muestra que las periodicidades principales son las de 5.6 y 11 años.

La figura 35 C muestra los resultados de la transformada wavelet de la serie de tiempo del Baricentro (Distancia). La serie de tiempo se muestra en el panel a. El espectro muestra periodicidades de 13, 19.6, 35 y 170 años (panel b). El espectro global muestra que las periodicidades más importantes son las de 13 y 19.6 años (panel c).

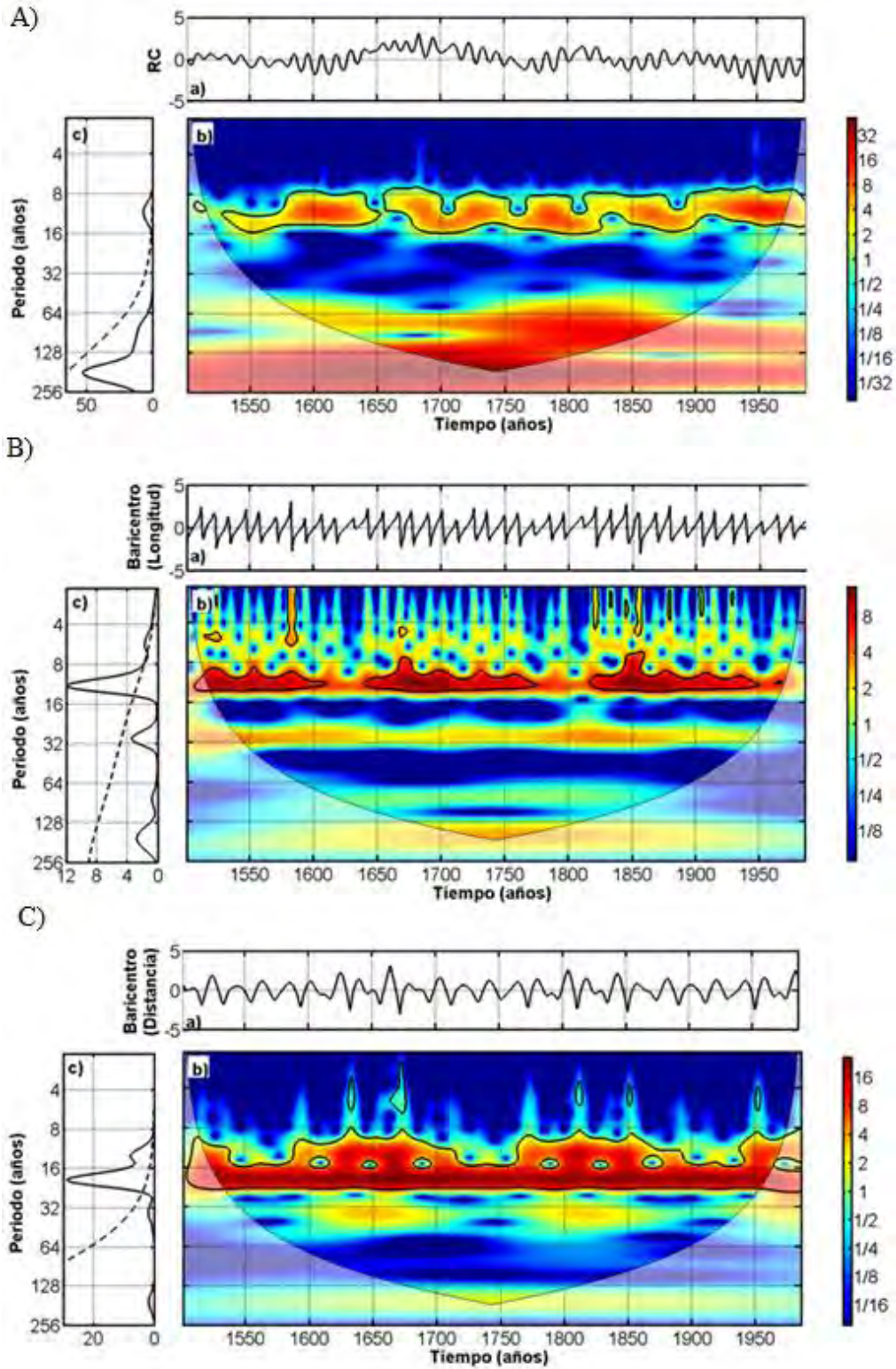


Figura 35 Wavelets de las series de tiempo. A) RC, B) Baricentro (Longitud), C) Baricentro (Distancia).

Tabla 5 Principales periodicidades de las series de tiempo estudiadas.

	IWSIB	Temp. Inv.	Prec. Inv.	Be-10	GMS	TSI	RC	Bar. Long.	Bar. Dist.
Periodicidad triennial	3	2.5							
Periodicidad quinquenal		5	5.05					5.6	
Periodicidad de 8 años	7.5	8	8.2						
Periodicidad decadal	12.7	12.3	14.7	12	10.4	11	11	11.5	13
Periodicidad de 20 años			18.5	22		20			19.6
Periodicidad 30 años	29.4		36		28	38		29	35
Periodicidad de 60 años	50	62	62	58.9	57	66			
Periodicidad secular	96	121	148	102	105	128		85	
Periodicidad de 200 años	187	242		176	198	176	181	170	170

7.4.2. Wavelets de Coherencia

En esta sección se muestra el análisis de la relación entre las series de tiempo. Para este análisis utilizaron los wavelets de coherencia y también se estudió la coherencia de fase entre las series de tiempo. El wavelet de coherencia muestra cuando dos series de tiempo son similares en amplitud y frecuencia.

En la figura 36 A se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre el IWSIB y Be-10. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 4, 8, 14, 22, 32, 80 y 180 años donde la fase tiene mucha variación. A las periodicidades de 4, 8, 14, 22 y 32 años la relación de fase muestra mucha variación. La relación de fase a las periodicidades es de 80 y 180 años es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad secular (panel d).

La figura 36 B muestra los resultados del wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y Be-10. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 4, 8, 32, 64 y 180 años donde la fase tiene mucha variación. La relación de fase a las periodicidades es de 64 y 180 años es muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 64 y 130 años (panel d).

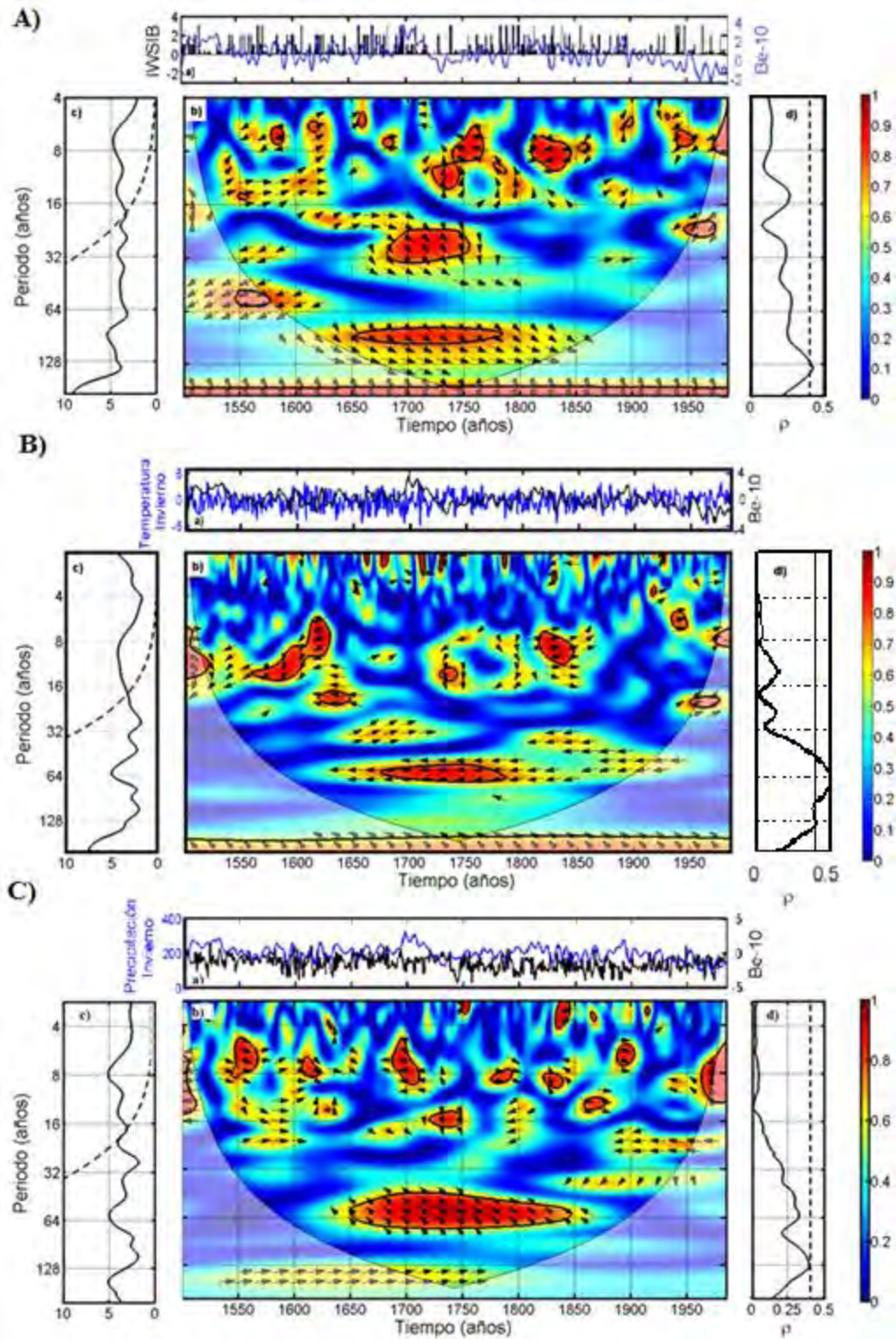


Figura 36 Wavelets de Coherencia. A) IWSIB y Be-10 B) Temperatura de invierno y Be-10, C) Precipitación de invierno y Be-10.

En la figura 36 C se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y Be-10. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 4, 8, 16, 28, 32, 64 y 130 años donde la fase tiene mucha variación. La relación de fase a las periodicidades de 64 y 180 años es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de 130 años (panel d).

Los resultados del wavelet de coherencia entre el IWSIB y TSI se presentan en la figura 37 A. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 4, 14, 22, 32, 55, 130 y 180 años donde la fase tiene mucha variación. A las periodicidades de 4, 14, 22, 32 y 55 años la relación es pobre y presenta mucha variación de fase. La relación de fase entre las series a las periodicidades de 180 años es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de 180 años (panel d).

La figura 37 B muestra los resultados del wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y TSI. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 4, 14, 18, 34, 64, 128 y 180 años donde la fase presenta mucha variación. La relación de fase a las periodicidades de 64 y 180 años es muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de 128 años (panel d).

El wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y TSI se muestra la figura 37 C. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 4, 14, 22, 34, 64 y 130 años. La relación de fase a las periodicidades mayores a 16 años es bastante constante por largos periodos de tiempo (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 22 y 130 años (panel d).

En la figura 38 A se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre el IWSIB y GMS. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 9, 32, 64, y 180 años. A las periodicidades de 9 y 32 años la relación es pobre y presenta mucha variación de fase. La relación de fase entre las series a las periodicidades de 64 y 180 años es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 64 y 130 años (panel d).

Los resultados del wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y GMS se presentan en la figura 38 B. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 5, 14, 22, 70 y 180 años. La relación de fase a las periodicidades de 70 y 180 años es

muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la banda de 70 a 180 años (panel d).

En la figura 38 C se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y GMS. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 10, 22, 40 y 130 años. La relación de fase a la periodicidad de 40 años es bastante constante por largos periodos de tiempo (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de y 130 años (panel d).

El wavelet de coherencia entre el IWSIB y RC se presenta en la figura 39 A. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 14, 22-70, 128 y 180 años. A la periodicidad de 14 años la relación es pobre y presenta mucha variación de fase. La relación de fase entre las series a las periodicidades de 22-70, 128 y 180 años es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 22-70 y 130 años (panel d).

La figura 39 B muestra los resultados del wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y RC El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 14, 22, 128 y 180 años. La relación de fase a las periodicidades mayores a 60 años es muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la banda de 70 y 180 años (panel d).

En la figura 39 C se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y RC. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 14, 22, y 130 años. La relación de fase a la periodicidad de 130 años es bastante constante por largo periodo de tiempo (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de 130 años (panel d).

Los resultados del wavelet de coherencia entre el IWSIB y baricentro (Longitud) se presentan en la figura 40 A. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 14, 28, 70 y 180 años. A las periodicidades de 14 y 28 años la relación es pobre y presenta mucha variación de fase. La similitud entre las series a las periodicidades de 70 y 180 años es significativa durante casi todo el periodo de tiempo y la relación de fase es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 28, 70 y 180 años (panel d).

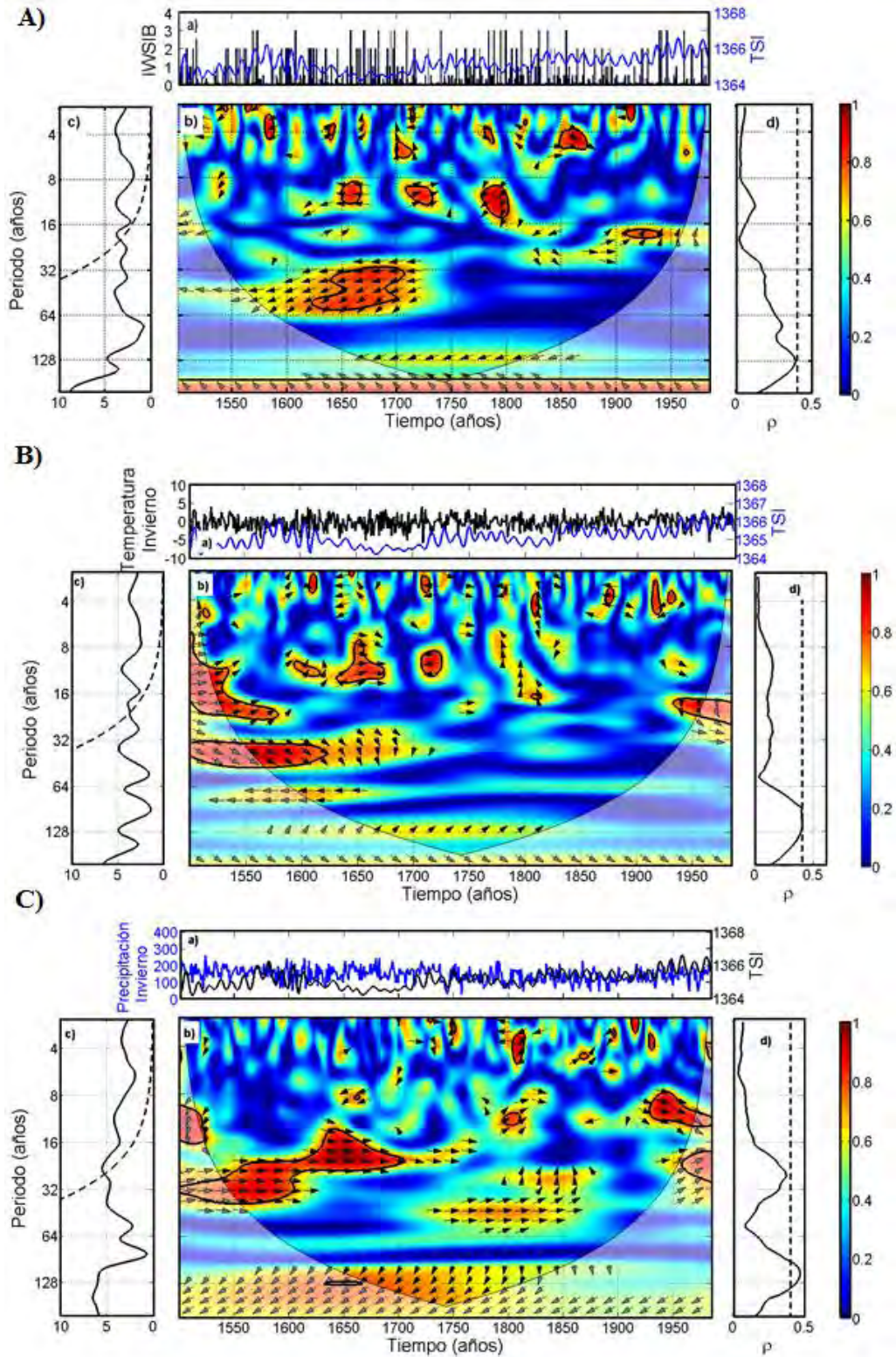


Figura 37. Wavelets de Coherencia. A) IWSIB y TSI, B) Temperatura de invierno y TSI, C) Precipitación de invierno y TSI.

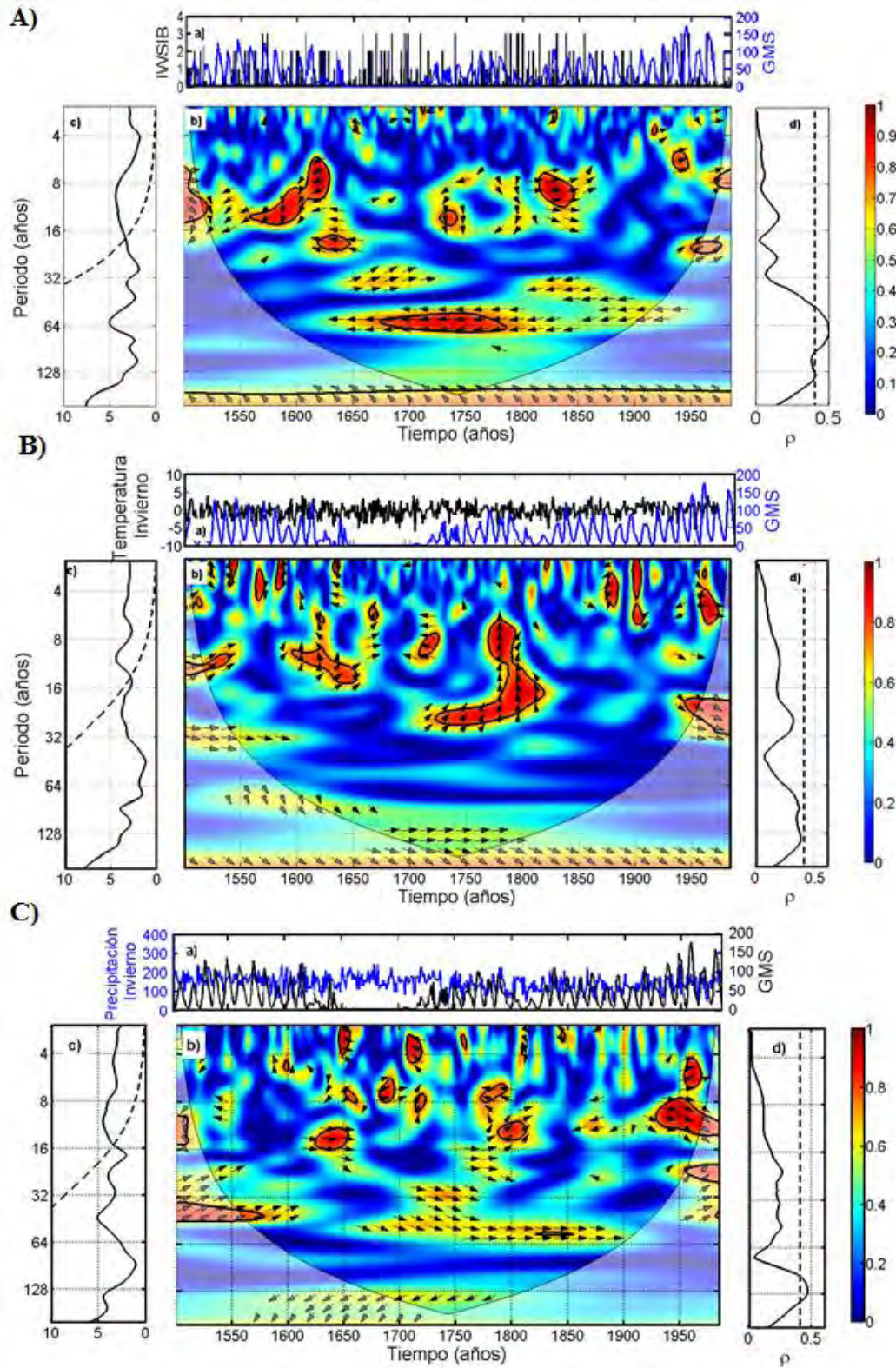


Figura 38 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y GMS, B) Temperatura de invierno y GMS, C) Precipitación de invierno y GMS.

La figura 40 B muestra los resultados del wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y baricentro (Longitud) El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 7, 14, 32 y 180 años. La relación de fase a la periodicidad de 130 años es muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la periodicidad de 130 años (panel d).

Los resultados del wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y baricentro (Longitud) se presentan en la figura 40 C. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 14, 22, y 130 años. La relación de fase a la periodicidad secular es bastante constante por largo periodo de tiempo (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la banda de 130 años (panel d).

En la figura 41 A se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre el IWSIB y baricentro (Distancia). El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 7, 14, 22, 30-64, 90 y 180 años. A las periodicidades de 7, 14, 22, años la relación es pobre y presenta mucha variación de fase. La similitud entre las series a las periodicidades de 30-64, 90 y 180 años es significativa durante largos periodos de tiempo y la relación de fase es constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a las periodicidades de 32 y 180 años (panel d).

El wavelet de coherencia entre la Temperatura de Invierno y baricentro (Distancia) se presenta en la figura 41 B. El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan similitudes a las periodicidades de 14, 22 y 180 años. La relación de fase a la periodicidad de 180 años es muy constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a para la banda de 64 a 180 años (panel d).

En la figura 41 C se muestran los resultados del wavelet de coherencia entre la Precipitación de Invierno y baricentro (Distancia). El panel a muestra las series de tiempo. El espectro de coherencia muestra que ambas series de tiempo presentan pequeñas similitudes a las periodicidades de 14, 22, y 130 años. La relación de amplitudes a la periodicidad secular es baja pero relación de fase es bastante constante (panel b). Los resultados de coherencia de fase muestran que las series están sincronizadas a la banda de 130 años (panel d).

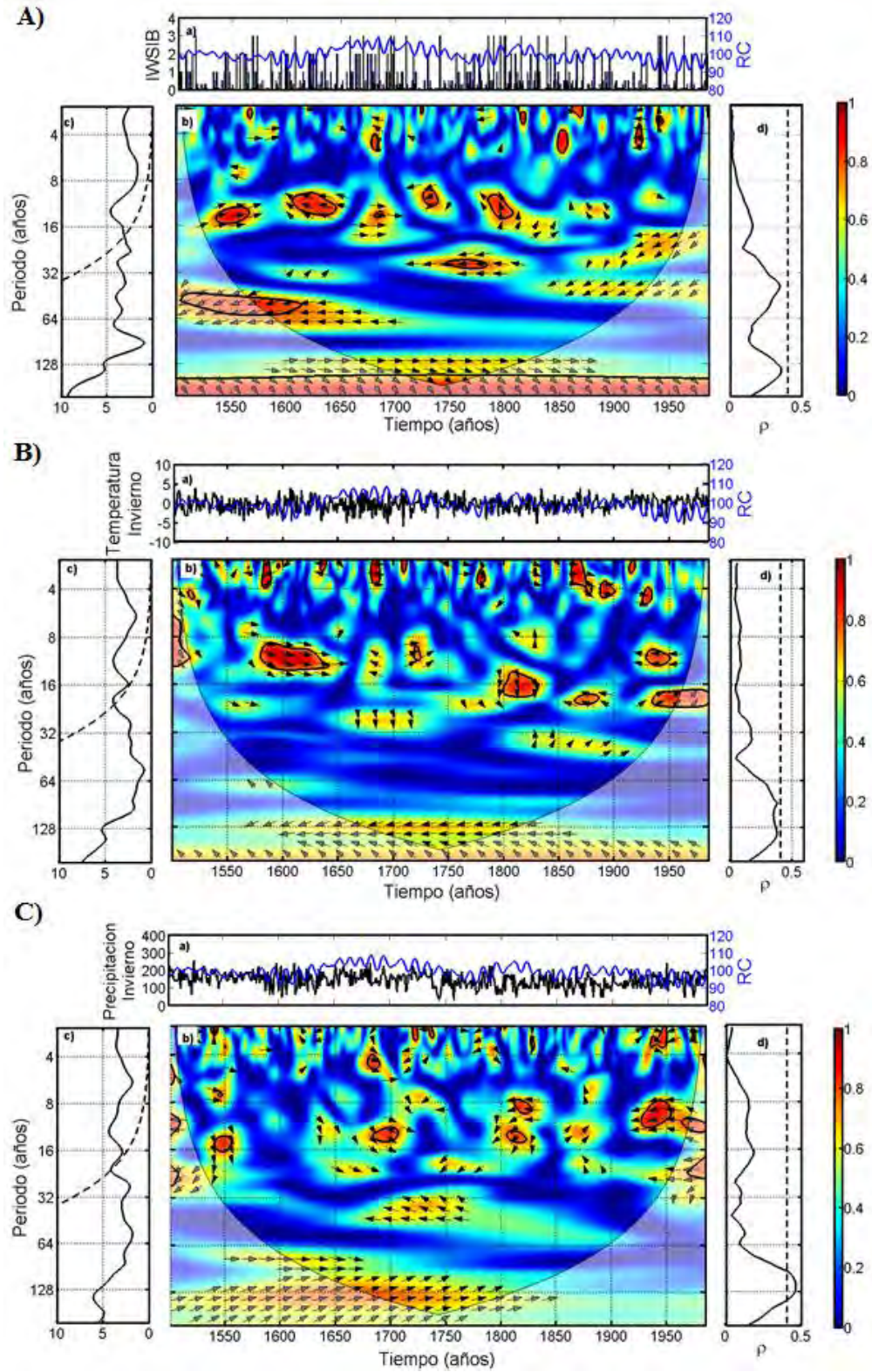


Figura 39 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y RC, B) Temperatura de invierno y RC, C) Precipitación de invierno y RC.

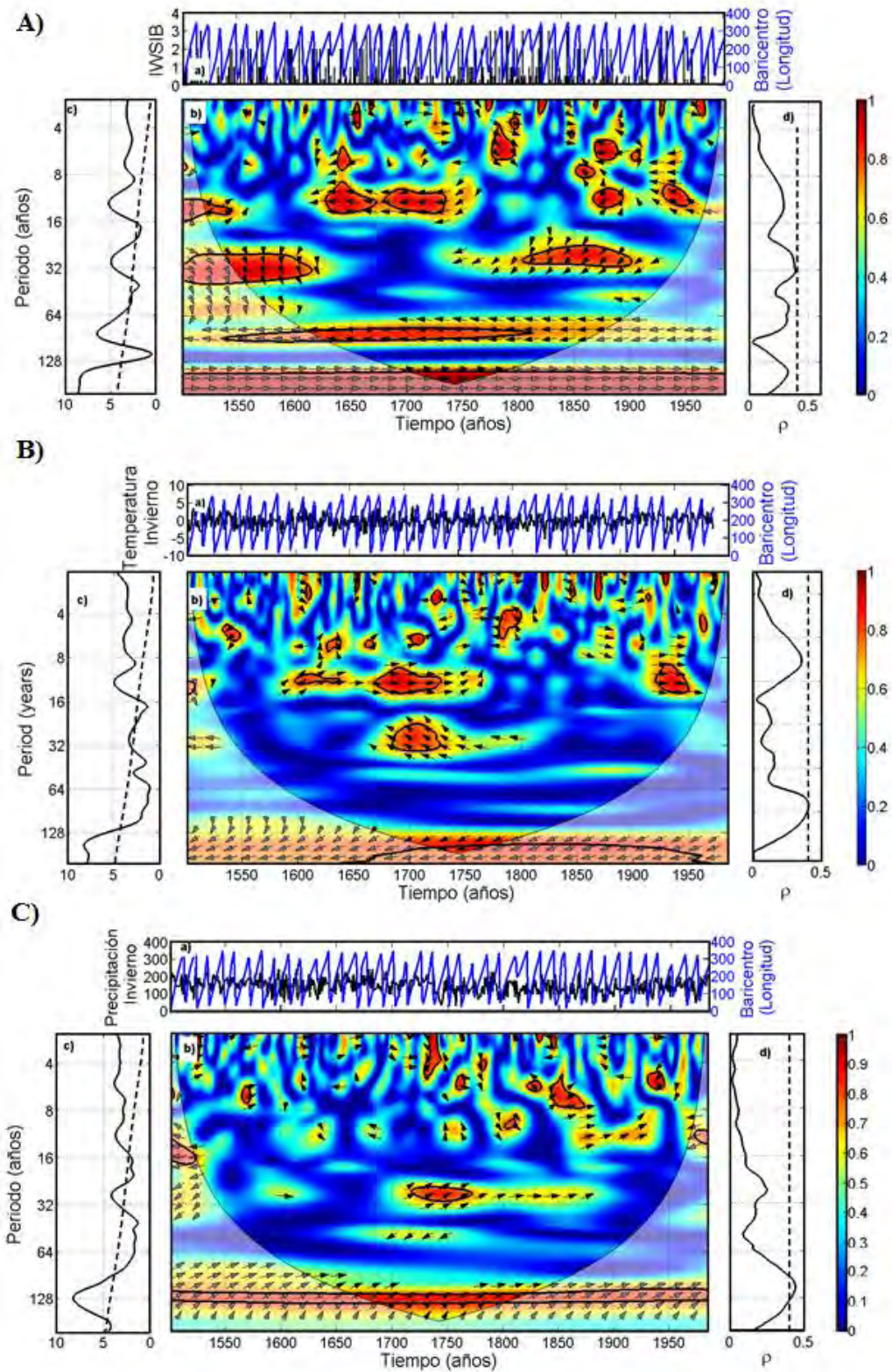


Figura 40 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y Baricentro (Longitud), B) Temperatura de invierno y Baricentro (Longitud), C) Precipitación de invierno y Baricentro (Longitud).

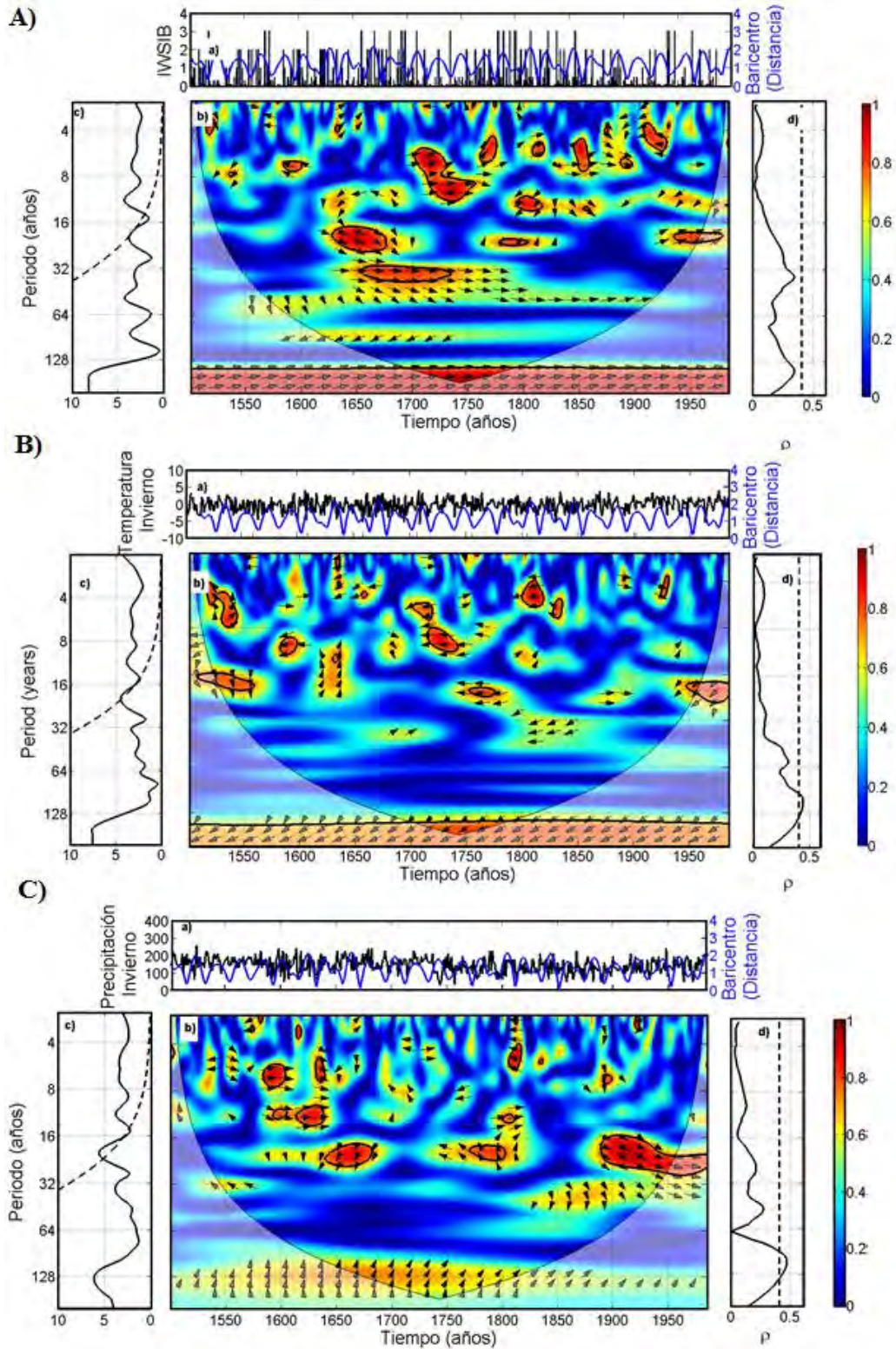


Figura 41 Wavelets de Coherencia: A) IWSIB y Baricentro (Distancia), B) Temperatura de invierno y Baricentro (Distancia), C) Precipitación de invierno y Baricentro (Distancia).

7.4.3. Wavelet de Coherencia Parcial

En esta sección se muestran los wavelets de coherencia parcial entre las series de tiempo eliminando el efecto del baricentro. Los resultados se muestran a través de las figuras 42-53. En el panel a de cada figura se muestran las series de tiempo, el panel b presenta el wavelet de coherencia y el panel c el espectro global de potencia.

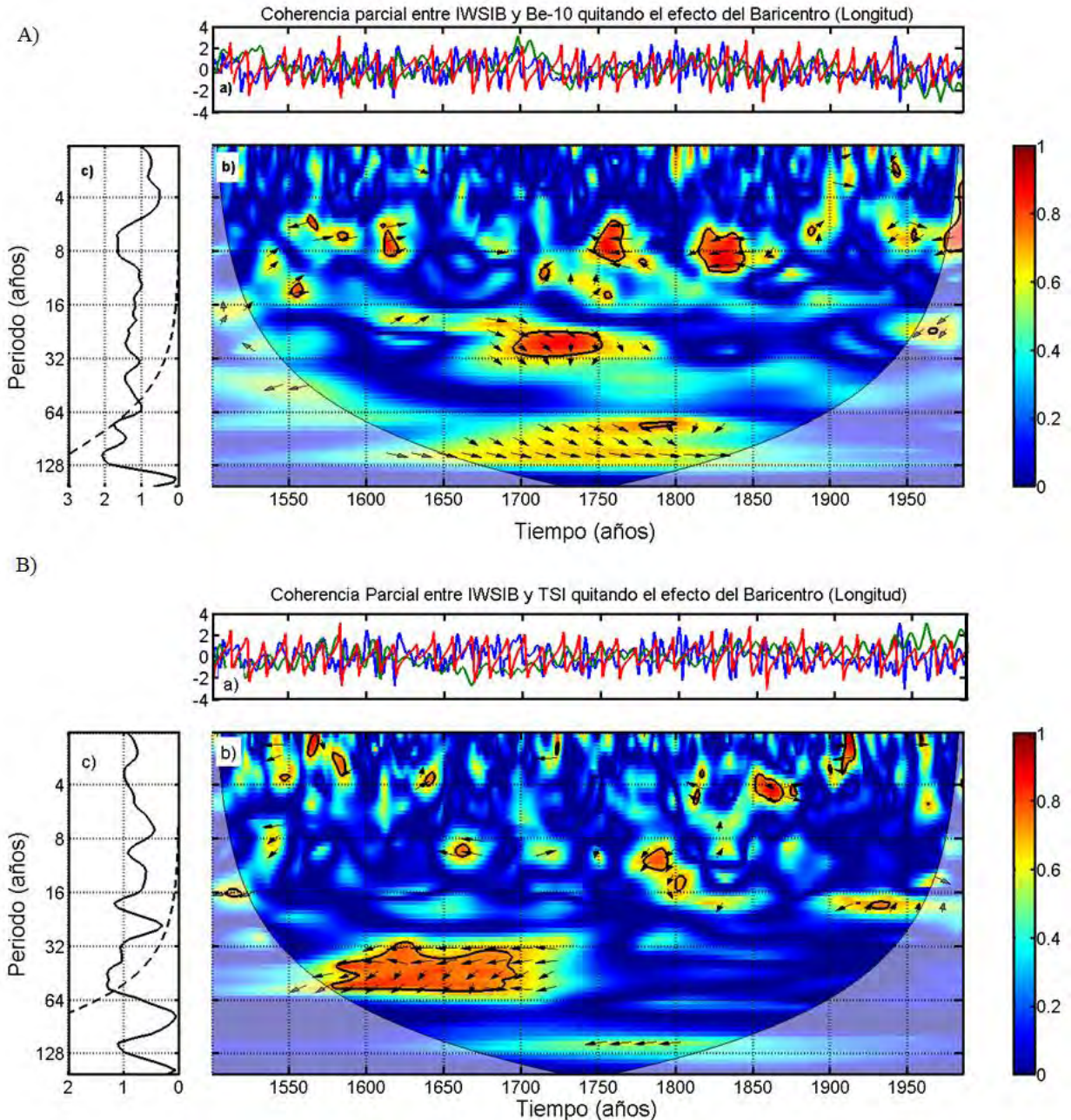


Figura 42 Wavelets de Coherencia Parcial. A) IWSIB y Be-10, B) IWSIB y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

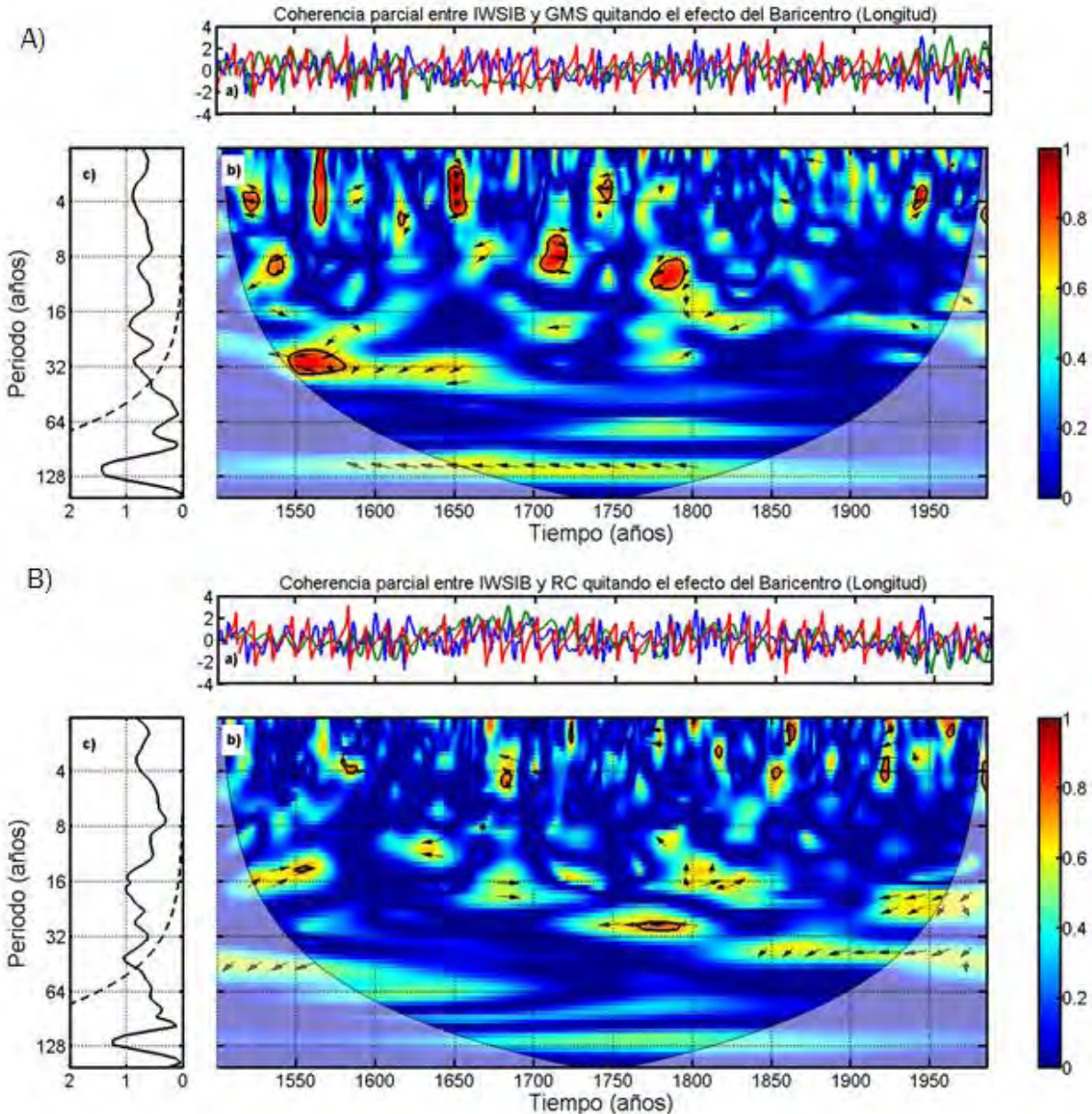


Figura 43 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y GMS, B) IWSIB y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

En la figura 42 A, 42 B, 43 A y 43 B se muestran los resultados del wavelet de coherencia parcial entre el IWSIB y Be-10, IWSIB y TSI, IWSIB y GMS, y IWSIB y RC quitando el efecto del baricentro (Longitud). La coherencia obtenida en cada uno de los análisis es muy baja (menos a la obtenida antes de quitar el efecto del Baricentro (longitud)) lo que implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GMS y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo del IWSIB ya que la serie del Baricentro (Longitud) domina el efecto de la varianza del IWSIB.

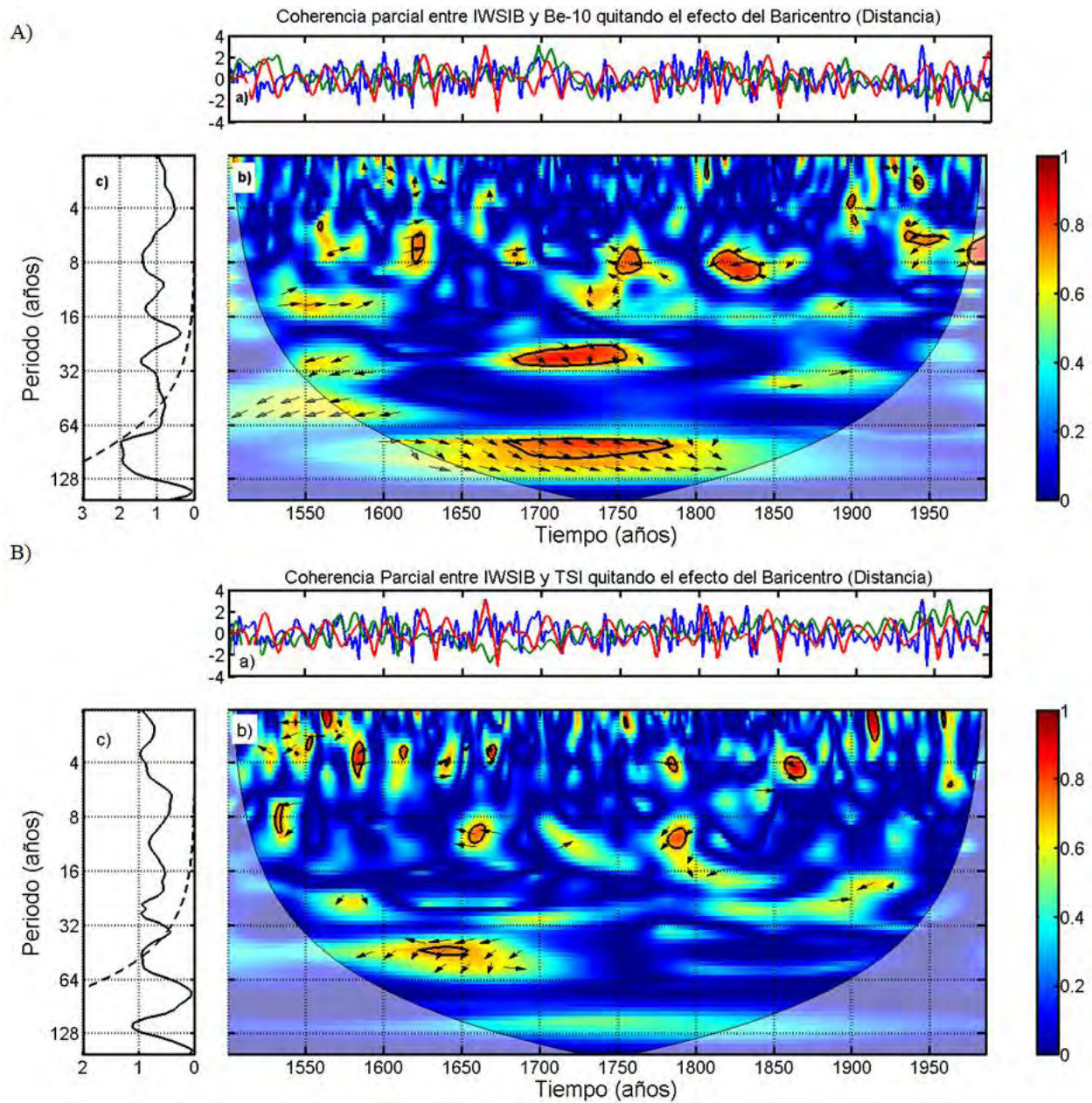


Figura 44 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y Be-10, B) IWSIB y TSI, C, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

Los resultados de la coherencia parcial entre el IWSIB y Be-10, IWSIB y TSI, IWSIB y GMS, y IWSIB y RC quitando el efecto del baricentro (Distancia) se muestran en la figura 44 A, 44 B, 45 A y 45 B. La coherencia obtenida en cada uno de los análisis también es muy baja lo que implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GMS y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo del IWSIB ya que la serie del Baricentro (Distancia) domina el efecto de la varianza del IWSIB.

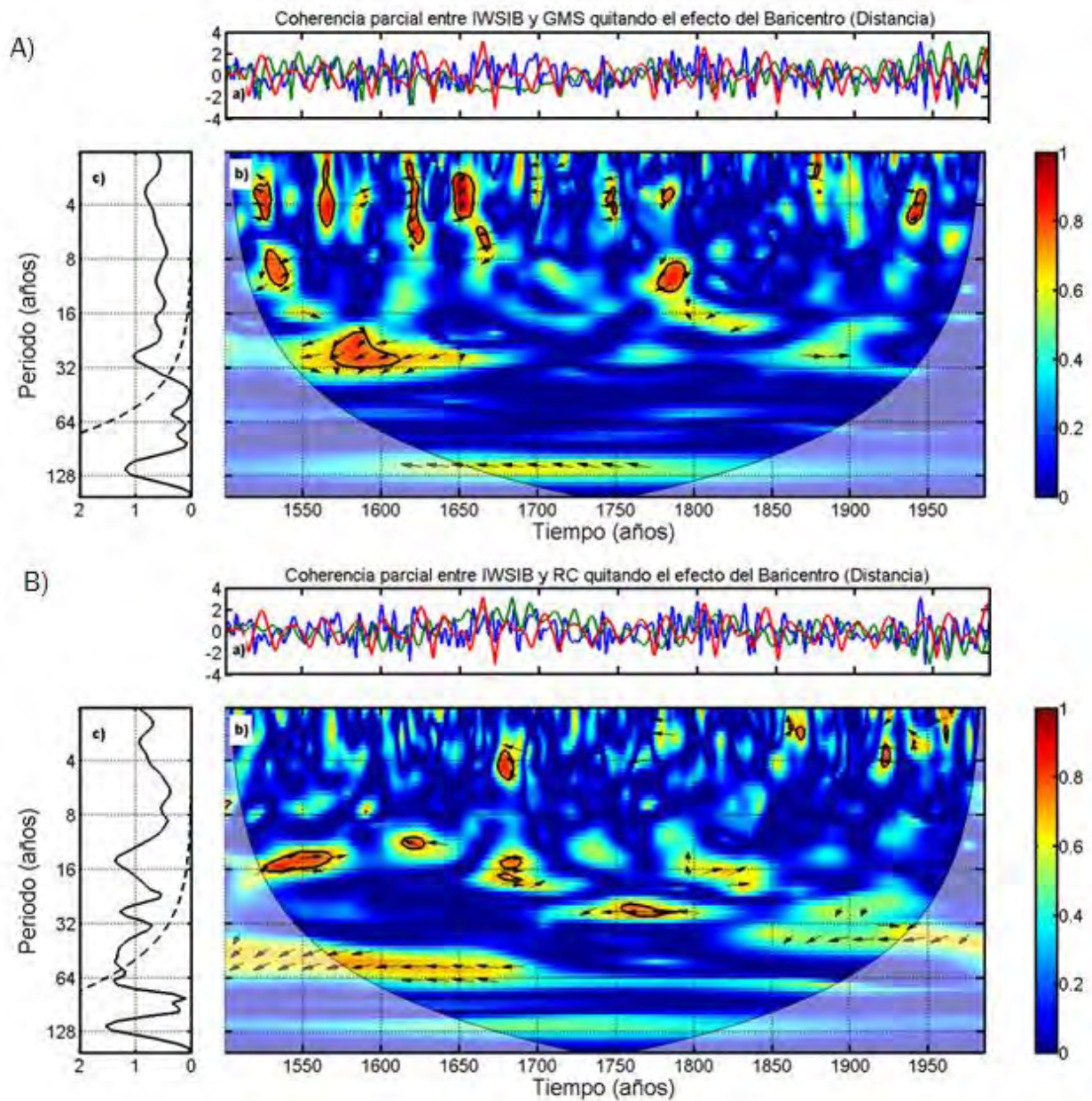


Figura 45 Wavelets de Coherencia Parcial: A) IWSIB y GMS, B) IWSIB y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

En la figura 46 A, 46 B, 47 A y 47 B se muestran los resultados del wavelet de coherencia parcial entre la Temperatura de Invierno y Be-10, Temperatura de Invierno y TSI, Temperatura de Invierno y GMS, y Temperatura de Invierno y RC quitando el efecto del baricentro (Longitud). La coherencia obtenida en cada uno de los análisis es en general muy baja lo que esto implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GMS y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo de la Temperatura de Invierno ya que la serie del Baricentro (Longitud) domina el efecto de la varianza de la Temperatura de

Invierno. Los resultados muestran una zona con alta coherencia para la coherencia parcial entre la Temperatura de Invierno y el Be-10 quitando el efecto del baricentro (Longitud) a la periodicidad de 60 años esto significa que el Be-10 tiene una alta influencia en la Temperatura de Invierno a la periodicidad de 60 años y que el Baricentro no tiene ningún efecto a esta periodicidad.

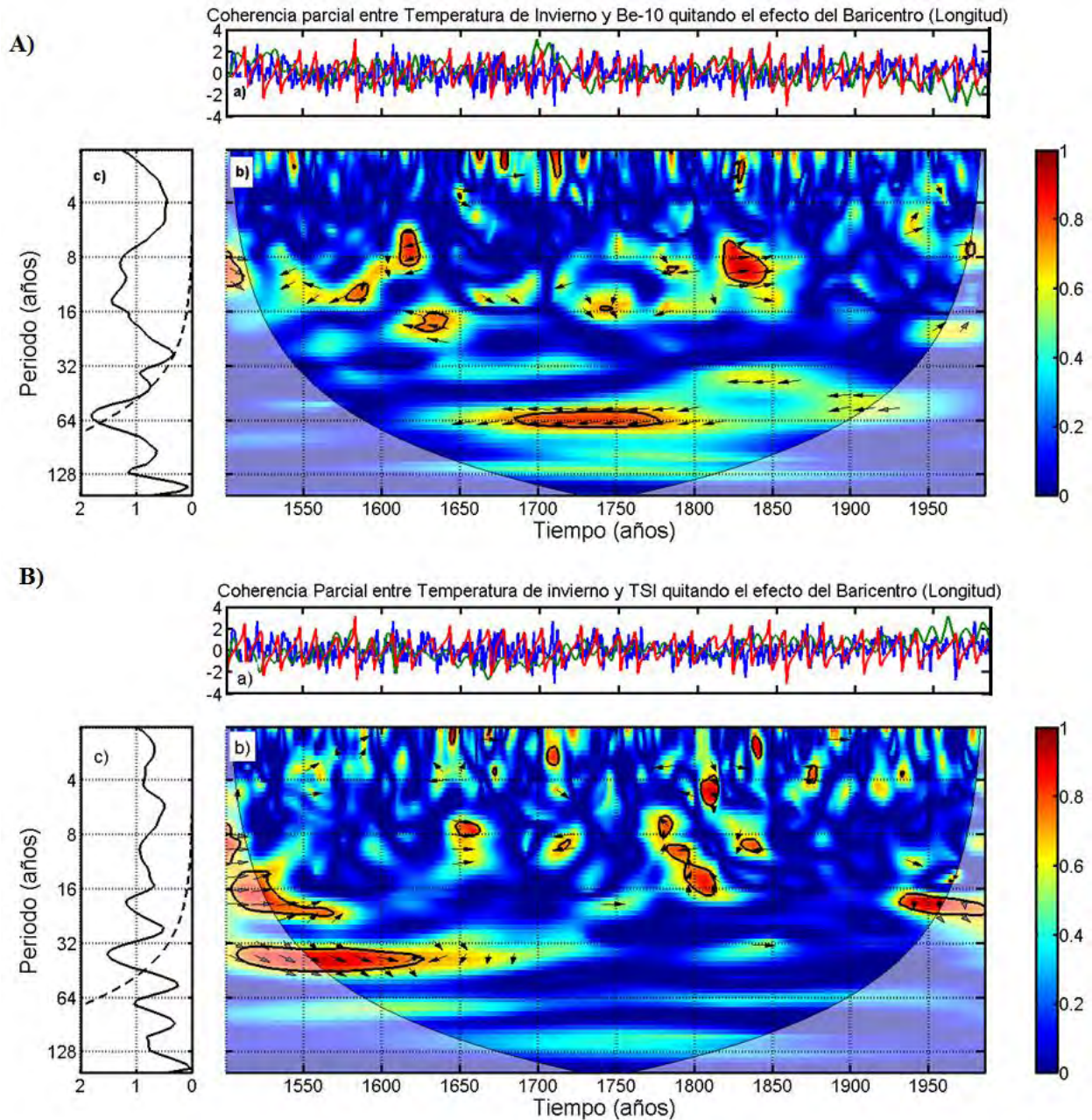


Figura 46 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y Be-10, B) Temperatura de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

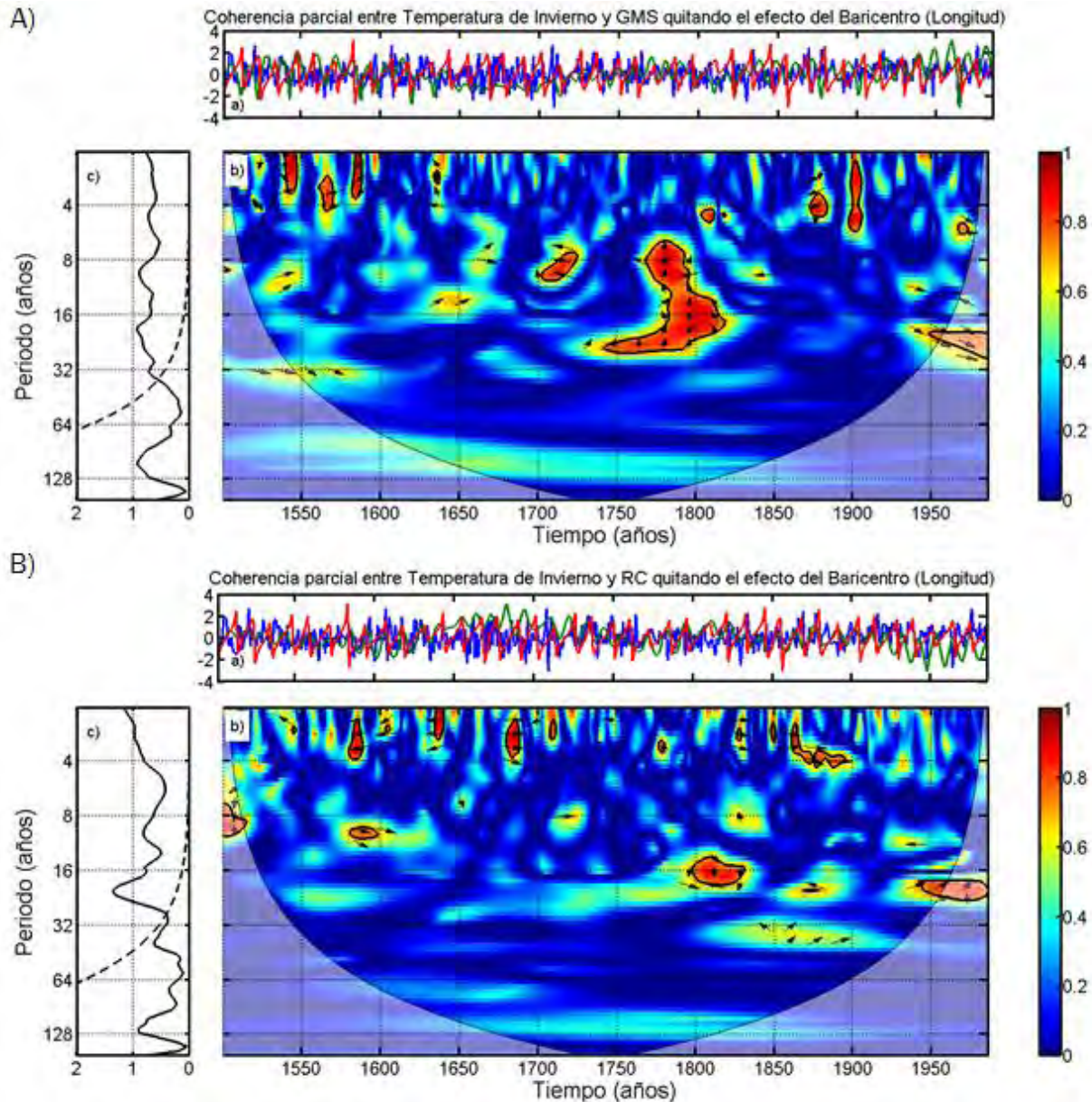


Figura 47 Wavelets de Coherencia Parcial. A) Temperatura de Invierno y GMS, B) Temperatura de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

Los resultados del wavelet de coherencia parcial entre la Temperatura de Invierno y Be-10, Temperatura de Invierno y TSI, Temperatura de Invierno y GMS, y Temperatura de Invierno y RC quitando el efecto del baricentro (Distancia) se presentan en la figura 48 A, 48 B, 49 A y 49 B se muestran. La coherencia obtenida en cada uno de los análisis es en general muy baja lo que esto implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GMS y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo de la Temperatura de Invierno ya que la serie del Baricentro (Distancia) domina el efecto de la varianza de la Temperatura de Invierno. Los resultados muestran una zona con alta coherencia para la coherencia parcial entre la Temperatura de Invierno y el Be-10 quitando el efecto del Baricentro (Distancia) a

la periodicidad de 60 años esto significa que el Be-10 tiene una alta influencia en la Temperatura de Invierno a la periodicidad de 60 años y que el Baricentro no tiene ningún efecto a esta periodicidad.

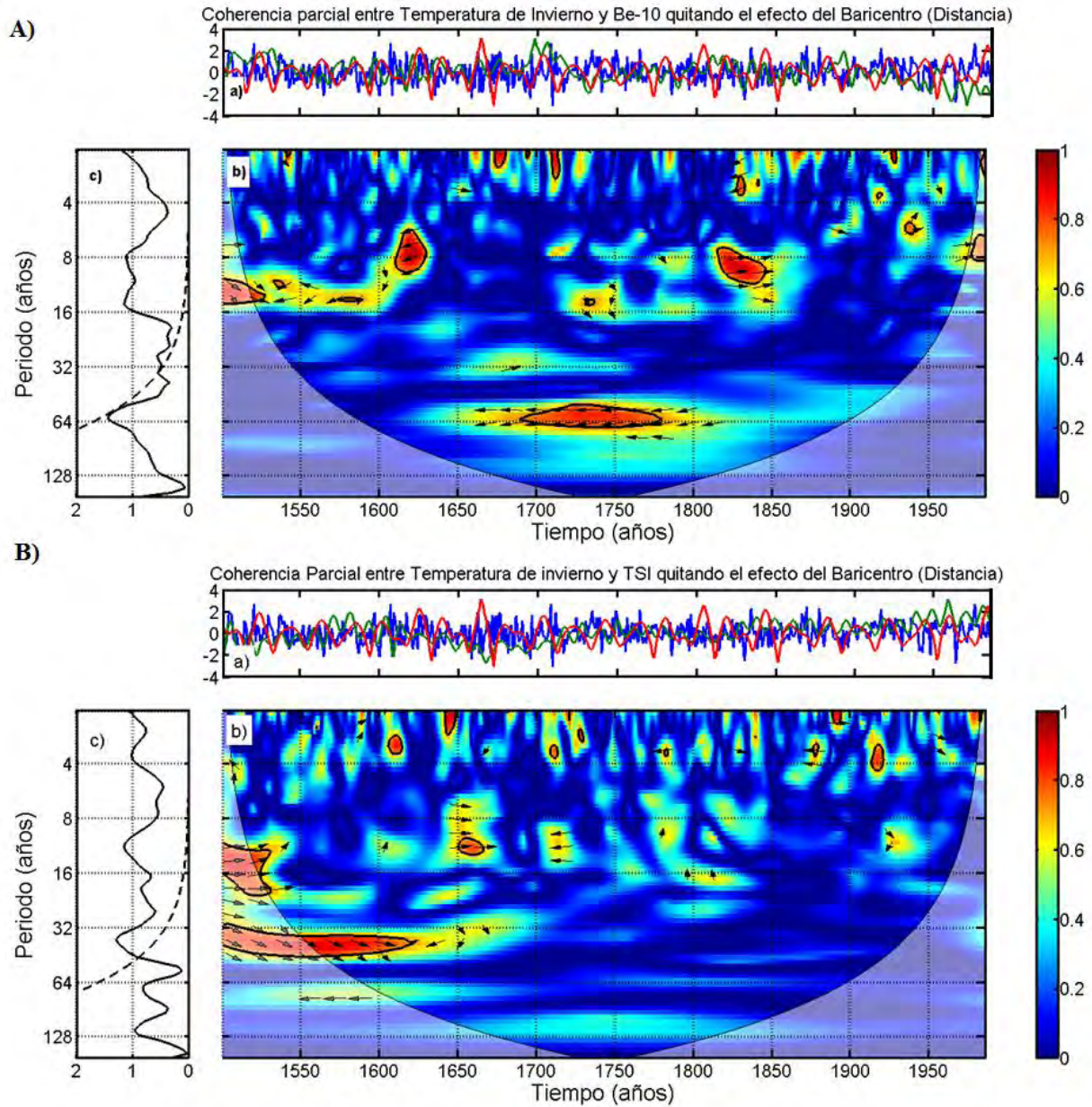


Figura 48. Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y Be-10, B) Temperatura de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

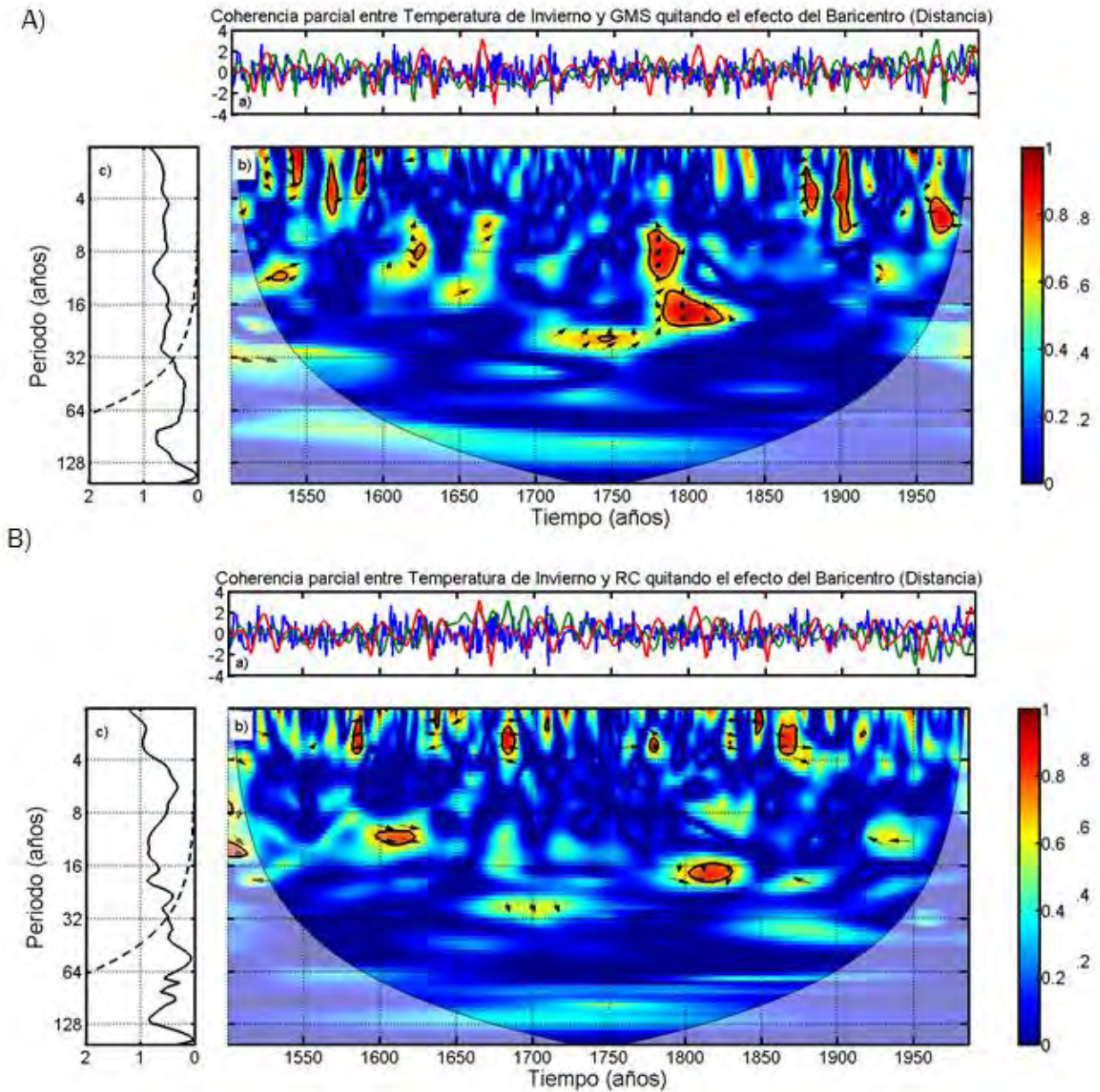


Figura 49 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Temperatura de Invierno y GSM, B) Temperatura de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

En la figura 50 A, 50 B, 51 A y 51 B se muestran los resultados del wavelet de coherencia parcial entre la Precipitación de Invierno y Be-10, Precipitación de Invierno y TSI, Precipitación de Invierno y GSM, y Precipitación de Invierno y RC quitando el efecto del baricentro (Longitud). La coherencia obtenida en cada uno de los análisis es en general muy baja lo que esto implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GSM y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo de la Precipitación de Invierno ya que la serie del Baricentro (Longitud) domina el efecto de la varianza de la Precipitación de Invierno. Los resultados muestran una zona con alta coherencia para la coherencia parcial

entre la Precipitación de Invierno y el Be-10 quitando el efecto del baricentro (Longitud) a la periodicidad de 60 años esto significa que el Be-10 tiene una alta influencia en la Precipitación de Invierno a la periodicidad de 60 años y que el Baricentro no tiene ningún efecto a esta periodicidad.

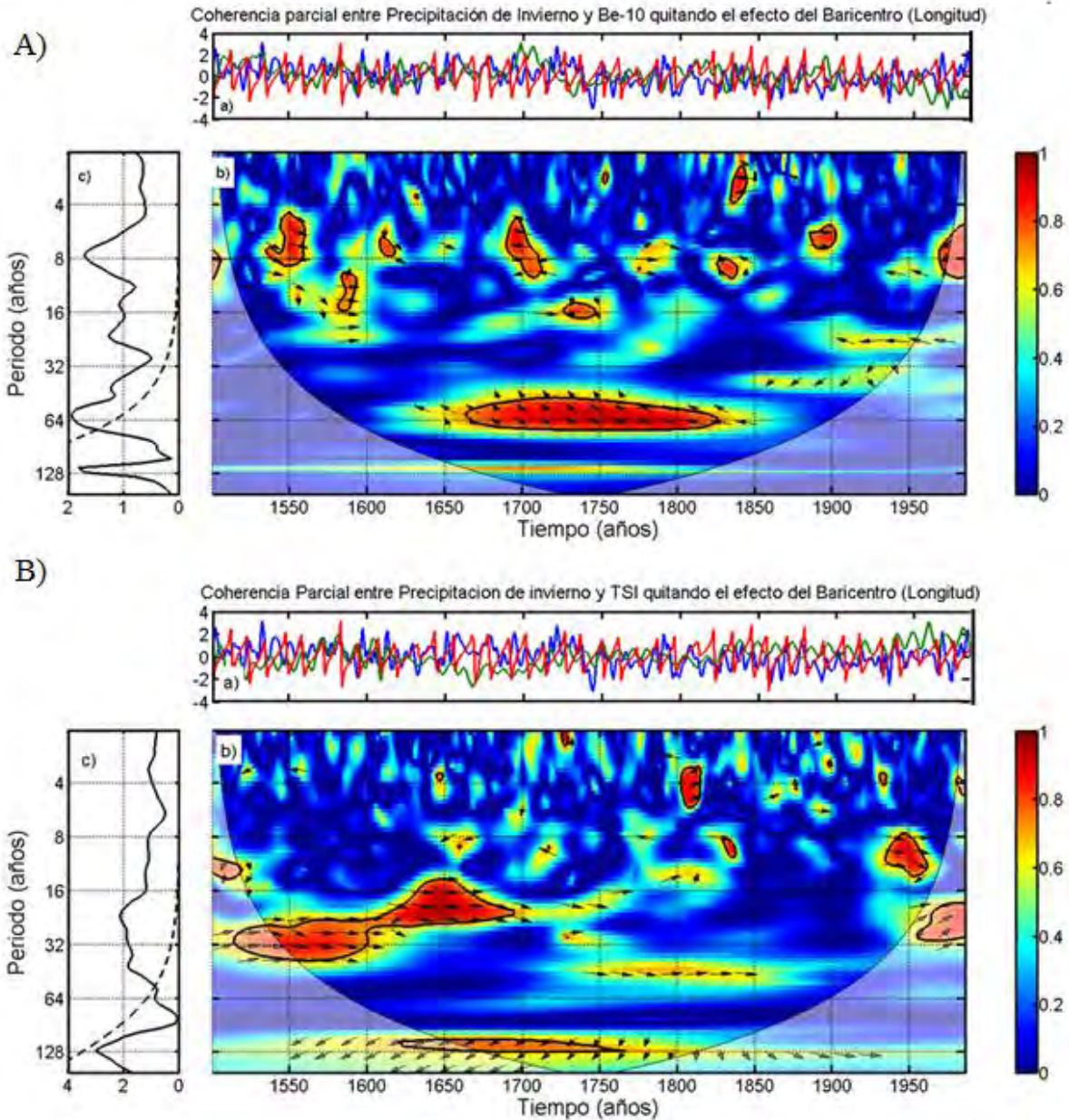


Figura 50 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y Be-10, B) Precipitación de Invierno y TSI, , quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

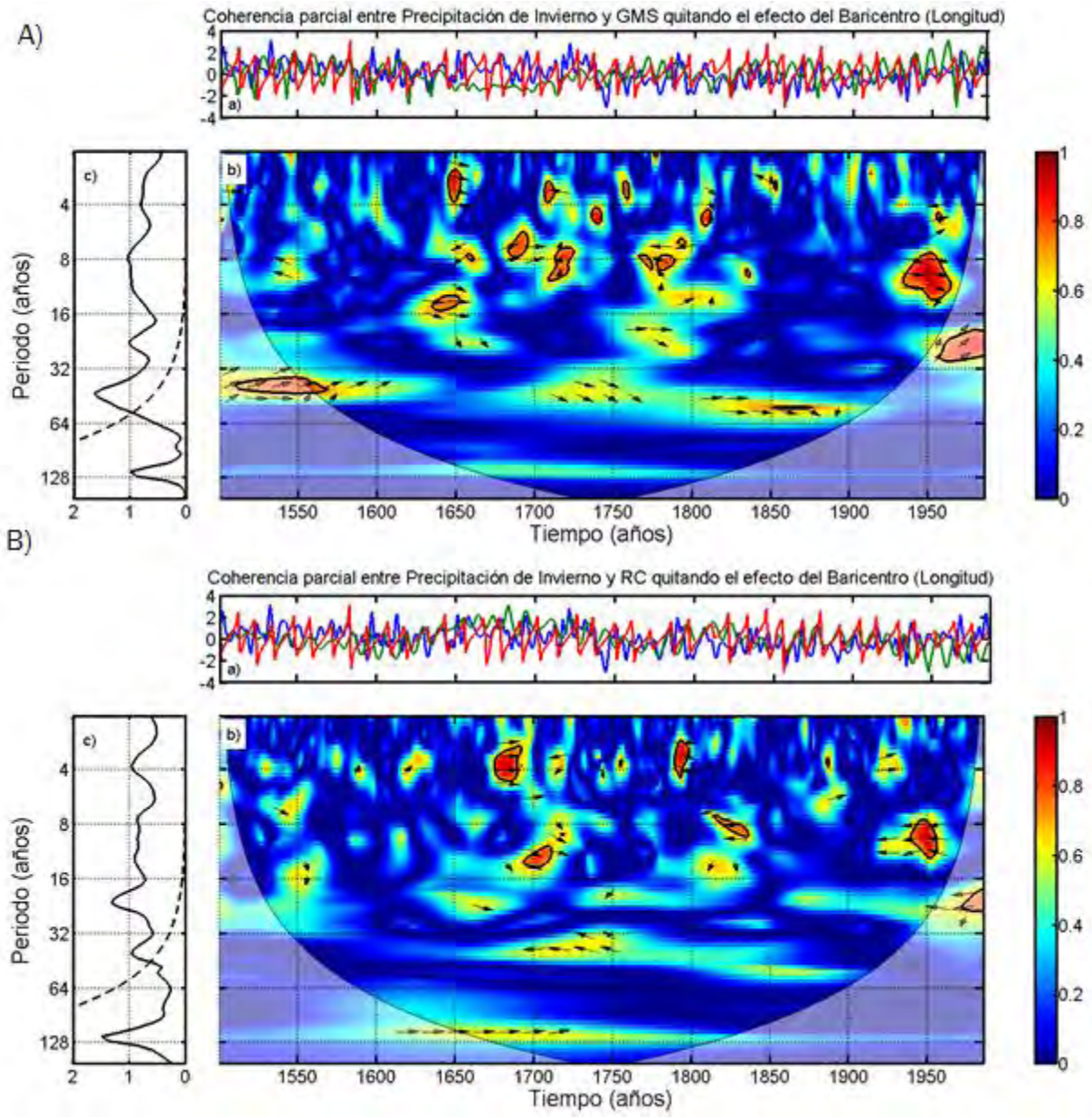


Figura 51 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y GMS, B) Precipitación de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Longitud).

Los resultados del wavelet de coherencia parcial entre la Precipitación de Invierno y Be-10, Precipitación de Invierno y TSI, Precipitación de Invierno y GMS, y Precipitación de Invierno y RC quitando el efecto del baricentro (Distancia) se muestran en la figura 52 A, 52 B, 53 A y 53 B. La coherencia obtenida en cada uno de los análisis es en general muy baja lo que esto implica es que las series de actividad solar (Be-10, TSI, GMS y RC) tienen una baja influencia en la serie de tiempo de la Precipitación de Invierno ya que la serie del Baricentro (Distancia) domina el efecto de la varianza de la Precipitación de Invierno. Los resultados muestran una zona con alta coherencia para la coherencia parcial entre la Precipitación de Invierno y el Be-10 quitando el efecto del baricentro (Distancia) a la

periodicidad de 60 años esto significa que el Be-10 tiene una alta influencia en la Precipitación de Invierno a la periodicidad de 60 años y que el Baricentro no tiene ningún efecto a esta periodicidad.

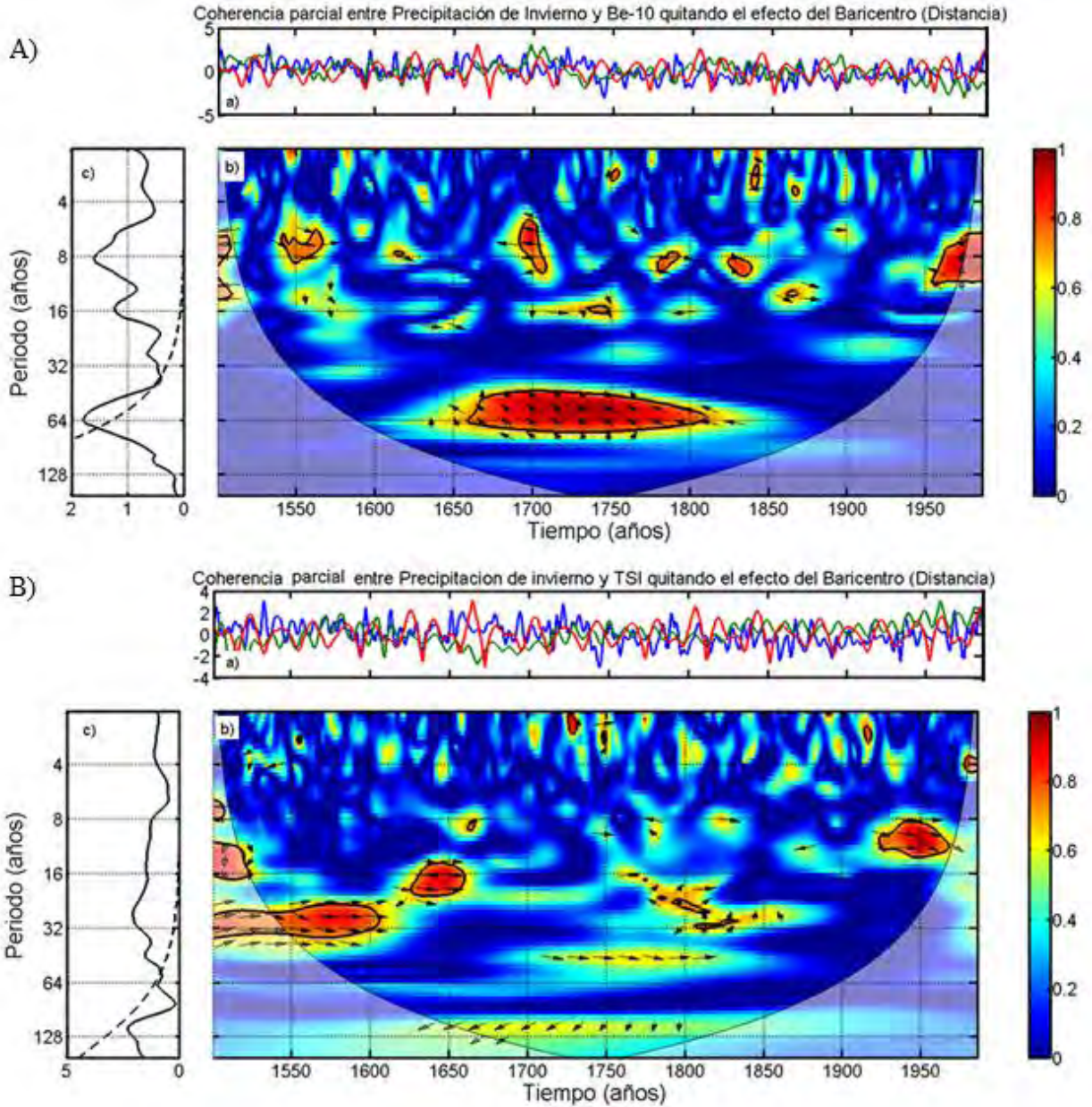


Figura 52 Wavelets de Coherencia Parcial: A) Precipitación de Invierno y Be-10, B) Precipitación de Invierno y TSI, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

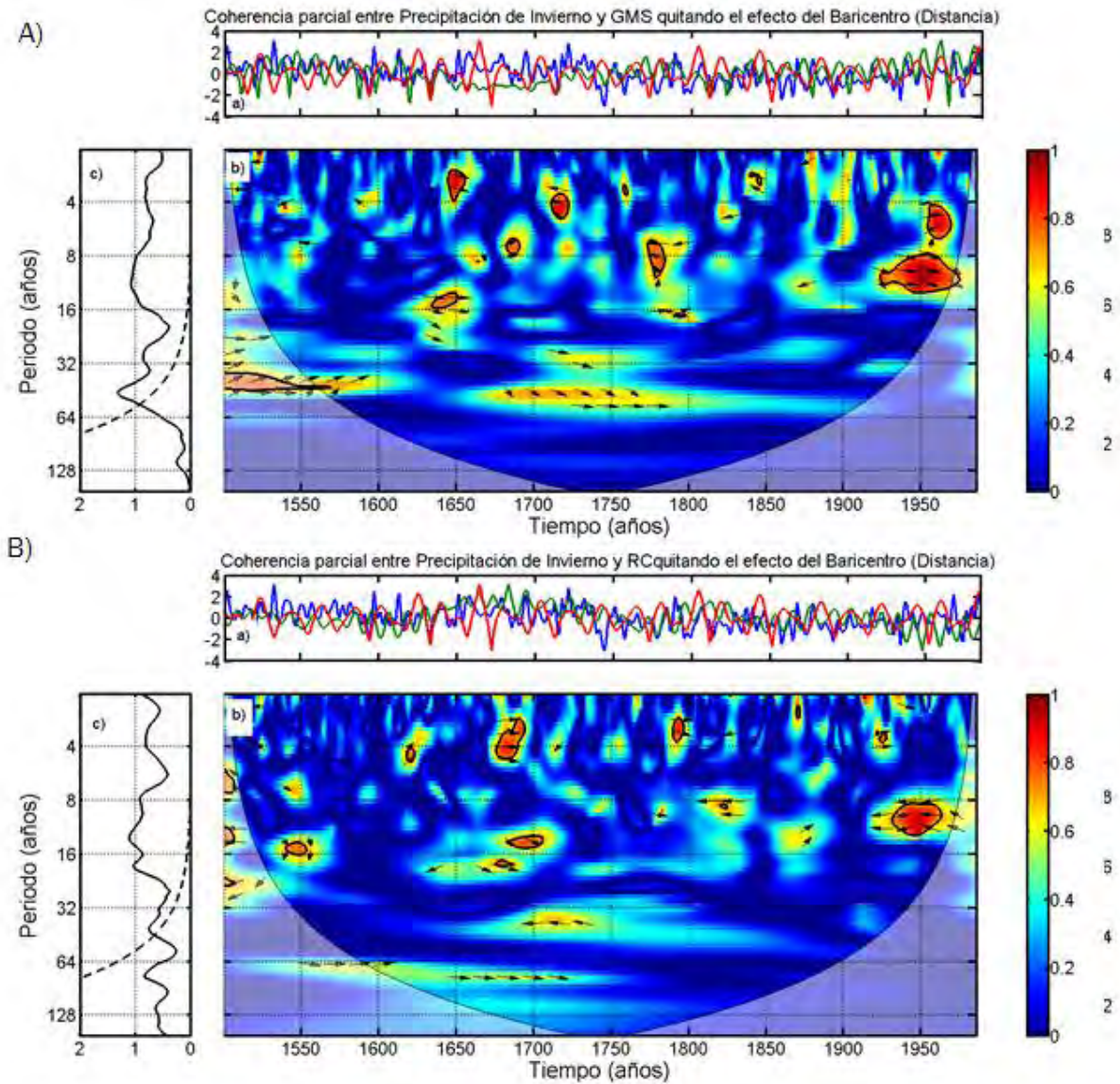


Figura 53 Wavelets de coherencia parcial: a) Precipitación de Invierno y GMS, b) Precipitación de Invierno y RC, quitando el efecto del Baricentro (Distancia).

7.4.4. Acoplamiento de frecuencias cruzadas de Amplitud-Fase

En la transformada wavelet observamos que cada serie de tiempo está compuesta por diferentes componentes y como parte del análisis que realizamos en esta sección se extrajeron las componentes principales de las series de tiempo de IWSIB, temperatura de invierno, precipitación de invierno, Be-10, TSI, GMS, RC, Baricentro (Longitud) y Baricentro (Distancia). En las figuras 54-62 se muestran las componentes principales de cada serie de tiempo.

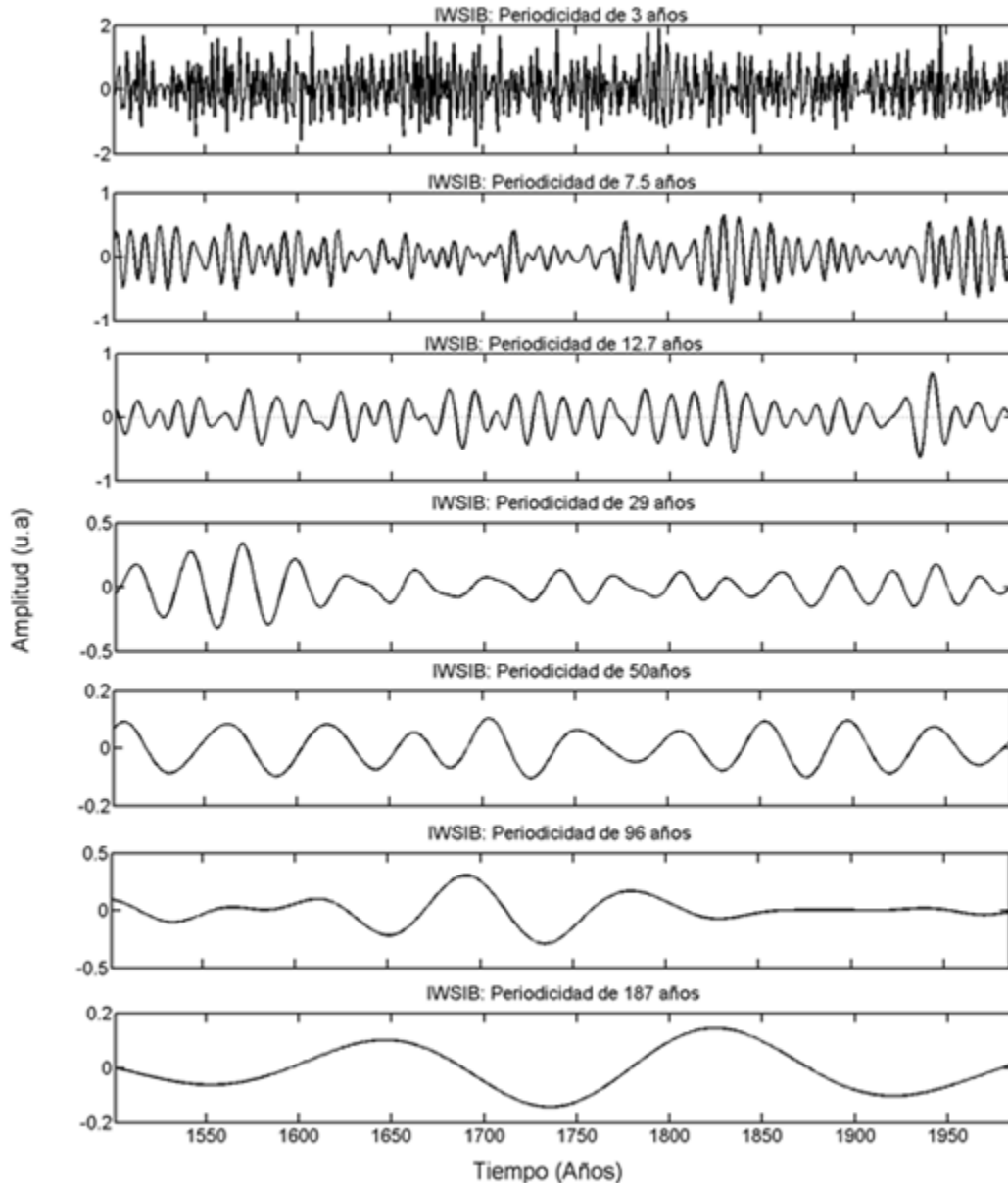


Figura 54 Principales periodicidades de la serie de tiempo de IWSIB.

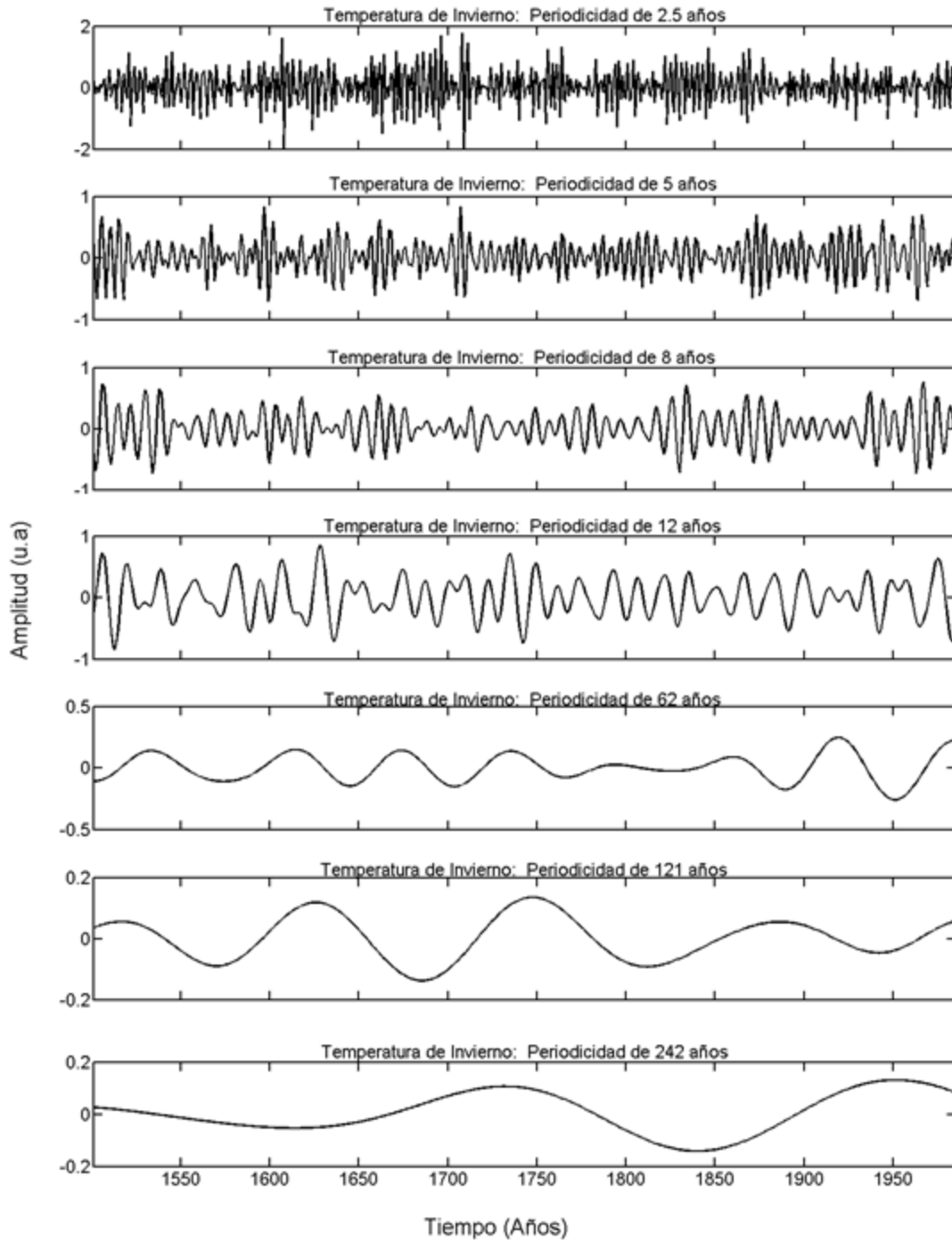


Figura 55 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Temperatura de Invierno.

En la figura 54 se muestran las componentes principales de la serie de tiempo del IWSIB. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 3, 7.5, 12.7, 29.4, 50, 96 y 187 años. Las periodicidades de 3, 7.5 y 12.7 años son las periodicidades más significativas.

Las componentes principales de la serie de tiempo de la Temperatura de Invierno se muestran en la figura 55. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de

2.3, 5, 8, 12.3, 62, 121 y 242 años. Las periodicidades de 2.3, 5, 8 y 12.3 años son las periodicidades más significativas.

En la figura 56 se presentan las componentes principales de la serie de tiempo de la precipitación de invierno. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 5.05, 8.2, 14.7, 18.5, 36, 62 y 148 años. Las periodicidades de 5.05, 8.2, 14.7 y 18.5 años son las periodicidades más significativas.

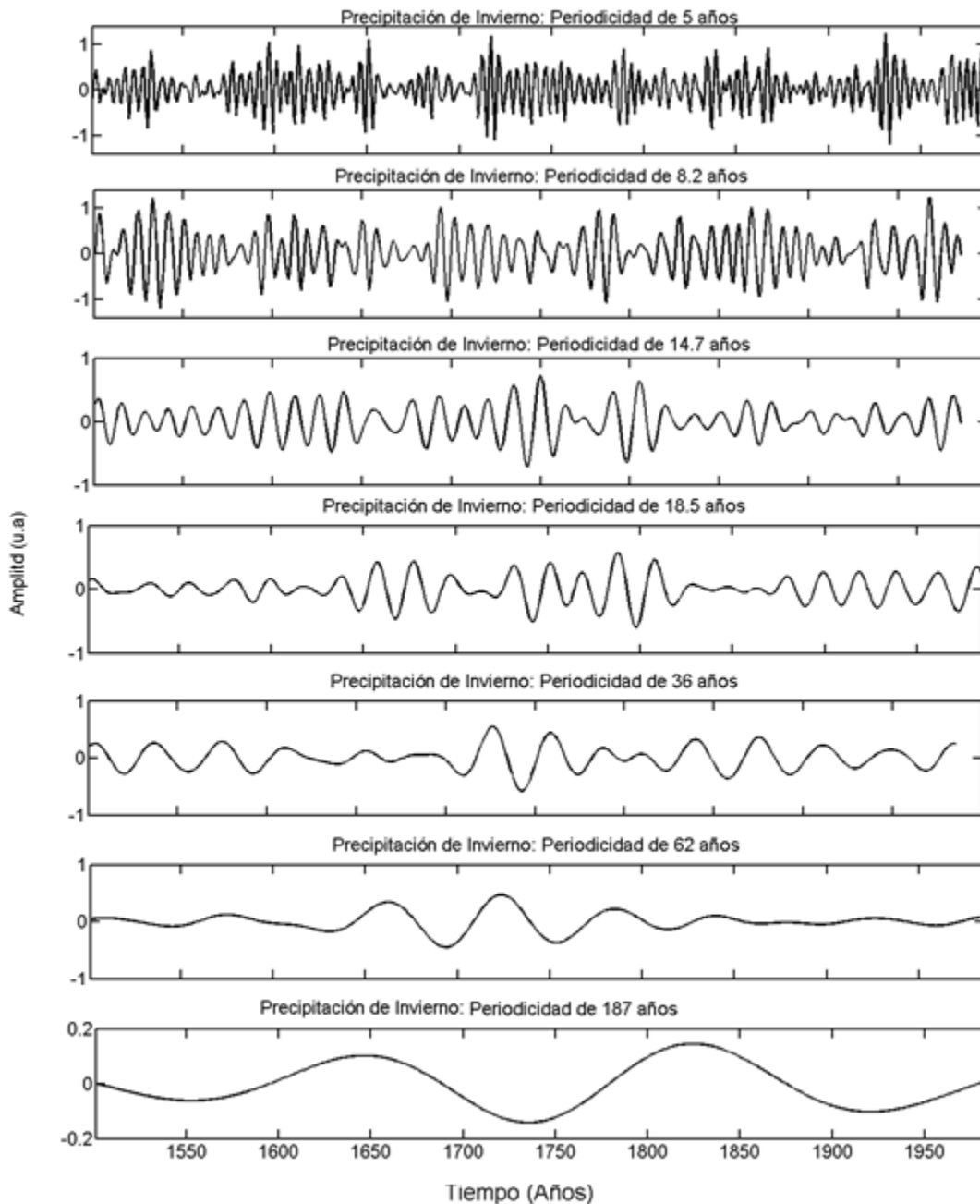


Figura 56 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Precipitación de Invierno.

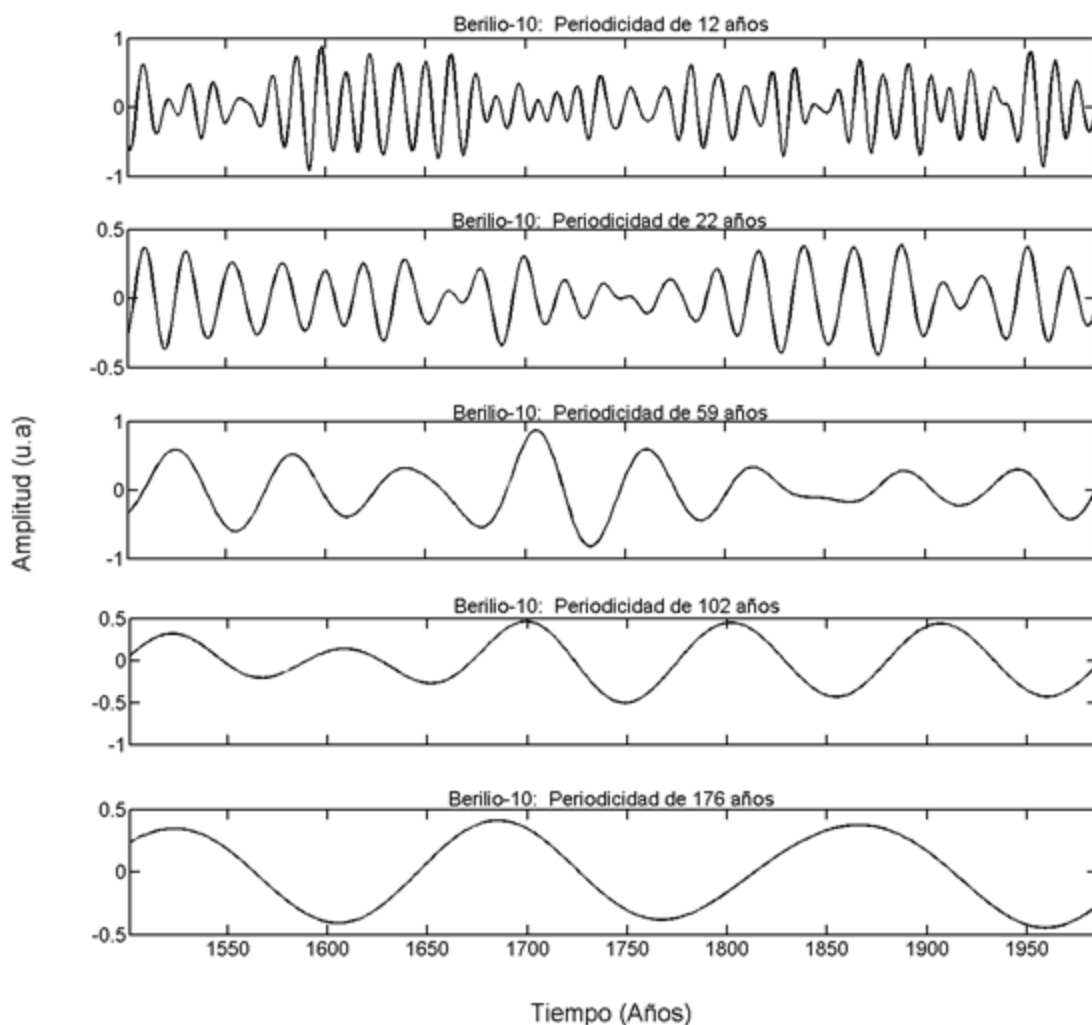


Figura 57 Principales periodicidades de la serie de tiempo del Berilio 10.

Las componentes principales de la serie de tiempo de la Berilio 10 se presentan en la figura 57. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 12, 22, 58.9, 102 y 176 años. Las periodicidades de 12, 22 y 58.9 años son las periodicidades más significativas.

En la figura 58 se muestran las componentes principales de la serie de tiempo de la GMS. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 10.4, 28, 57, 105 y 198 años. La periodicidad de 10.4 años es la periodicidad más significativa.

Las componentes principales de la serie de tiempo de la TSI se presentan en la figura 59. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 11, 20, 38, 66, 128 y 176 años. La periodicidad de 11 años es la periodicidad más significativa.

En la figura 60 se muestran las componentes principales de la serie de tiempo de la RC. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 11 y 181 años. La periodicidad de 11 años es la periodicidad más significativa.

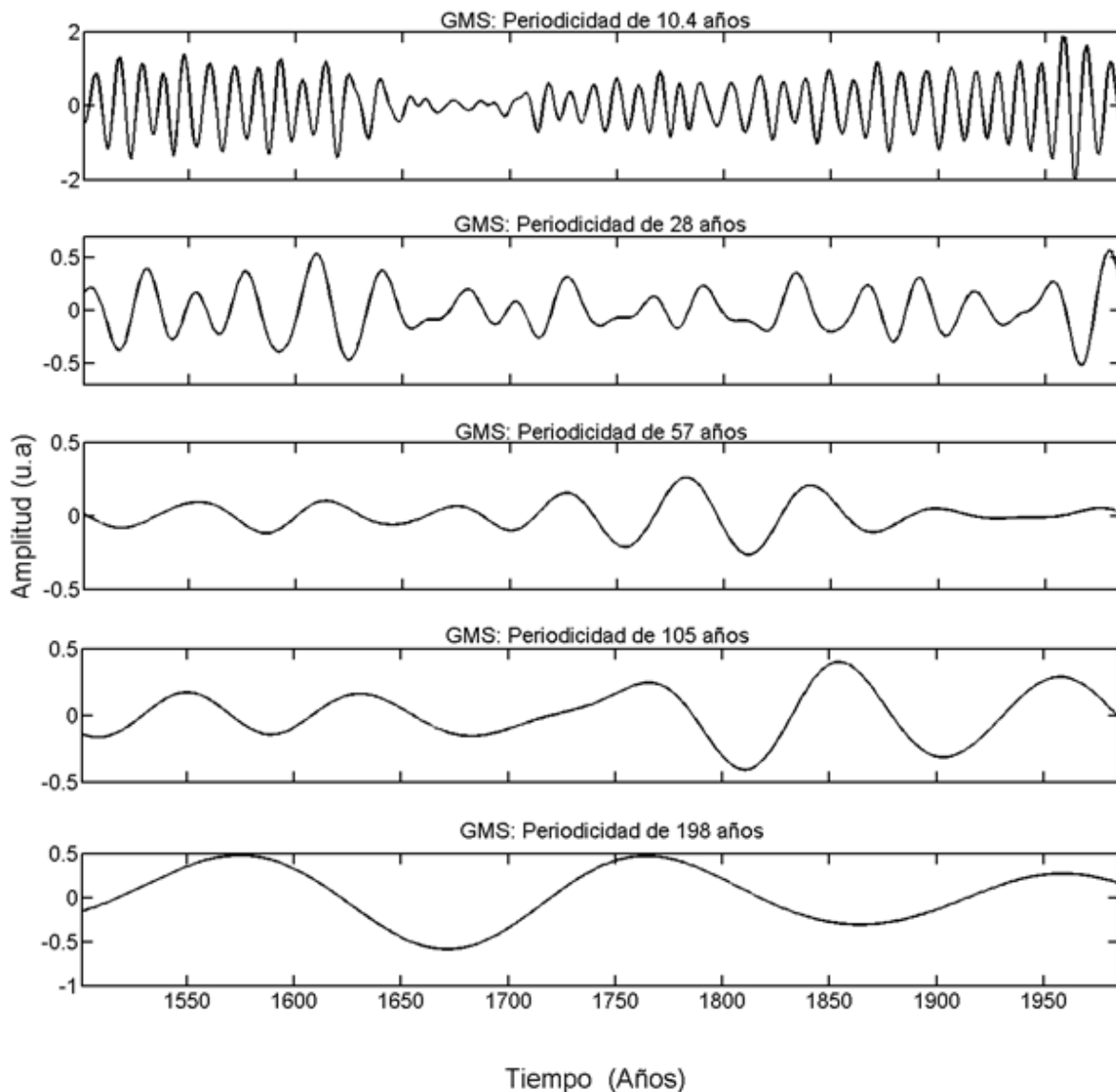


Figura 58 Principales periodicidades de la serie de tiempo del Grupo de Manchas Solares (GMS).

Las componentes principales de la serie de tiempo del Baricentro (Longitud) se presentan en la figura 61. La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 5.6, 11.5, 29, 85 y 170 años. Las periodicidades de 5.6 y 11.5 años son las periodicidades más significativas.

En la figura 62 se muestran las componentes principales de la serie de tiempo del Baricentro (Distancia) La serie está compuesta principalmente por periodicidades de 13, 19.6, 35 y 170 años. Las periodicidades de 13 y 19.6 años son las periodicidades más significativas.

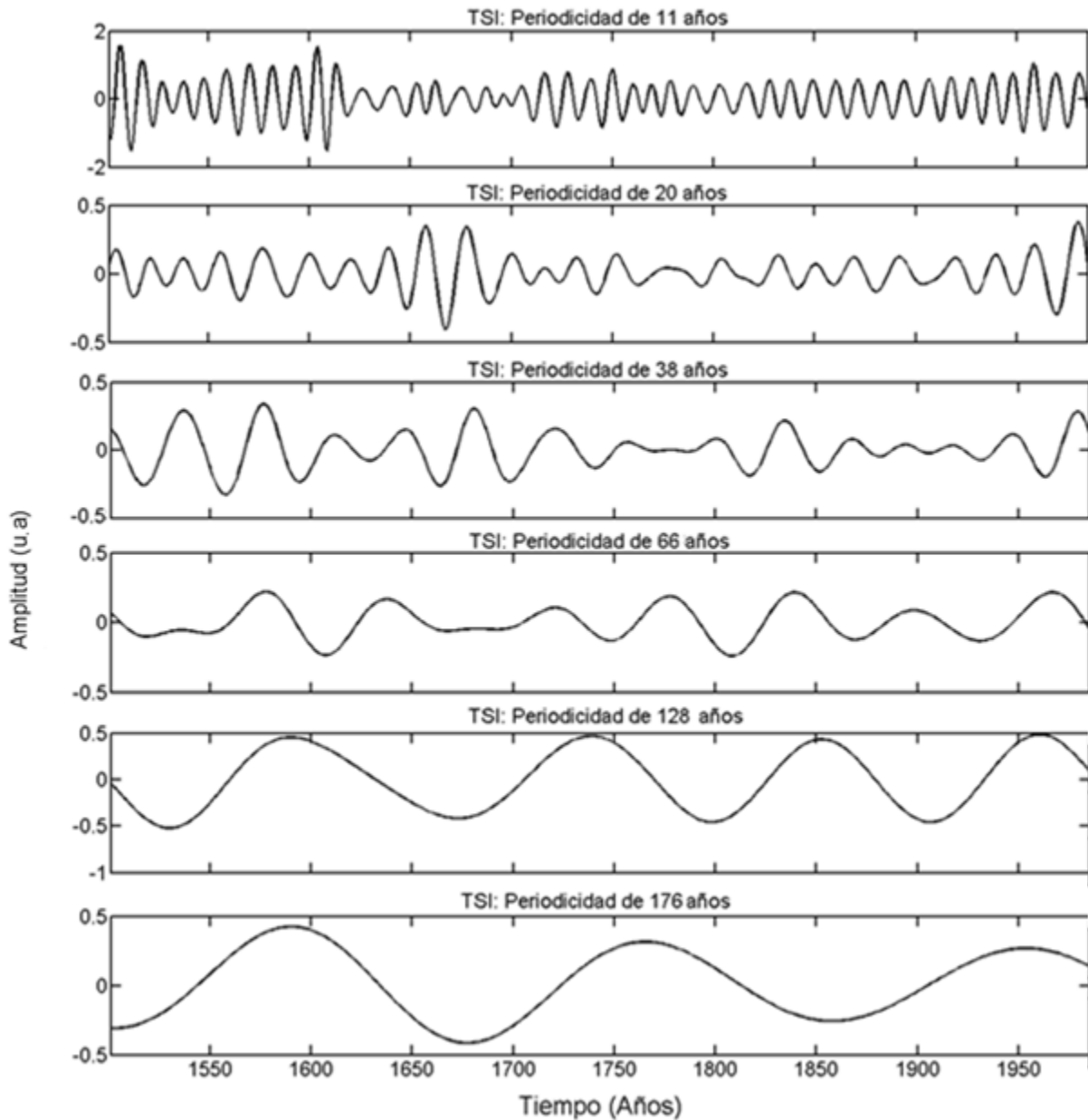


Figura 59 Principales periodicidades de la serie de tiempo de la Irradiancia Solar Total (TSI).

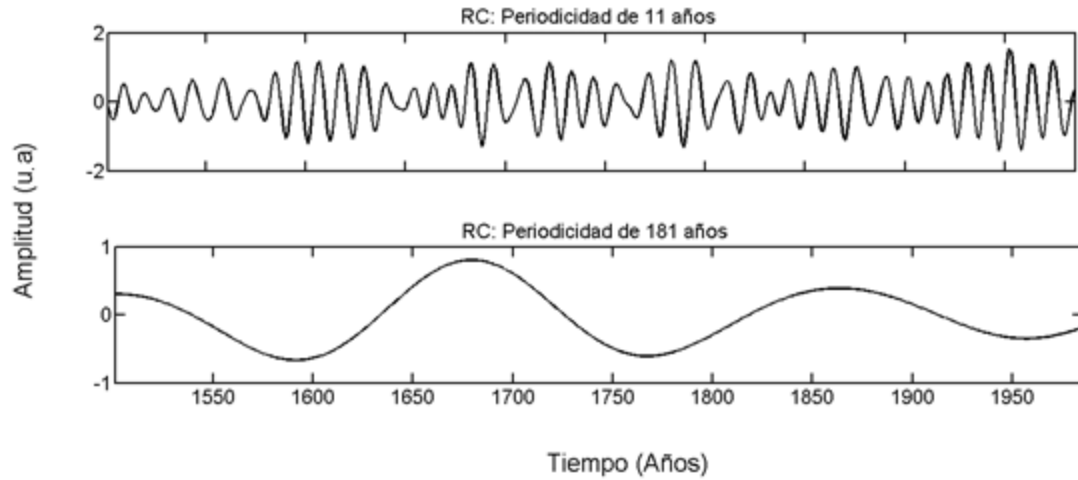


Figura 60 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los rayos cósmicos (RC).

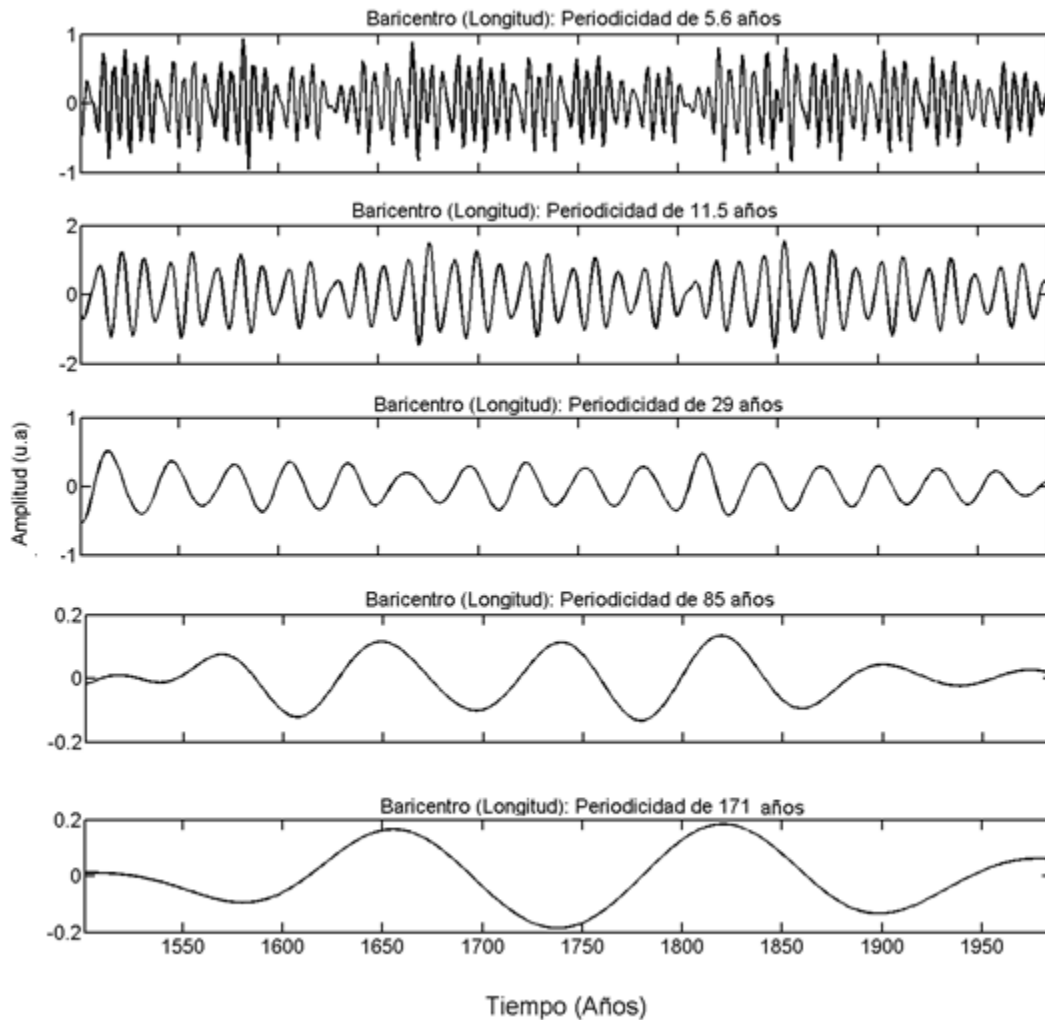


Figura 61 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los Baricentro (Longitud).

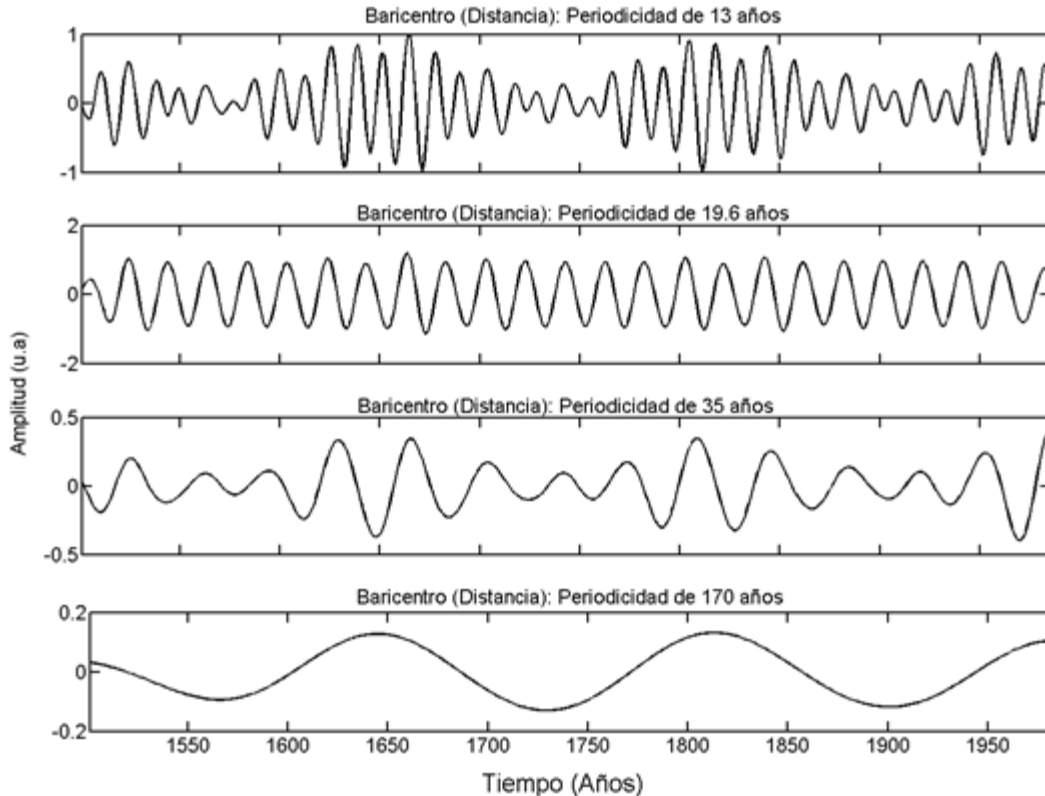


Figura 62 Principales periodicidades de la serie de tiempo de los Baricentro (Distancia).

Los resultados anteriores muestran que las componentes de periodos pequeños de las series de tiempo presentan cambios de amplitud. Algunos autores han propuesto que la variabilidad solar es un modulador del clima. En este trabajo se realizó la desmodulación de amplitud de las componentes decadales de cada una de las serie de tiempo.

Las figuras 63a y 64a muestran las periodicidades de 7.5 y 12.7 años del IWSIB y su desmodulación (figs. 63b y 64b). La periodicidad de 7.5 años esta modulada por una señal compuesta por periodicidades de 59, 118 y 177 años (fig. 63c). La periodicidad de 12.7 años se encuentra modulada por una señal compuesta por periodicidades de 50, 124 y 209 años (fig. 64c).

Las periodicidades de 8 y 12 años de la temperatura de invierno se muestran en las figuras 65a y 66a, estas señales fueron desmoduladas y la señal desmodulada normalizada se muestra en las figuras 65b y 66b. La periodicidad de 8 años esta modulada por una señal compuesta por periodicidades de 48, 108 y 160 años (fig. 65c). La periodicidad de 12 años se encuentra modulada por una señal compuesta por periodicidades de 70 y 124 años (fig. 66c).

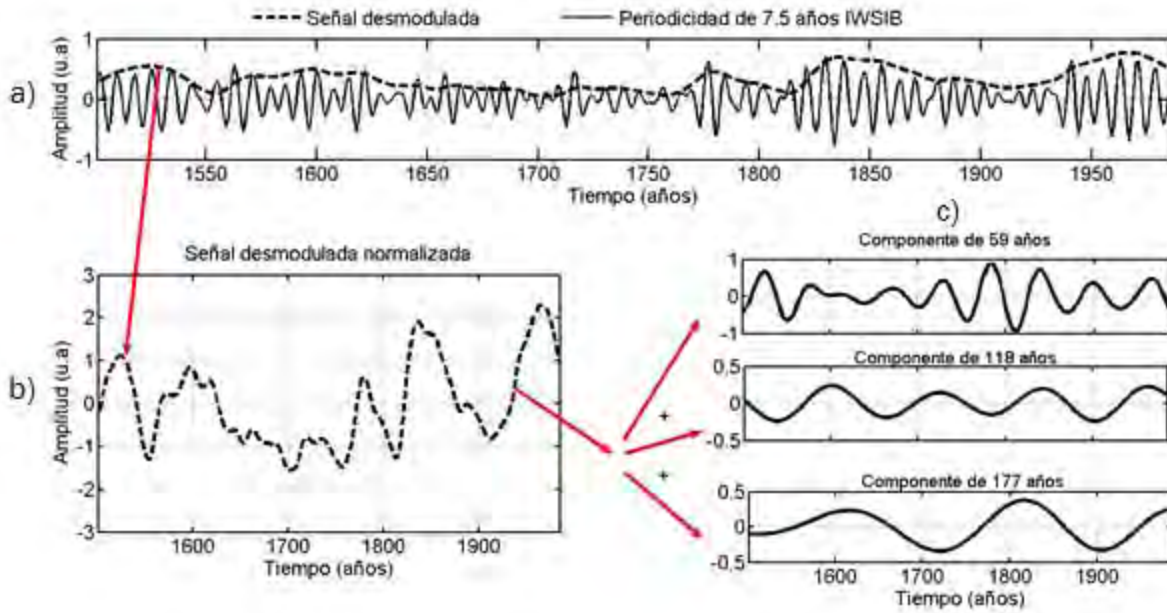


Figura 63 Desmodulación de la periodicidad de 7.5 años del IWSIB.

a) La Periodicidades de 7.5 años del IWSIB y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

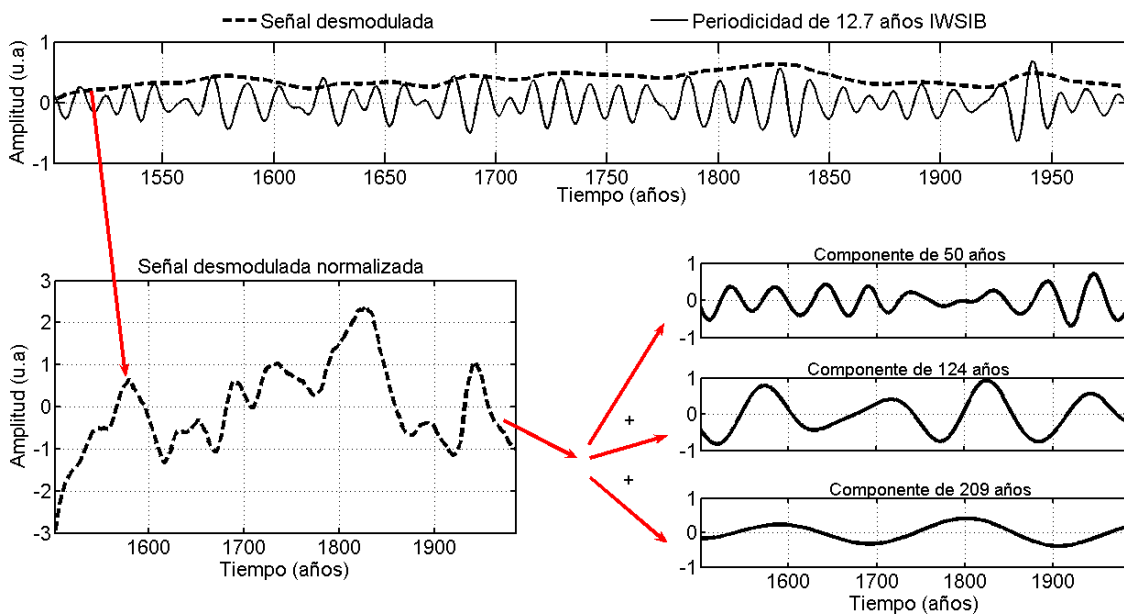


Figura 64 Desmodulación de la periodicidad de 12.7 años del IWSIB.

a) La Periodicidades de 12.7 años del IWSIB y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

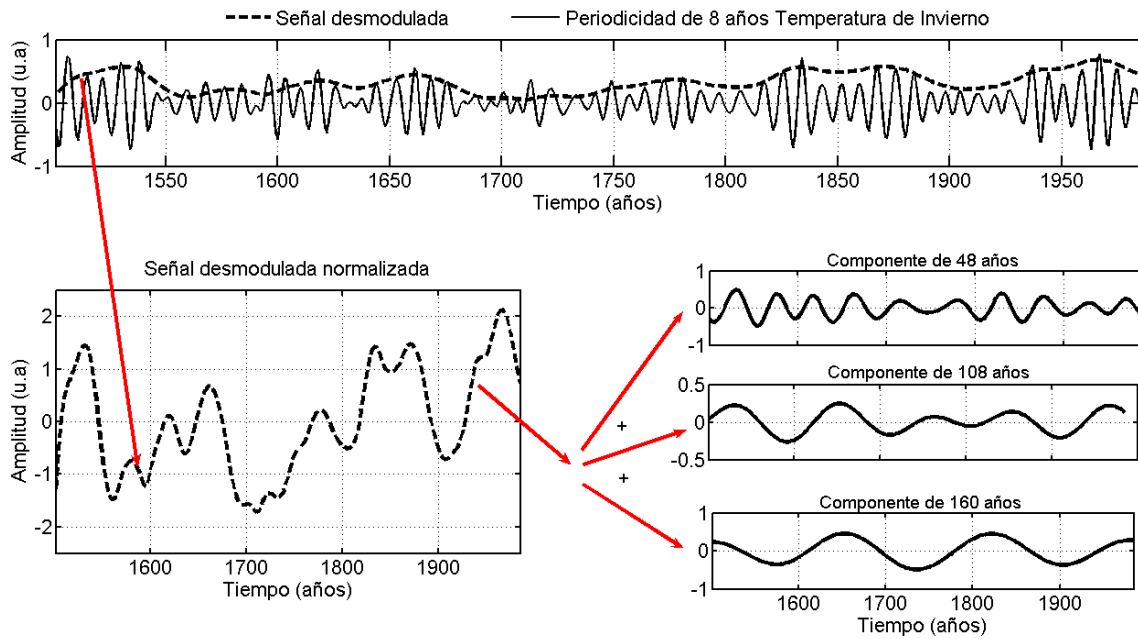


Figura 65 Desmodulación de la periodicidad de 8 años de la Temperatura de Invierno.

- a) La Periodicidades de 8 años de la Temperatura de Invierno y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

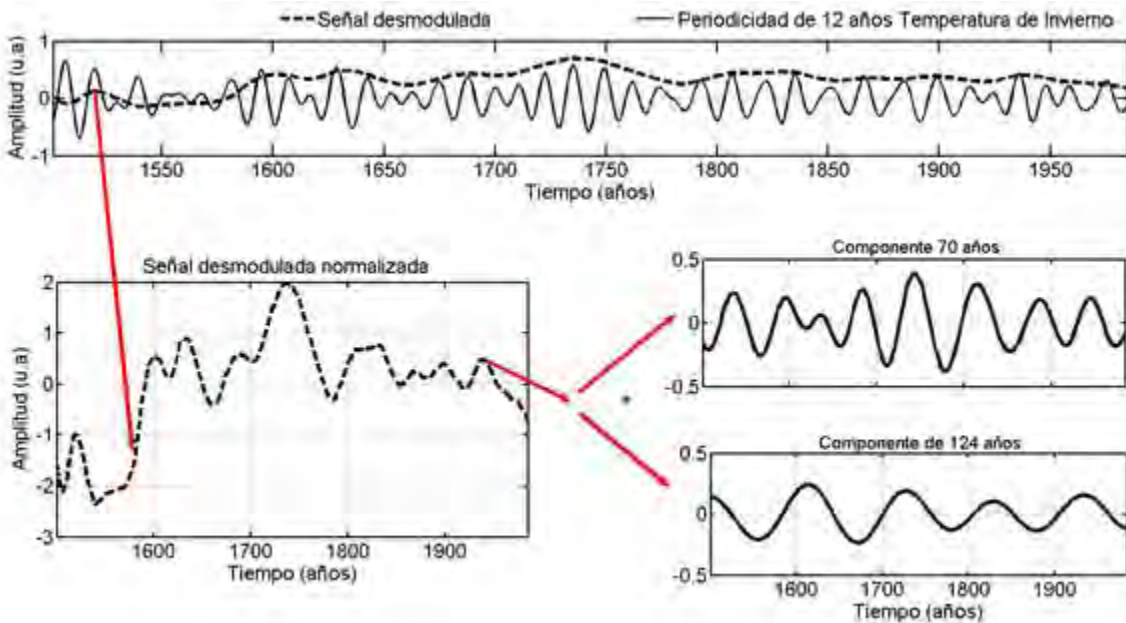


Figura 66 Desmodulación de la periodicidad de 12 años de la Temperatura de Invierno.

- a) La Periodicidades de 12 años de la Temperatura de Invierno y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

Las figuras 67a y 68a muestran las periodicidades de 8.2 y 14.7 años de la Precipitación de Invierno y su desmodulación (figs. 67b y 68b). La periodicidad de 8.2 años esta modulada por una señal compuesta por periodicidades de 86 y 140 años (fig. 67c). La periodicidad de 14.7 años se encuentra modulada por una señal compuesta por periodicidades de 68, 124 y 203 años (fig. 68c).

La periodicidad de 12 años del Be-10 se muestra en las figuras 69a, esta señal fue desmodulada y la señal desmodulada normalizada se muestra en las figuras 69b. La periodicidad de 12 años esta modulada por una señal compuesta por periodicidades de 72 y 187 años (fig. 69c).

La figura 70a presenta la periodicidad de 10.4 años del GMS, esta señal fue desmodulada y la señal desmodulada normalizada se muestra en las figuras 70b. La periodicidad de 10.4 años esta modulada por una señal compuesta por periodicidades de 111 y 187 años (fig. 70c).

La periodicidad de 11 años del TSI se presenta en la figura 71a. Esta periodicidad fue desmodulada y la señal desmodulada normalizada se presenta en la figura 71b. La señal obtenida de la desmodulación está compuesta por periodicidades de 76 y 181 años (fig. 71c).

En la figura 72a se presenta la periodicidad de 11 años de los RC, esta señal fue desmodulada (fig. 72b). La señal obtenida de la desmodulación está compuesta por periodicidades de 80, 124, 171 y 272 años (fig. 72c).

La periodicidad de 11.5 años del Baricentro (Longitud) se presenta en la figura 73a. Esta señal fue desmodulada y la señal desmodulada se muestra en la figura 73b. La señal obtenida de la desmodulación está compuesta por periodicidades de 96 y 157 años (fig. 73c).

La figura 74a muestra la periodicidad de 13 años del Baricentro (Distancia), esta periodicidad fue desmodulada (fig. 74b). Esta señal obtenida de la desmodulación está compuesta principalmente modulada por la periodicidad de 176 años (fig. 75c).

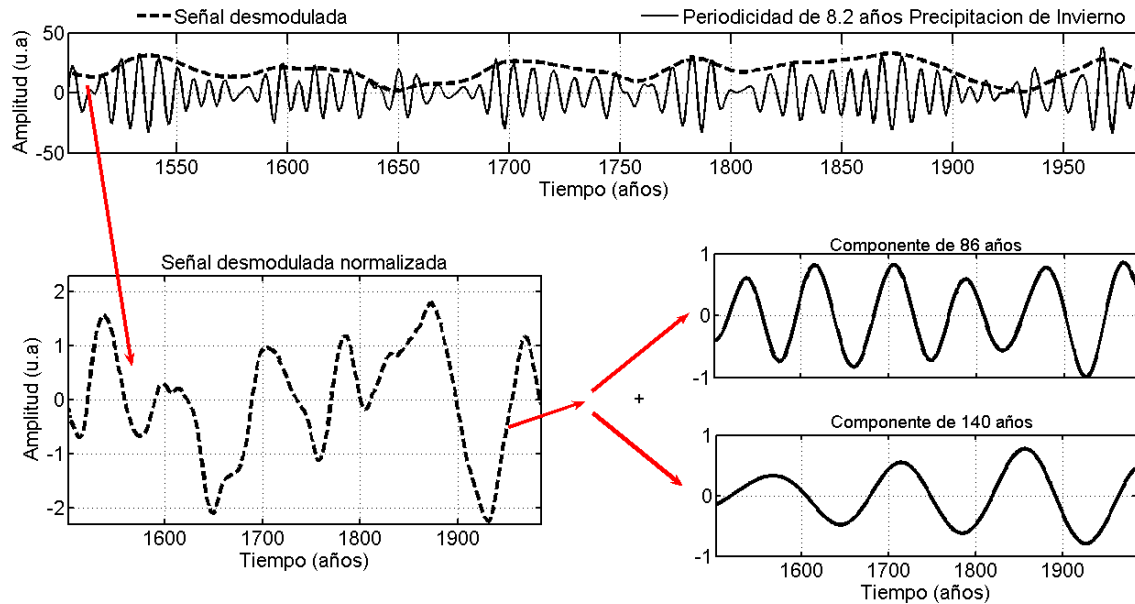


Figura 67 Desmodulación de la periodicidad de 8.2 años de la Precipitación de Invierno.

a) La Periodicidades de 8.2 años de la Precipitación de Invierno y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

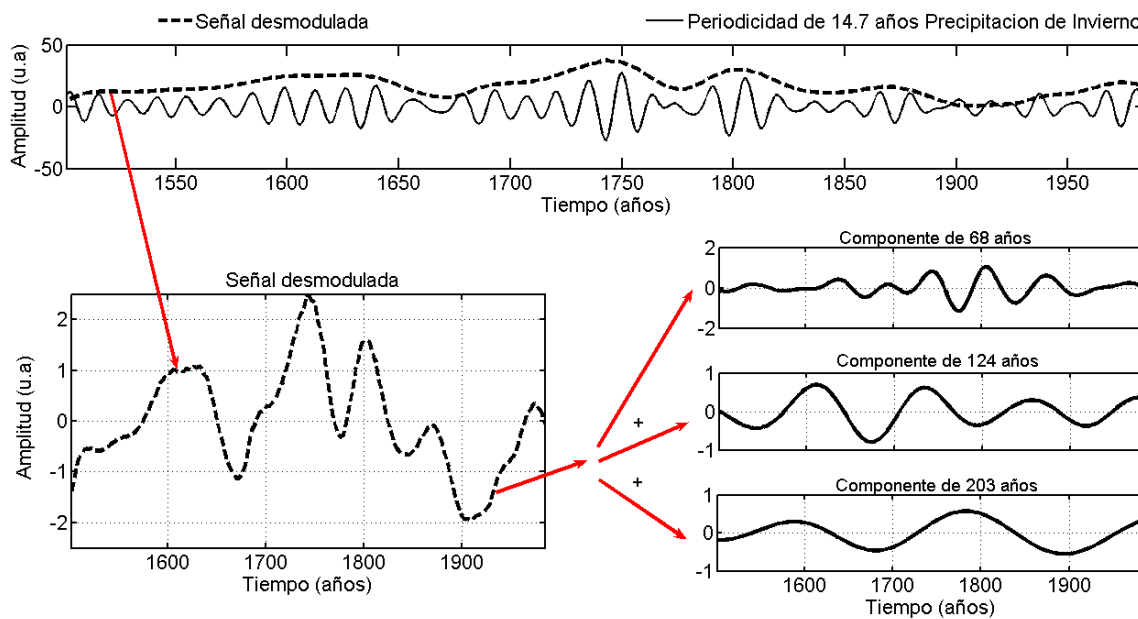


Figura 68 Desmodulación de la periodicidad de 14.7 años de la Precipitación de Invierno.

a) La Periodicidades de 14.7 años de la Precipitación de Invierno y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

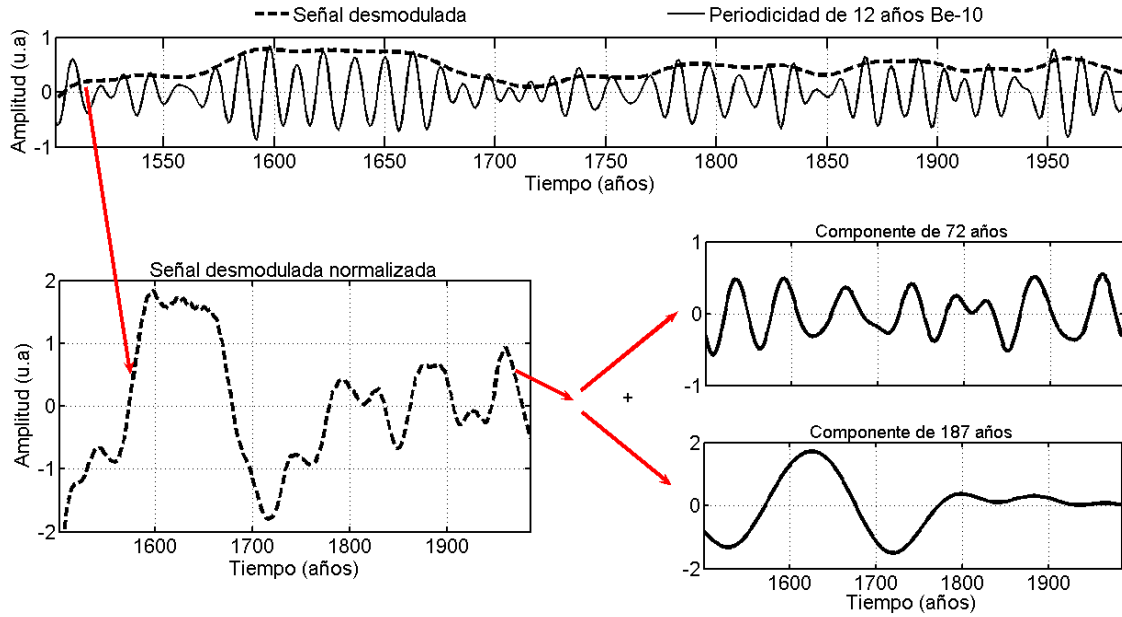


Figura 69 Desmodulación de la periodicidad de 12 años de Be-10.

a) La Periodicidades de 12 años del Be-10 y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

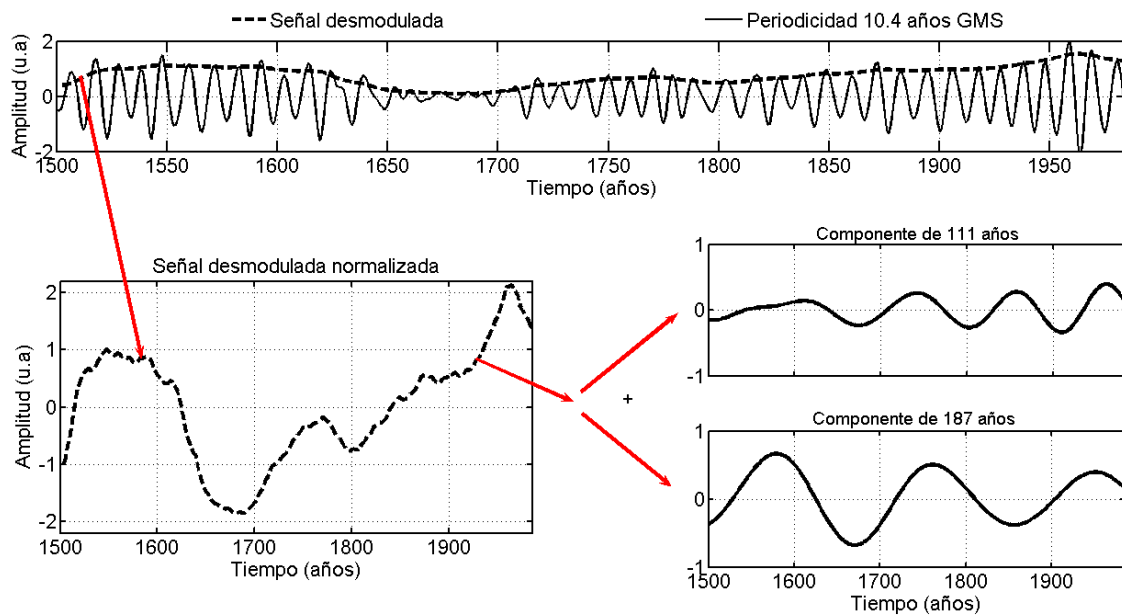


Figura 70. Desmodulación de la periodicidad de 10.4 años de GMS.

a) La Periodicidades de 10.4 años del GMS y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

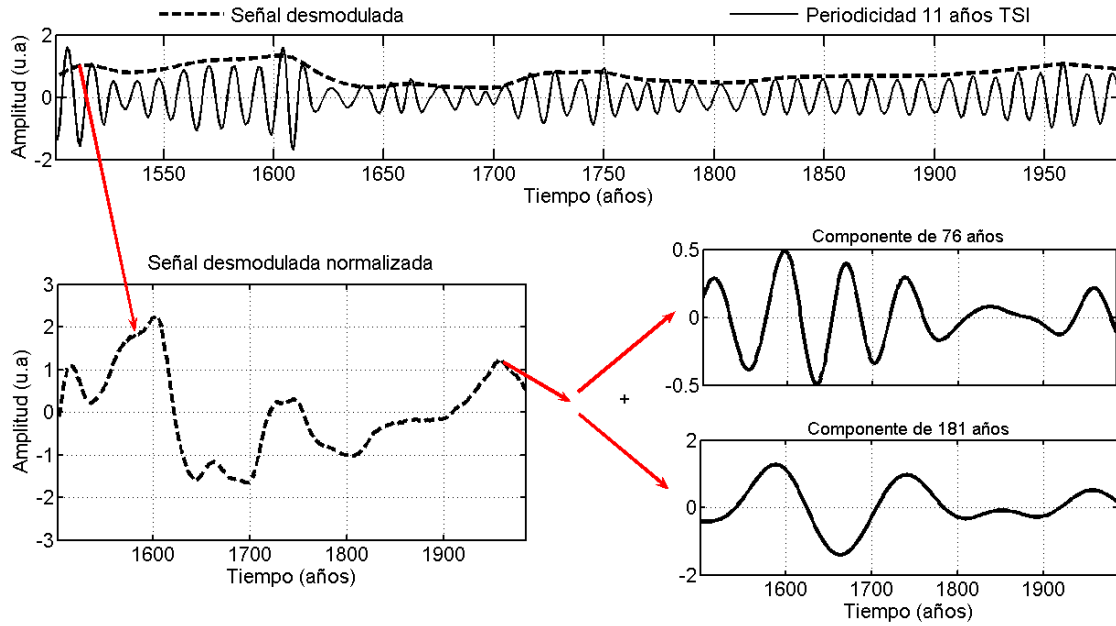


Figura 71 Desmodulación de la periodicidad de 11 años de TSI.

a) La Periodicidades de 11 años de la TSI y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

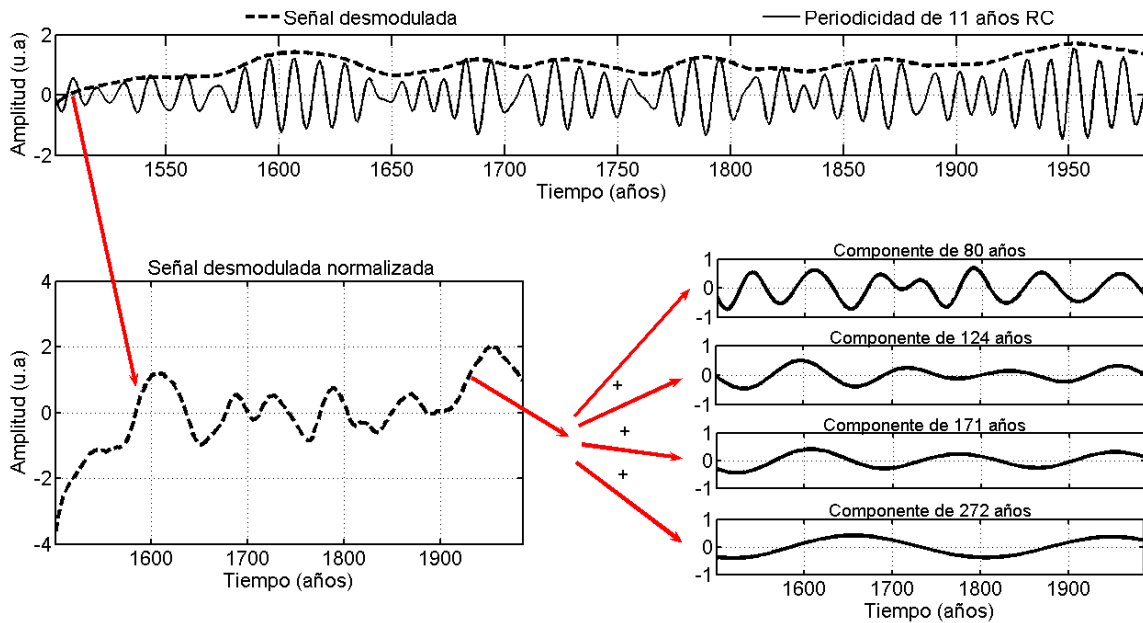


Figura 72 Desmodulación de la periodicidad de 11 años de RC.

a) La Periodicidades de 11 años de los RC y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

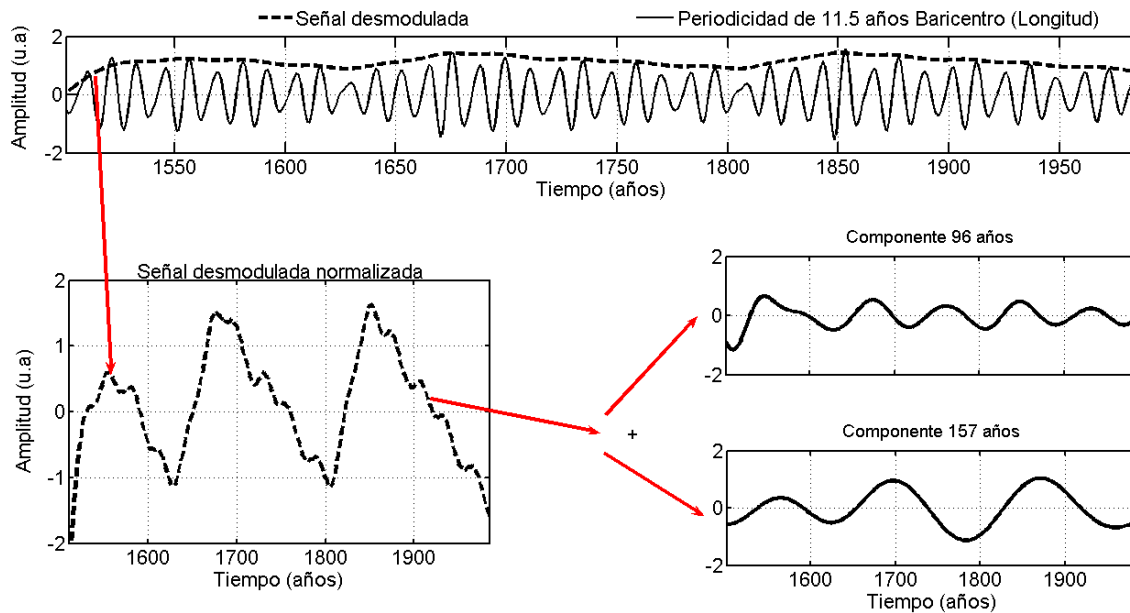


Figura 73 Desmodulación de la periodicidad de 11.5 años de Baricentro (Longitud). a) La Periodicidades de 11.5 años del Baricentro (Longitud) y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

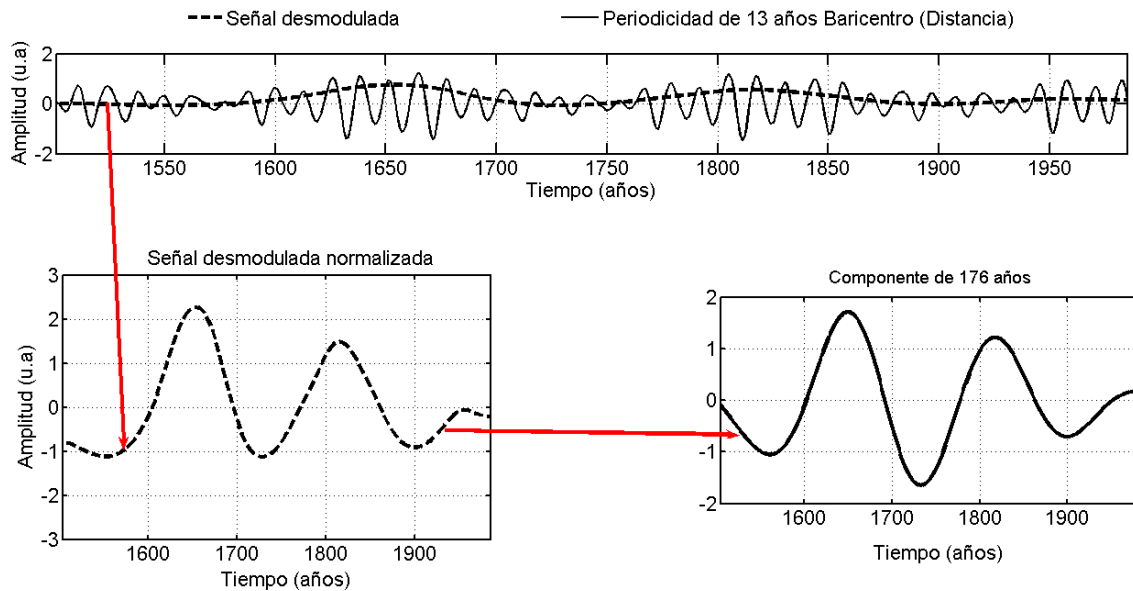


Figura 74 Desmodulación de la periodicidad de 11.5 años de Baricentro (Distancia).

a) La Periodicidades de 11.5 años del Baricentro (Longitud) y su envolvente (señal desmodulada, línea punteada). b) Señal desmodulada normalizada. c) Componentes de la señal desmodulada.

Las señales desmoduladas están compuestas por diferentes periodicidades. En la tabla 6 se muestran las componentes principales de cada señal desmodulada.

Tabla 6 Componentes principales de cada una de las señales desmoduladas.

Serie tiempo	Periodicidades (Años)	Componentes de la señal desmodulada (Años)
IWSIB	7.5	59
		118
		177
	12.7	50
		124
		209
Temperatura de Invierno	8	48
		108
		160
	12	70
		124
Precipitación de Invierno	8.2	86
		140
	14.7	68
		124
		203
Be-10	12	72
		187
GMS	10.4	111
		187
TSI	11	76
		187
RC	11	80
		124
		171
		272
Baricentro (Longitud)	11.5	96
		157
Baricentro (Distancia)	13	176

Las componentes seculares presentes en las periodicidades decadales de las series de tiempo climáticas han sido asociadas a los fenómenos solares. De lo anterior podemos suponer que las periodicidades seculares obtenidas de la desmodulación pueden estar relacionadas con la periodicidad secular de la actividad solar. En este trabajo realizamos el análisis para cuantificar esta relación utilizando el índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase (CFCI). Para cuantificar la relación de estas señales calculamos el CFCI entre la periodicidad secular de: Be-10, GMS, y TSI y las componentes seculares de las señales desmoduladas. La

periodicidad secular del Be-10 (102 años), GMS (105) y TSI (128) y su fase se muestran en la figura 75. En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos del análisis.

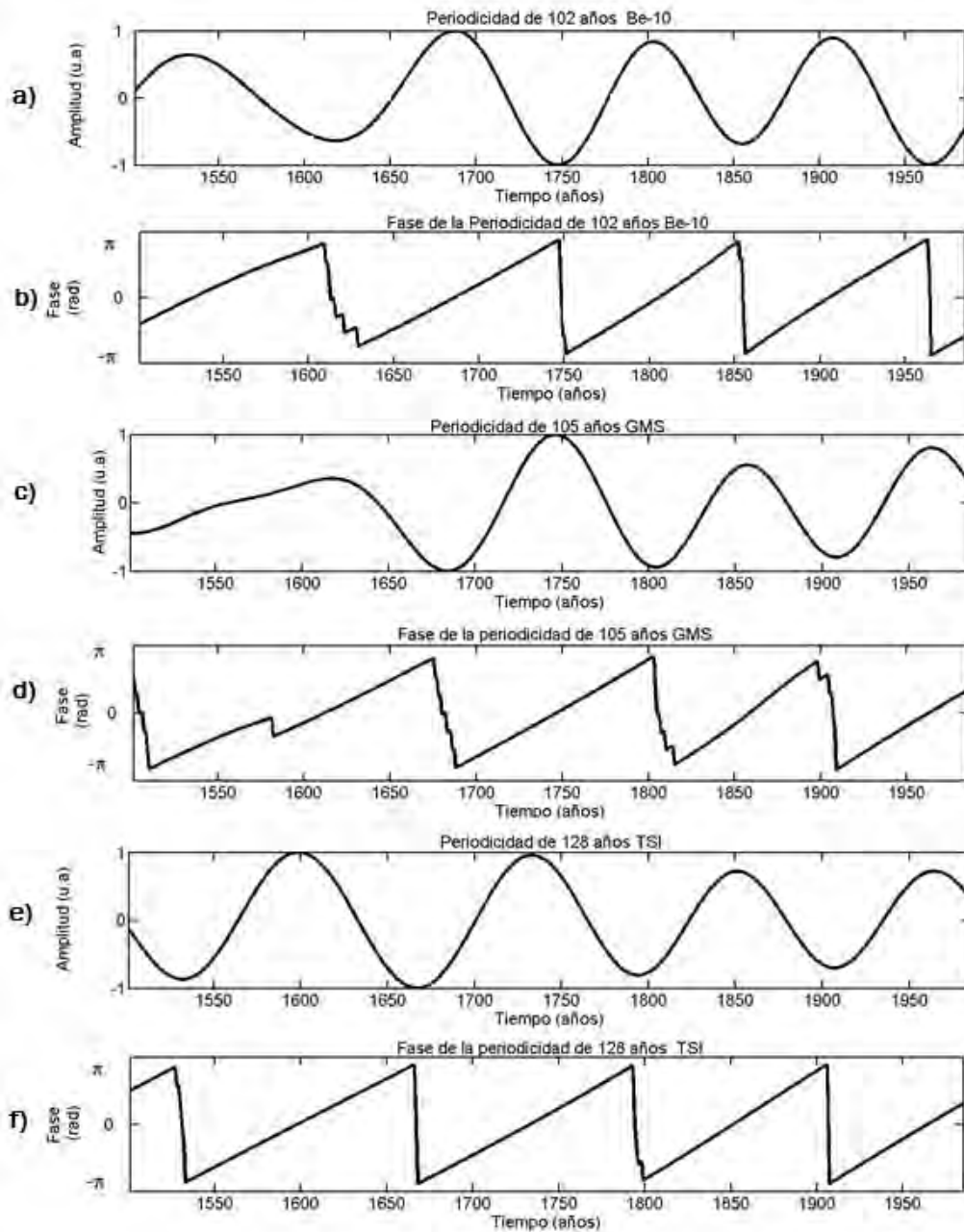


Figura 75 Grafica de las periodicidades seculares y las fases para el Be-10, GMS y TSI.

a) Periodicidad secular del Be-10 (102 años), b) Fase de la periodicidad secular del Be-10, c) Periodicidad secular del GMS (105 años), d) Fase de la periodicidad secular del GMS, e) Periodicidad secular del TSI (128 años) y f) Fase de la periodicidad secular del TSI.

Series de tiempo	Periodicidades (Años)	Componentes de la señal desmodulada (Años)	CFCI		
			Be-10 (102 años)	GMS (105 años)	TSI (128 años)
IWSIB	7.5	118	0.41	0.45	0.46
	12.7	124	0.33	0.34	0.37
Temperatura de Invierno	8	108	0.20	0.17	0.18
	12	124	0.48	0.52	0.53
Precipitación de Invierno	8.2	86	0.14	0.20	0.20
	14.7	124	0.35	0.42	0.40

Tabla 7 Resultados del cálculo de índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase entre las series climáticas y la periodicidad secular del Be-10, GMS y la TSI.

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que la periodicidad de 7.5 años del IWSIB está fuertemente modulada (CFCI > 0.35) por la periodicidad secular de la actividad solar (Be-10, GMS y TSI). La periodicidad de 12.7 años del IWSIB está fuertemente modulada por la TSI (CFCI= 0.37) y moderadamente modulada por el Be-10 (CFCI=0.33) y el GMS (CFCI=0.34).

El CFCI calculado muestran que la periodicidad de 8 años de la Temperatura de Invierno está débilmente modulada (CFCI < 0.2) por la periodicidad secular de la actividad solar (Be-10, GMS y TSI). La periodicidad de 12 años de la Temperatura de Invierno está fuertemente modulada por el Be-10 (CFCI= 0.48) y sobre-modulada por la TSI (CFCI=0.53) y el GMS (CFCI=0.52).

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que la periodicidad de 8.2 años de la Precipitación de Invierno está débilmente modulada (CFCI < 0.2) por la periodicidad secular de la actividad solar (Be-10, GMS y TSI). La periodicidad de 14.7 años de la Precipitación de Invierno está fuertemente modulada por el Be-10 (CFCI=0.35), el GMS (CFCI=0.42) y la TSI (CFCI= 0.40).

Las componentes entre 150 - 250 años presentes en las periodicidades decadales de las series de tiempo climáticas han sido asociadas a los fenómenos solares y al movimiento del sol alrededor del centro de masa del sistema solar (baricentro). Realizamos el análisis para cuantificar esta relación utilizando el índice de acoplamiento de frecuencias cruzadas CFCI. La periodicidad de 187 años del Be-10, del GMS y del TSI, y sus respectivas fases se muestran en la figura 76. La periodicidad de 171 años del RC, la periodicidad de 157 años del Baricentro (Longitud) y la periodicidad de 176 años del Baricentro (Distancia) y sus respectivas fases se muestran en la figura 77. Los resultados obtenidos del cálculo del CFCI se muestran en la tabla 8.

Series de tiempo	Periodicidades (Años)	Componentes de la señal desmodulada (Años)	CFCI					
			Be-10 (187 años)	GMS (187 años)	TSI (187 años)	RC (171 años)	Bar. (Long) (157 años)	Bar. (Dist.) (176 años)
IWSIB	7.5	177	0.50	0.50	0.35	0.34	0.43	0.40
	12.7	209	0.36	0.27	0.24	0.42	0.45	0.32
Temperatura de Invierno	8	160	0.26	0.27	0.25	0.22	0.50	0.49
Precipitación de Invierno	8.2	140	0.38	0.30	0.29	0.36	0.04	0.32
	14.7	203	0.43	0.62	0.59	0.37	0.46	0.41

Tabla 8 Resultados del cálculo del índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fas entre las series climáticas y la periodicidad de ~180 años de los factores externos.

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que la periodicidad de 7.5 años del IWSIB está fuertemente modulada (CFCI > 0.35) por la periodicidad de ~180 años presente en el Be-10, GMS, TSI, RC, Baricentro (Longitud) y Baricentro (Distancia). La periodicidad de 12.7 años del IWSIB está fuertemente modulada por la periodicidad de ~180 años presente en el Be-10 (CFCI=0.36), en los RC (CFCI=0.42) y en el Baricentro (Longitud) (CFCI=0.45). La periodicidad de 12.7 años del IWSIB está moderadamente modulada por la periodicidad de ~180 años presente en el GMS (CFCI=0.27), en la TSI (CFCI=0.24) y en el Baricentro (Distancia) (CFCI=0.32).

El CFCI calculado muestran que la periodicidad de 8 años de la Temperatura de Invierno está moderadamente modulada (CFCI > 0.2) por la periodicidad de ~180 del Be-10, GMS y TSI; y fuertemente modulada por la periodicidad de ~180 del Baricentro (Longitud) (CFCI= 0.5) y Baricentro (Distancia) (CFCI= 0.49).

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que la periodicidad de 8.2 años de la Precipitación de Invierno está moderadamente modulada por la periodicidad de ~180 presente en el GMS (CFCI=0.3), en la TSI (CFCI=0.29) y en el Baricentro (Distancia) (CFCI=0.32); y fuertemente modulada por la periodicidad de ~180 presente en Be-10 (CFCI=0.38) y en los RC (CFCI=0.36). La periodicidad de 14.7 años de la Precipitación de Invierno está fuertemente modulada por la periodicidad de ~180 presente en el Be-10 (CFCI=0.43), los RC (CFCI=0.37), Baricentro (Longitud) (CFCI= 0.46) y Baricentro (Distancia) (CFCI= 0.41); y sobre-modulada por la periodicidad de ~180 presente en el GMS (CFCI=0.62) y la TSI (CFCI=0.59)

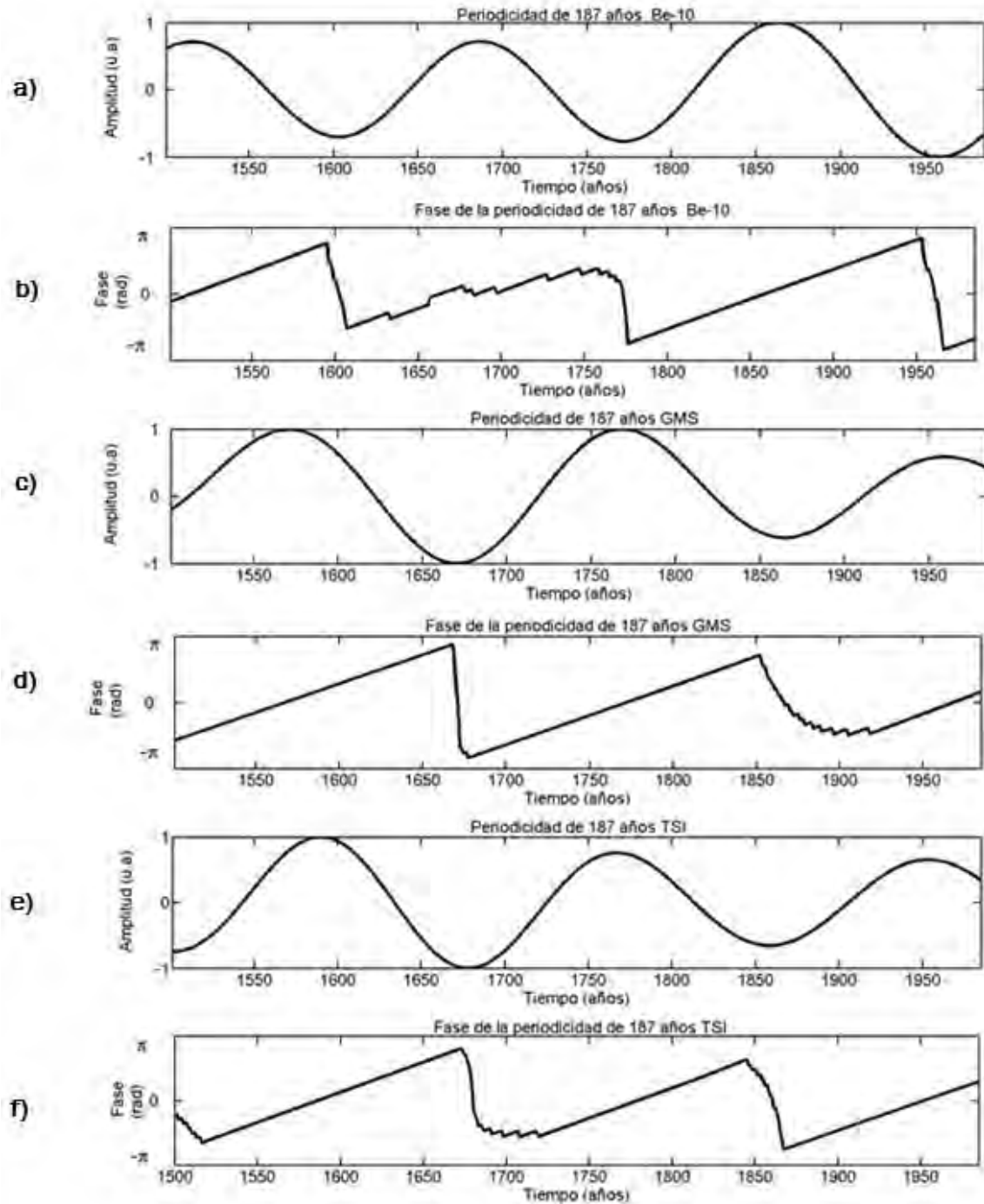


Figura 76 Grafica de las periodicidades de 187 años y las fases para el Be-10, GMS y TSI.

a) Periodicidad de 187 años del Be-10, b) Fase de la periodicidad de 187 años del Be-10, c) Periodicidad de 187 años del GMS, d) Fase de la periodicidad de 187 años del GMS, e) Periodicidad de 187 años del TSI (128 años) y f) Fase de la periodicidad de 187 años del TSI.

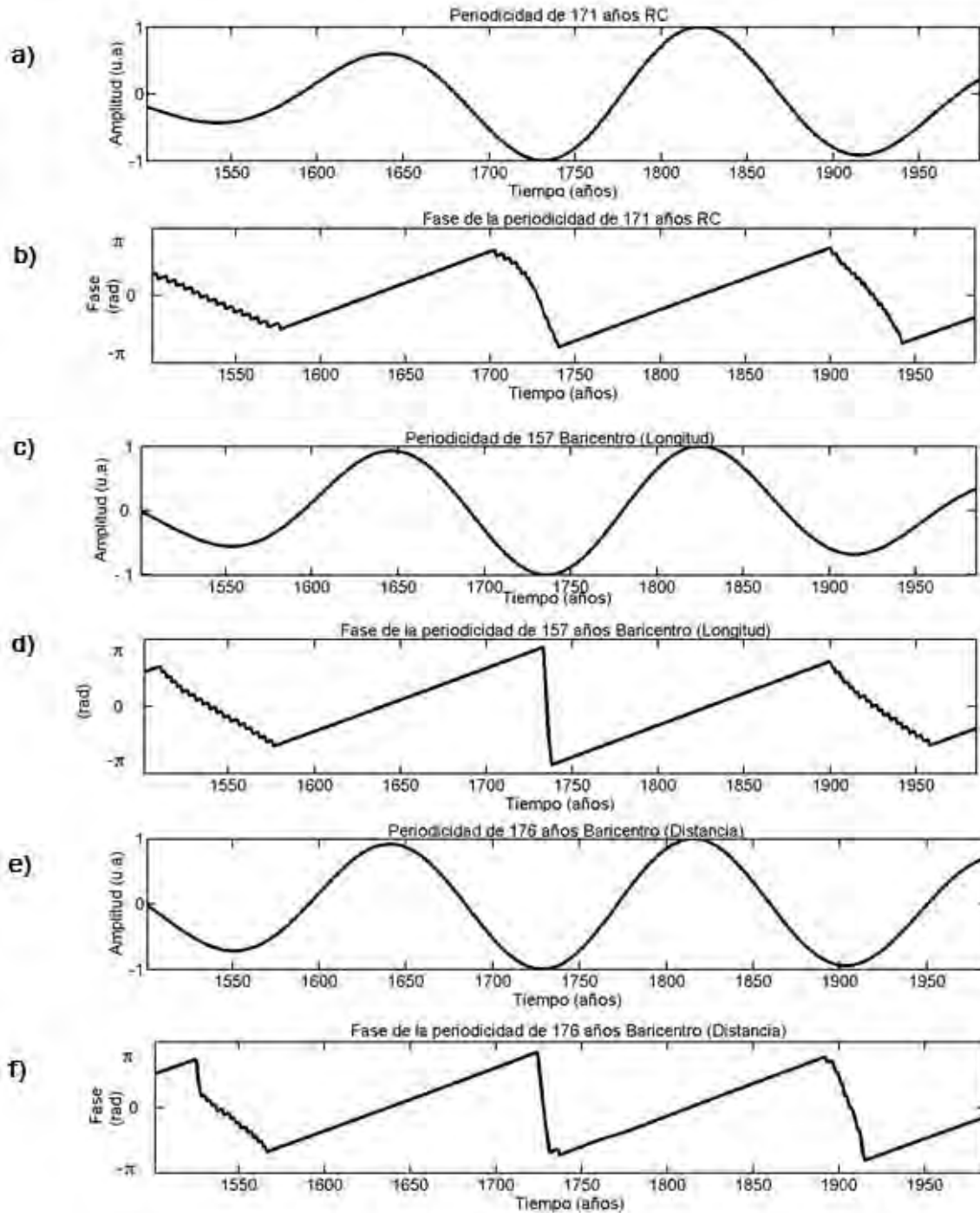


Figura 77 Grafica de las periodicidades de ~ 170 años y las fases para el RC, Baricentro (Longitud) y Baricentro (Distancia).

a) Periodicidad de 171 años de los RC, b) Fase de la periodicidad de 171 años de los RC, c) Periodicidad de 157 años del Baricentro (Longitud), d) Fase de la periodicidad de 157 años de Baricentro (Longitud), e) Periodicidad de 176 años del Baricentro (Distancia) y f) Fase de la periodicidad de 176 años del Baricentro (Distancia).

El movimiento del sol alrededor del centro de masa del sistema solar (baricentro) ha sido propuesto como un causante de la variabilidad solar suponiendo que la periodicidad de 179 años del baricentro modula la amplitud de la periodicidad de 11 años del ciclo de manchas solares. En la Tabla 9 se presentan los resultados obtenidos del cálculo del CFCI.

Series de tiempo	Periodicidades (Años)	Componentes de la señal desmodulada (Años)	CFCI	
			Bar. (Long) (157 años)	Bar. (Dist.) (176 años)
Be-10	12	187	0.48	0.48
GMS	10.4	187	0.14	0.17
TSI	11	187	0.19	0.25
RC	11	171	0.11	0.13

Tabla 9 Resultados del cálculo del índice de acoplamiento de frecuencia cruzada de Amplitud-Fase entre la periodicidad decadal de las series de Be-10, GMS y la TSI y la periodicidad de 180 años del Baricentro (Longitud y Distancia).

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que la periodicidad de 11 años del Be-10 está fuertemente modulada por la periodicidad de ~180 presente en el Baricentro (Longitud) (CFCI=0.48) y en el Baricentro (Distancia) (CFCI=0.48).

Los resultados del cálculo del CFCI muestran que las periodicidades de 10.4 años GMS, la de 11 años de la TSI y la de 11 años de los RC están débilmente moduladas por la periodicidad de ~180 presente en el Baricentro (Longitud) y en el Baricentro (Distancia) (CFCI < 0.2).

Capítulo 8. Conclusiones

En este trabajo de investigación se cumplieron con los objetivos planteados ya que se estudiaron algunos forzamientos radiativos externos e internos que nos permite estudiar la variabilidad climática durante la Pequeña Edad de Hielo.

En particular se desarrolló una nueva metodología para estudiar acoplamiento de frecuencias cruzadas capaz de detectar y cuantificar la intensidad de acoplamiento en señales con variaciones en frecuencia, con baja relación señal a ruido y con sobre modulación. La metodología desarrollada está basada en la utilización de la transformada wavelet que nos permite extraer las principales características de las series de tiempo.

La metodología propuesta fue aplicada para analizar series de tiempo climáticas y solares en la zona del Báltico. Estudiamos cada una de las series de tiempo extrayendo sus principales características. Los resultados del análisis muestra que el Índice de la Severidad de Hielo en Invierno está compuesto por las periodicidades de 3, 7.5, 12.7, 29.4, 50, 96 y 187 años. La temperatura de invierno está formado por periodicidades de 2.5, 5, 8, 12.3, 62, 121 y 242 años. La Precipitación de Invierno está compuesta por periodicidades de 5, 8.2, 14.7, 18.5, 36, 62 y 148 años. La serie de tiempo del Be-10 está compuesta por periodicidades de 12, 22, 58.9, 102 y 176 años. La serie de tiempo del Grupo de Manchas Solares está compuesta por periodicidades de 10.4, 28, 57, 105 y 198 años. La Irradiancia Solar Total presenta periodicidades de 11, 20, 38, 66, 128 y 176 años. La serie de tiempo de los Rayos Cósmicos está compuesta por periodicidades de 11 y 181 años. La serie de tiempo de la distancia del Sola al baricentro está formada por periodicidades de 13, 19.6, 35 y 170 años. La longitud del Sol al baricentro está compuesta por periodicidades de 5.6, 11.5, 29, 55 y 170 años.

Utilizamos el wavelet de coherencia para verificar la existencia de características comunes entre las series de tiempo. También calculamos el índice de acoplamiento cruzado entre diferentes frecuencias de las series de tiempo, el cual se basa en la desmodulación coherente de series de tiempo.

Los resultados obtenidos muestran que las series de tiempo climáticas están fuertemente moduladas por la actividad solar y que también están moderadamente moduladas por el movimiento del Sol alrededor del sistema Solar.

Lo anterior muestra que tanto la actividad solar y el movimiento del baricentro afectan la variabilidad climática razón por la cual nosotros recomendamos que estos factores deben de ser considerados en los modelos climáticos con la finalidad de obtener reconstrucciones y/o predicciones de clima más exactas.

Los resultados obtenidos de nuestro trabajo de investigación fueron publicados en el Journal of Atmospheric and Solar –Terrestrial Physics (Apéndice B).

Durante nuestro trabajo de investigación participamos en los siguientes congresos: 12th Scientific Assembly International Association of Geomagnetism and Aeronomy 2013, 38th COSPAR Scientific Assembly 2010, 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences ICIAS 2010, Congreso Estudiantil Posgrado de Ingeniería Eléctrica 2010. Congreso Estudiantil Posgrado de Ingeniería Eléctrica 2009, Unión Geofísica Mexicana 2009 (Apéndice C).

Bibliografía

- Alanko-Huotari, K., et al., 2006. Global heliospheric parameters and cosmic ray modulation: an empirical relation for the last decades. *Solar Physics*, 238, 391-404.
- BALTEX, 2006a. BALTEX Phase II, 2003–2012. Science Framework and Implementation Strategy. International BALTEX Secretariat Publication, Vol. 34, 92 pp.
- BALTEX, 2006b. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin–The BACC Project. International BALTEX Secretariat Publication, Vol. 35, 26 pp.
- Bard, E., et al., 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides, *Tellus B*, Vol. 52 (3), 985-992
- Beer, J., 2000. Long term indirect indices of solar variability. *Space Sci. Rev.* 94, 53-66.
- Beer, J. et al. 1990. Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Nature* 347, 164–166
- Beer, J., et al., 1994. ^{10}Be as an indicator of solar variability and climate. *The Solar Engine and Its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate*, E. Nesme-Ribes, Ed., Springer-Verlag, 221-233
- Berggren, A.-M., et al., 2009. A 600-year annual ^{10}Be record from the NGRIP ice core, Greenland, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11801, doi: 10.1029/2009GL038004.)
- Blasius, B. y Stone, L., 2000. Chaos and phase synchronization in ecological systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 10 (10), 2361–2380
- Box-Jenkins, 1976. *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. Holden-day.
- Broecker, W.S., 1991. The great ocean conveyor. *Oceanography*, 4(2): p. 79-89
- Brown, E.W., 1900. A possible explanation of the sun-spot period. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 60, 599–606.
- Cabrera Carranzam Carlos Francisco, 2006., Estimación de la Irradiancia Solar Total Extraterrestre en función del Número de Manchas Solares ", *Revista Tecnica* , Volumen 10- 2
- Camuffo, D., 1987. Freezing of the Venetian Lagoon since the 9th century A.D. in comparison to the climate of western Europe and England. *Clim Change* 10:43–66
- Canolty, R., et al., 2006. High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex. *Science*, 313, 1626-1628

Catchpole, A.J.W., Hanuta, I., 1989. Severe summer ice in Hudson Strait and Hudson Bay following major volcanic eruption, 1751–1889 A.D. *Clim Change* 14:61–79

Charvátová, I., 1988. The solar motion and the variability of solar activity. *Advances Space Research*, 8(7), 147-150

Charvátová, I. y Střeštík, J., 2004. Periodicities between 6 and 16 years in surface air temperature in possible relation to solar inertial motion, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66(3-4), 219-227

Chatfield, C., 1989: *The Analysis of Time Series: An Introduction*. 4th Ed. Chapman and Hall, 241 pp.

Chattopadhyay, D., 2006. *Electronics (fundamentals And Applications)*, seventh ed. New Age International, ISBN 81-224-1780-9

Cohen, M. X., 2008. Assessing transient cross-frequency coupling in EEG data, *Journal of Neuroscience Methods*, 168(2), 494-499

Cohen, T. J., and Lintz, P.R., 1974. Long term periodicities in the sunspot cycle. *Nature*, 250, 398-400

Common, M. y Stagl, S., 2008. *Introducción a la Economía Ecológica.*, Editorial Reverté, Barcelona

Cryer, J.D., y Chan, K., 2008. *Time series analysis: with applications in R* Springer, 491 pages

D' Antoni, H., 2008. *Arqueoecología sistémica y caótica*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, ISBN 978-84-00-08629-9

Daubechies, I., 1990. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 36: 961-1005.

Demiralp, T., et al., 2007. Gamma amplitudes are coupled to theta phase in human EEG during visual perception. *International Journal of Psychophysiology*, 64(1), 24-30

Dickey, D.A. and Fuller, W.A., 1981. "Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root", *Econometrica*, 49, 1057-1072

Eddy, J.A. 1976. The Maunder Minimum. *Science* 192, 1189 (1976).

Eriksson, C., et al., 2007. Characterizing the European sub-arctic winter climate since 1500 using ice, temperature and circulation time series. *Journal of Climate*, 20, 5316-5334

- Esper, J., Cook, E.R., and Schweingruber, F.H., 2002. Low-frequency signals in long tree-ring chronologies for reconstructing past temperature variability. *Science*. 295:2250–2253.
- Farge, M., 1992. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 24, 395–457.
- Frank DC, et. Al., 2010. Ensemble reconstruction constraints on the global carbon cycle sensitivity to climate. *Nature* 463(7280):527–530. doi:10.1038/nature08769
- Gabor, D., 1946. Theory of communication. *J. Inst. Electr. Eng.*, 93: 429-459.
- Gandía, S., y Meliá, J., 1991. La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura. Universitat de València, pags. 410
- Girjatowicz, J., Kozuchowski, M., 1995. Contemporary changes of Baltic Sea ice. *Geogr Pol* 65:43–50
- Gilman, D.L., Fuglister, F.J., Mitchel Jr., J.M., 1963. On the power spectrum of red noise. *Journal of the Atmospheric Sciences* 20 (2), 182–184
- Graybill, D. A. and Funkhouser, G. S., 1999. Dendroclimatic reconstructions during the past millennium in the Southern Sierra Nevada and Owens Valley, California', in Rose, M. R. and Wigand, P.E. (eds), *Proceedings of the Southern California Climate Symposium*, Technical Report No. 11, Natural History Museum of Los Angeles County, pp. 239–269.
- Grinsted, A., et al., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Process Geophysics*, 11, 561–566
- Glaser, R., 1997. On the course of temperature in central Europe since the year 1000 AD, *Historical Social Research*, 22, 59 – 87.
- Glaser, R., 2001. *Klimageschichte Mitteleuropa. 1000 Jahre Wetter, Klima, Katastrophen*, Darmstadt: Primus Verlag.
- Glaser, R., et al., 1999. Seasonal temperature and precipitation fluctuations in selected parts of Europe during the sixteenth century, *Climatic Change*, 43, 169 –200.
- Goodison, B., et. al, 2007. State and fate of the polar cryosphere, including variability of the Arctic hydrological cycle. *WMO Bulletin, Wether, climate, water*. Vol. 56(4)
- Graumlich, L. J., 1993. 'A 1000-year record of temperature and precipitation in the Sierra Nevada', *Quater. Res.* 39, 249–255.

Hansson, D. y Omstedt, A., 2007. Modelling the Baltic Sea ocean climate on centennial time scale; temperature and sea ice, European Geophysical Union General Assembly, April 15-20, Vienna, Austria.

Haapala, J. and Lepparanta, M., 1997. The Baltic Sea ice season in changing climate. *Boreal Environment Research*, 2, 93-108

Hegerl G.C., et. Al., 2006. Climate sensitivity constrained by temperature reconstructions over the past seven centuries. *Nature* 440(7087):1029–1032. doi: 10.1038/nature04679

Helcom, 2007a. Climate change in the Baltic Sea area. HELCOM Thematic Assessment 2007. *Baltic Sea Environment Proceedings*, Vol. 3, 49 pp.

Helcom, 2007b. HELCOM Baltic Sea Action Plan. Baltic Marine Environment Protection Commission, Helsinki Commission, 103 pp.

Heuveldop, J., et al., 1986. *Agroclimatología Tropical*, ed. Euned. San José, Costa Rica. 394 pag.

Hewitt, Paul G., 2007. *Física Conceptual*. 10^a edición, Prentice Hall, México, ISBN9789702607953

Hoyt, Douglas V. and Shatten, Kenneth H., 1997. *The Role of the Sun in Climate Change*. Oxford University Press.

Huddart, D., y Stott, T., 2010. *Earth Environments: Past, Present and Future*. John Wiley&Sons. p. 853.

IPCC, 2007. The physical science basis. Contribution of working group i, (ed) *Climate change 2007*, Vol. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.

IPCC, 1997 - R.T.Watson, M.C.Zinyowera, R.H.Moss (Eds) Cambridge University Press, UK. Pp. 517.

Jaani, A., et al., 1999. Long-term fluctuations of the ice cover of the Baltic Sea. *Geografijos Metrastis*, 32, 39–45

Jenkins, G. M., y Watts, D. G., 1968: *Spectral Analysis and Its Applications*. Holden-Day, 525 pp.

Jevrejeva, S., 2001. Severity of winter seasons in the northern Baltic Sea between 1529 and 1990: reconstruction and analysis. *Clim Res* 17:55–62

- Jevrejeva, S., Moore, J.C., y Grinsted, A., 2007. ENSO signal propagation detected by MC-SSA and phase-aware teleconnections, *Nonlinear Dynamics in Geosciences*, A. Tsonis & J.B. Elsner (Eds.), Springer. doi:10.1007/978-0-387-34918-3_10, 167-175.
- Jevrejeva, S., et.al., 2004. Oceanic and atmospheric transport of multiyear El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the polar regions. *Geophysical Research Letters*, 31, L24210
- Jones P, Mann M., 2004. Climate over past millennia. *Rev Geophys* 42:RG2002
- Jose, P. D., 1965. Sun's motion and sunspots. *Astronomical Journal* 70(3), 193-200.
- Juckes M., et. Al., 2007 Millennial temperature reconstruction intercomparison and evaluation. *Clim Past* 3(4):591–609
- Jurva, R., 1944. Über die Eisverhältnisse des Baltischen Meers an den Küsten Finnlands. *Merentutkimuslaitoksen Jlk./ Havsfordkningsinst Skr. nr. 114*, Helsinki
- Kenington, P.B., et al., 1990. Amplitude modulation and the first-order phase-locked loop. *IEEE Proceedings I*, 137(1), 17-24
- Knyazev, G. G., 2011. Cross-frequency coupling of brain oscillations: An impact of state anxiety. *International Journal of Psychophysiology*, 80 (3), 236-245
- Koslowski G, Loewe P., 1996. The Western Baltic Sea ice seasons in terms of mass-related severity index 1879–1992. *Tellus* 46A:66–74
- Koslowski, G., y Glaser, R., 1995. Reconstruction of the ice winter severity since 1701 in the western Baltic. *Climatic change*, 31(1), 79-98
- Koslowski, G., y Glaser, R., 1999. Variations in Reconstructed Ice Winter Severity in the Western Baltic from 1501 to 1995, and their Implications for the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change*, 41(2), 175–191
- Koslowski, G., y Schmelzer, N., 2011. Ice Winter Severity in the Western Baltic Sea in the Period 1301–1500. *International Journal of Climatology*, 31(7), 1094-1098
- Krivova, N.A., et al., 2003. Reconstruction of solar irradiance variations in cycle 23: Is solar surface magnetism the cause?, *ASTRON. ASTROPHYS. LETT.* 399, L1
- LaMarche, V. C. Jr., 1974. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records, *Science* 183, 1043– 1048.
- Lamb, H.H., 1977. *Climate, present, past and future*, Vol 2. *Climate history and the future*. Methuen & Co Ltd, London

Landscheidt, T., 1976. Beziehungen zwischen der Sonnenaktivität und dem Massenzentrum des Sonnensystems. *Nachr. D. Olbersgesellschaft Bremen* 100, 3-19.

Leal-Silva, M.C. and Velasco H., V.M. 2012. Solar forcing on the ice winter severity index in the western Baltic region. Vol. 89,98-109, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*

Leal Silva, María del Carmen. PLL óptico como sincronizador de portadora en sistemas homodinos. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. 1997

Lean, J.L., y Skumanich, A., 1992. White O.R., Estimating the sun's radiative output during the Maunder Minimum, *Geophys. Res. Lett.* 19, 1591

Lean, J.L., et al., 1995. On the solar ultraviolet spectral irradiance during the Maunder Minimum, *Global Biogeochemical Cycles* 9(2), 171

Lean, J.L., 2000. Evolution of the Sun's Spectral Irradiance since the Maunder Minimum, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2425-2428,

Lepy E., 2005. Influence of the Temperature on Ice Conditions in the Bay of Bothnia, Fifth Workshop on Baltic Sea Ice Climate, Hamburg, Germany

Liu, P. C., 1994. Wavelet spectrum analysis and ocean wind waves. *Wavelets in Geophysics*, E. Foufoula-Georgiou and P. Kumar, Eds., Academic Press, 151–166.

Loewe, P. y Koslowski, G., 1998. The Western Baltic Sea ice season in terms of a mass-related severity index 1879-1992, II Spectral characteristics and associations with NAO, QBO and solar cycle. *Tellus A*, 50(2), 219-241

Mann, M.E., et al., 1999. Northern Hemisphere Temperatures During the Past Millennium: Inferences, Uncertainties, and Limitations, *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 26, 759-762

Mann M.E., et.al., 2007. Robustness of proxy-based climate field reconstruction methods. *J Geophys Res* 112 (D12):D12109. doi:10.1029/2006JD008272

Martínez De Osés, F.J., 2004. *Meteorología Aplicada a la Navegación*, Univ. Politèc. de Catalunya, 222 pags.

Mendoza, B., 2006. *Monografías del IGF*, 8

Mikelsone, I., et al., 2008. Ice and weather conditions in the gulf of Riga, their impact on Riga Harbor winter navigation, 1996-2006. XXV Nordic Hydrological Conference, Nordic Association for hydrology, Reykjavik, Iceland, 1, 113-120

- Moberg A, et. al., 2005. Highly variable northern hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*. 433:613–617
- Mokhov, I.I., et al., 2011. Alternating mutual influence of El Niño/Southern Oscillation and Indian monsoon. *Geophysics Research Letters*, 38, L00F04
- Mokhov, I. I., y Smirnov, D. A., 2006, El Niño-Southern Oscillation drives North Atlantic Oscillation as revealed with nonlinear technique from climatic indices, *Geophys. Res. Lett.*, 33,L03708, doi:10.1029/2005GL024557.
- Moore, J. C., et al., 2007. Evidence from wavelet lag coherence for negligible solar forcing of climate at multi-year and decadal periods. In: Tsonis, Anastasios A.; Elsner, James B., (eds.) *Nonlinear dynamics in geosciences*. New York, Springer-Verlag, 457-464
- Morales, Olivares, Oscar G., 2009. Estudio del gradiente de intensidad de los rayos cósmicos galácticos en el máximo solar, tesis UNAM.
- Ocampo, Ríos, Brenda Grisset., 2009. Cambio climático y actividad solar en el Holoceno, tesis UNAM.
- Otaola, Javier, et al., 2000. *El Sol y la Tierra. Una relación tormentosa*. Fondo de Cultura Económica. La ciencia para todos. Segunda edición, ISBN: 968-16-5925-2.
- Pfister, C., 1988. *Klimageschichte der Schweiz 1525–1860*, 3rd edn, Bern: Verlag Paul Haupt.
- Pfister, et al., 1999. Documentary Evidence in Sixteenth Century Europe, *Climatic Change*, 1/43; 55-110.
- Ribes, J. C., y Nesme-Ribes, E., 1993. The solar sunspot cycle in the Maunder minimum AD1645 to AD1715 *Astron. Astrophys.* 276, 549
- Rennert, K. J. y Wallace, J. M., 2009. Cross-Frequency Coupling, Skewness, and Blocking in the Northern Hemisphere Winter Circulation. *Journal of Climate*, 22, 5650-5666
- Rudovic, L.F., 1930. Physical-geographical review of the Gulf of Finland, Gulf of Riga, Moodsound. Leningrad State University, Leningrad, p 47–62
- Schwabe, S.H., 1843, *Astronomische Nachrichten*, **20**, no. 495, 234-235
- Shapiro, R., and Ward, F., 1960. The time-space spectrum of the geostrophic meridional kinetic energy. *J. Meteor.*, 17, 621-626.

- Speerschneider, C.I.H., 1915. Om isforholdene in Danske farvande I aeldre og nyere tid aarene 690–1860. Publikationer fra det Danske Meteorologiske Institut. Meddelelser Nr 2. Kjobenhavn, 141
- Seinä, A., Palosuo, E., 1996. The classification of the máximum annual extent of ice cover in the Baltic Sea 1720–1995. Meri 27, Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, Helsinki, p 79–91
- Sheng, Y., 1996, “the Transforms Aplication Handbook” CRC PRESS
- Shumway, R.H., y Stoffer, D.S., 2000. Time series analysis and its applications. Springer, 2000, 549 pages
- Solanki, S. K., et al., 2000. Evolution of the Sun’s largescale magnetic field since the Maunder minimum, Nature, 408, 445 – 447
- Solanki, S. K., et al., 2002. Secular variations of the Sun’s magnetic field, Astron. Astrophys., 383, 706 – 712
- Sztobryn, M., 1994. Long term changes in ice conditions at the Polish coast of the Baltic Sea. Proc. IAHR Ice Symposium, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, p 345–354
- Tarand, A., 1993. The Tallinn time series of break-up as climate indicator. Tvärmnine, Finland 24–26 August 1993. Department of Geophysics, University of Helsinki. Rep Ser, Geophys 27
- Torrence, C., y Compo, G.P., 1998. A Practical Guide to Wavelet Analysis. Bulletin of the American Meteorological Society, 79, 61-78
- Torrence, C., y Webster, P.G., 1999. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon System. Journal of Climate, 12(8), 2679–2690
- Tort, A. B. L., et al., 2010. Measuring phase–amplitude coupling between neuronal oscillations of different frequencies. J. Neurophysiol. 104, 1195–1210
- Usoskin, I.G., et al., 2002. A physical reconstruction of cosmic ray intensity since 1610. Journal of Geophysical Research, Vol. 107, No. A11, 1374, doi: 10.1029/2002JA009343
- Usoskin, I.G., et al., 2005. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951-2004. J. Geophys. Res., 110(A12), A12108.
- Velasco, V.M., Mendoza B, Valdes-Galicia, J.F., 2008. The 120-yrs solar cycle of the Cosmogenic Isotopes. Paper SH.3.2 1263 Proc. 30th ICRC, 1 pp 553-556, 2008

Velasco, V.M., et al., 2013. Estimating Total Solar Irradiance from the Maunder Minimum to the 21st Century. *Astronomy and Astrophysics*. In press.

Ward, F., y Shapiro, R., 1961a. Meteorological periodicities, *J. Meteor.*, 18, 635-656.

Ward, F., y Shapiro, R., 1961b. Solar, geomagnetic, and Meteorological periodicities, *Ann, N.Y. Acad., Sci.*, 95, 200-224.

Ward, F., y Shapiro, R., 1962. Decomposition and comparison of time series of indices of solar activity. *J. geophys. Res.*, 67, 541-554.

Wei, Q., et al., 2007. Amplitude and phase coupling measures for feature extraction in an EEG based brain computer interface. *Journal of Neural Engineering*, 4(2), 120-129

Zúñiga López, I. y Crespo Del Arco, E., 2010. *Meteorología y climatología*. Editorial UNED. 2ª ed., ISBN(13): 9788436260823

Apéndice A

DATOS

Índice de la Severidad de Hielo en Invierno en el Báltico (IWSIB)
 (Extraídos de: [http:// www.hisklid.de/downloads](http://www.hisklid.de/downloads))

Tiempo (años)	IWSIB
1501	0.3
1502	0.5
1503	1
1504	1
1505	0
1506	0
1507	0
1508	2
1509	1
1510	0.1
1511	1
1512	1
1513	0.1
1514	2
1515	0
1516	0
1517	3
1518	0.3
1519	0.1
1520	0
1521	0
1522	0.3
1523	0
1524	0.1
1525	0.3
1526	0.3
1527	0.1
1528	0
1529	0
1530	0

Tiempo (años)	IWSIB
1531	0
1532	0
1533	1
1534	0.5
1535	0.1
1536	1
1537	0.1
1538	0.1
1539	0
1540	0
1541	0.5
1542	0
1543	1
1544	2
1545	0
1546	2
1547	0.1
1548	1
1549	0
1550	0.1
1551	0.1
1552	0
1553	0
1554	2
1555	0
1556	0
1557	2
1558	0
1559	0
1560	0

Tiempo (años)	IWSIB
1561	2
1562	0
1563	2
1564	0.3
1565	1
1566	0
1567	0
1568	0.1
1569	3
1570	0.1
1571	1
1572	1
1573	3
1574	0.3
1575	0
1576	0.3
1577	0
1578	0.5
1579	0
1580	0
1581	0.1
1582	0
1583	0.1
1584	0
1585	0
1586	2
1587	1
1588	0
1589	0
1590	0.5

Tiempo (años)	IWSIB
1591	0.3
1592	0.1
1593	1
1594	0
1595	2
1596	0
1597	0
1598	0
1599	2
1600	2
1601	2
1602	0
1603	1
1604	0.5
1605	0.1
1606	0.3
1607	0
1608	3
1609	0
1610	0.1
1611	0.1
1612	0.5
1613	0
1614	0.3
1615	1
1616	0.5
1617	0
1618	0.1
1619	0
1620	2

Tiempo (años)	IWSIB
1621	2
1622	2
1623	0.3
1624	2
1625	0
1626	0.1
1627	2
1628	0
1629	0.3
1630	0
1631	0.3
1632	1
1633	0
1634	0.1
1635	2
1636	0.1
1637	0.5
1638	0.1
1639	0
1640	1
1641	0.1
1642	0
1643	0
1644	0.3
1645	0.3
1646	2
1647	0.1
1648	0
1649	0.1
1650	0

Tiempo (años)	IWSIB
1651	0.5
1652	0
1653	0
1654	0
1655	1
1656	0.1
1657	0
1658	3
1659	1
1660	1
1661	0
1662	0
1663	2
1664	0.1
1665	2
1666	0
1667	2
1668	0.1
1669	0
1670	3
1671	0
1672	0.5
1673	0
1674	2
1675	0
1676	0
1677	2
1678	0.3
1679	1
1680	0.3

Tiempo (años)	IWSIB
1681	2
1682	0
1683	0.3
1684	3
1685	0.5
1686	0
1687	0
1688	0.3
1689	0.1
1690	0
1691	1
1692	2
1693	0.1
1694	1
1695	3
1696	0
1697	2
1698	3
1699	0
1700	0.1
1701	1
1702	0.1
1703	0.3
1704	0.3
1705	1
1706	1
1707	0.1
1708	0
1709	3
1710	0.3

Tiempo (años)	IWSIB
1711	0
1712	0.1
1713	0.1
1714	0
1715	0.5
1716	2
1717	0.3
1718	1
1719	0
1720	0
1721	0.1
1722	0
1723	0
1724	0
1725	0
1726	0.5
1727	0
1728	0
1729	2
1730	0
1731	0.5
1732	0.1
1733	0
1734	0
1735	0
1736	0.1
1737	0
1738	0.1
1739	0
1740	3

Tiempo (años)	IWSIB
1741	0
1742	0.1
1743	0.1
1744	0.5
1745	0.3
1746	0.1
1747	0
1748	0.5
1749	0
1750	0
1751	0.5
1752	0.1
1753	0
1754	0.3
1755	2
1756	0
1757	1
1758	0.3
1759	0
1760	0.3
1761	0
1762	0
1763	2
1764	0
1765	1
1766	0.3
1767	1
1768	1
1769	0.1
1770	0.5

Tiempo (años)	IWSIB
1771	2
1772	0.1
1773	0
1774	0.3
1775	0.1
1776	2
1777	1
1778	0.5
1779	0
1780	0.1
1781	0
1782	0.3
1783	0.1
1784	3
1785	1
1786	0.5
1787	0.1
1788	0.5
1789	3
1790	0
1791	0
1792	1
1793	0.1
1794	0
1795	3
1796	0.1
1797	0
1798	0
1799	3
1800	3

Tiempo (años)	IWSIB
1801	0.1
1802	0.3
1803	1
1804	1
1805	2
1806	0
1807	0
1808	0.3
1809	2
1810	0.3
1811	1
1812	0.1
1813	0.5
1814	3
1815	0.3
1816	0.5
1817	0
1818	0
1819	0
1820	1
1821	0.5
1822	0
1823	2
1824	0
1825	0.1
1826	0.5
1827	1
1828	0.1
1829	2
1830	3

Tiempo (años)	IWSIB
1831	1
1832	0
1833	0
1834	0
1835	0
1836	0.1
1837	0.1
1838	3
1839	0.3
1840	0.1
1841	2
1842	0.1
1843	0
1844	0.5
1845	2
1846	0
1847	0.5
1848	1
1849	0.1
1850	0.3
1851	0
1852	0
1853	0.5
1854	0.5
1855	3
1856	0.5
1857	0.3
1858	1
1859	0
1860	0.3

Tiempo (años)	IWSIB
1861	0.5
1862	0.1
1863	0.1
1864	0.5
1865	2
1866	0
1867	0.1
1868	0.1
1869	0.1
1870	0.5
1871	2
1872	0
1873	0
1874	0
1875	0.3
1876	0.3
1877	0.1
1878	0
1879	0.5
1880	0.1
1881	2
1882	0
1883	0.1
1884	0
1885	0
1886	0.3
1887	0.1
1888	2
1889	0.5
1890	0

Tiempo (años)	IWSIB
1891	1
1892	0.3
1893	1
1894	0.1
1895	2
1896	0
1897	1
1898	0
1899	0
1900	0.3
1901	0.5
1902	0.1
1903	0.1
1904	0.1
1905	0.1
1906	0.1
1907	0.3
1908	0.1
1909	0.5
1910	0
1911	0
1912	0.5
1913	0.1
1914	0
1915	0.1
1916	0
1917	1
1918	0.1
1919	0.1
1920	0.1

Tiempo (años)	IWSIB
1921	0
1922	0.5
1923	0.1
1924	2
1925	0
1926	0.3
1927	0
1928	0.3
1929	2
1930	0
1931	0.1
1932	0
1933	0.1
1934	0
1935	0
1936	0
1937	0.1
1938	0
1939	0.1
1940	3
1941	2
1942	3
1943	0.1
1944	0
1945	0.3
1946	0
1947	3
1948	0
1949	0
1950	0.1

Tiempo (años)	IWSIB
1951	0.1
1952	0
1953	0.1
1954	0.5
1955	0.3
1956	1
1957	0
1958	0
1959	0
1960	0.1
1961	0
1962	0.1
1963	3
1964	0.1
1965	0.1
1966	0.3
1967	0
1968	0
1969	0.3
1970	2
1971	0.1
1972	0.3
1973	0
1974	0
1975	0
1976	0.1
1977	0.1
1978	0.1
1979	2
1980	0.3

Tiempo (años)	IWSIB
1981	0
1982	0.5
1983	0
1984	0
1985	2

Temperatura de Invierno en la Región del Báltico
(Extraídos de: [http:// www.hisklid.de/downloads](http://www.hisklid.de/downloads))

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1501	-0.05
1502	-3.31
1503	-2.66
1504	-1.35
1505	2.56
1506	3.21
1507	2.56
1508	-1.35
1509	-2
1510	-0.05
1511	-2.66
1512	-3.31
1513	-3.31
1514	-3.31
1515	1.91
1516	1.26
1517	-2.66
1518	-0.7
1519	-0.05
1520	0.61
1521	3.87
1522	-2
1523	1.26
1524	0.61
1525	-2
1526	-2
1527	0.61
1528	0.61
1529	-1.35
1530	2.56

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1531	1.26
1532	0.61
1533	-0.05
1534	-2.66
1535	-0.7
1536	-1.35
1537	2.56
1538	2.56
1539	1.26
1540	1.91
1541	-2
1542	1.26
1543	-3.31
1544	-2.66
1545	1.91
1546	-2.66
1547	-1.35
1548	-2
1549	-0.05
1550	-2
1551	-0.7
1552	1.26
1553	-2
1554	-2.66
1555	-0.05
1556	1.26
1557	-2.66
1558	0.61
1559	0.61
1560	0.61

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1561	-3.31
1562	1.26
1563	-0.05
1564	-2
1565	-4.61
1566	1.26
1567	1.26
1568	-0.05
1569	-3.31
1570	0.61
1571	-2
1572	-1.35
1573	-2.66
1574	-0.7
1575	-0.05
1576	-1.35
1577	1.91
1578	-2
1579	0.61
1580	-0.05
1581	-0.05
1582	-0.7
1583	0.61
1584	0.61
1585	1.26
1586	-2.66
1587	-3.96
1588	-0.05
1589	-2.66
1590	-2.66

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1591	-2
1592	-0.05
1593	-1.35
1594	0.61
1595	-3.31
1596	1.91
1597	3.21
1598	-2.66
1599	-2.66
1600	-4.61
1601	-1.35
1602	1.91
1603	-0.7
1604	1.26
1605	0.61
1606	-0.7
1607	3.87
1608	-4.61
1609	3.21
1610	1.91
1611	-0.05
1612	-2.66
1613	1.91
1614	-2.66
1615	-0.7
1616	-2.66
1617	3.21
1618	-0.05
1619	-0.05
1620	-0.7

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1621	-3.31
1622	-1.35
1623	0.61
1624	-3.31
1625	2.56
1626	2.56
1627	-0.7
1628	1.26
1629	2.56
1630	1.91
1631	-2
1632	-0.7
1633	1.91
1634	-0.7
1635	-4.61
1636	-0.7
1637	-3.31
1638	0.61
1639	-0.7
1640	-2
1641	-2.66
1642	-0.05
1643	1.91
1644	-0.05
1645	0.61
1646	-2
1647	-1.35
1648	-0.05
1649	-2.66
1650	-0.05

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1651	-0.7
1652	1.26
1653	-0.7
1654	1.26
1655	-2
1656	-2
1657	1.26
1658	-5.26
1659	-0.7
1660	-3.31
1661	1.91
1662	3.21
1663	-3.96
1664	0.61
1665	-3.96
1666	-0.7
1667	-0.05
1668	1.91
1669	1.26
1670	-3.96
1671	2.56
1672	-2.66
1673	2.56
1674	-2
1675	2.56
1676	3.21
1677	-2
1678	1.26
1679	-2
1680	0.61

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1681	-3.96
1682	0.61
1683	1.26
1684	-3.31
1685	-2.66
1686	2.56
1687	-0.05
1688	-2
1689	-1.35
1690	1.91
1691	-2.66
1692	-3.96
1693	-0.05
1694	-2
1695	-5.26
1696	2.56
1697	-3.31
1698	-2
1699	0.61
1700	-0.7
1701	-0.05
1702	1.91
1703	-0.7
1704	-0.7
1705	-2
1706	-0.7
1707	1.26
1708	3.87
1709	-5.92
1710	-0.05

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1711	3.21
1712	-0.7
1713	0.61
1714	-0.05
1715	-0.7
1716	-3.96
1717	-1.36
1718	-2.65
1719	-0.05
1720	-0.05
1721	-0.05
1722	0.6
1723	-0.05
1724	2.55
1725	-0.69
1726	-2
1727	-0.69
1728	-0.05
1729	-2.65
1730	1.91
1731	-1.03
1732	0.93
1733	1.58
1734	3.22
1735	1.26
1736	0.6
1737	2.55
1738	-0.05
1739	2.55
1740	-3.96

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1741	0.29
1742	0.6
1743	-0.69
1744	-1.36
1745	-0.69
1746	-1.36
1747	2.55
1748	-0.38
1749	3.22
1750	2.24
1751	-1.03
1752	0.6
1753	-0.69
1754	0.6
1755	-3.63
1756	2.4
1757	-1.63
1758	-2.14
1759	1.77
1760	-1.47
1761	1.52
1762	-1.08
1763	-2.16
1764	3.34
1765	-0.58
1766	-2.26
1767	-1.08
1768	-2.26
1769	0.34
1770	-0.3

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1771	-0.05
1772	1.26
1773	0.6
1774	1.38
1775	0.34
1776	-1.06
1777	-0.97
1778	-1.47
1779	0.87
1780	-0.3
1781	0.03
1782	-0.3
1783	1.75
1784	-4.37
1785	-1.92
1786	-0.2
1787	-0.16
1788	1.2
1789	-2.65
1790	1.38
1791	1.26
1792	-0.18
1793	0.09
1794	2.05
1795	-3.43
1796	2.69
1797	-1.08
1798	0.74
1799	-2.92
1800	-2.65

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1801	0.48
1802	-1.36
1803	-2.39
1804	0.85
1805	-2.77
1806	1.36
1807	1.91
1808	-1.14
1809	-1.14
1810	-2.43
1811	-0.69
1812	-0.61
1813	-2.47
1814	-3.39
1815	-0.24
1816	-1.63
1817	1.54
1818	0.07
1819	-0.07
1820	-1.85
1821	-1.34
1822	2.16
1823	-2.98
1824	1.19
1825	1.85
1826	-0.28
1827	-2.22
1828	1.67
1829	-2.26
1830	-5.41

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1831	-0.99
1832	-0.05
1833	-0.13
1834	3.57
1835	1.05
1836	-0.69
1837	0.17
1838	-3.31
1839	-0.46
1840	1.09
1841	-2.75
1842	-1.36
1843	0.7
1844	0.25
1845	-3.14
1846	2.07
1847	-2.75
1848	-1.91
1849	0.81
1850	-1.51
1851	0.46
1852	0.38
1853	1.83
1854	-2.37
1855	-1.57
1856	-0.99
1857	-0.26
1858	-1.92
1859	0.97
1860	-0.69

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1861	-1.06
1862	-0.05
1863	1.42
1864	-1.1
1865	-2.57
1866	2.79
1867	2.34
1868	0.32
1869	3.73
1870	-1.92
1871	-3.59
1872	-1.42
1873	1.54
1874	0.38
1875	-1.14
1876	-1.42
1877	3.43
1878	0.52
1879	-0.69
1880	-2.75
1881	0.46
1882	0.36
1883	1.09
1884	2.24
1885	0.7
1886	-1.28
1887	-1.36
1888	-1.18
1889	-1.1
1890	-1.1
1891	-3.49
1892	0.32

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1893	-2.14
1894	0.03
1895	-2.94
1896	-0.26
1897	0.32
1898	0.89
1899	2.55
1900	-0.26
1901	-1.71
1902	1.05
1903	0.75
1904	0.03
1905	0.54
1906	0.54
1907	-1.28
1908	-0.05
1909	-1.06
1910	1.83
1911	0.6
1912	1.91
1913	0.89
1914	0.6
1915	1.58
1916	3.42
1917	-1.28
1918	-0.77
1919	1.91
1920	2.16
1921	1.91
1922	-0.44
1923	1.77
1924	-1.81

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1925	2.3
1926	1.97
1927	0.74
1928	0.87
1929	-3.37
1930	2.16
1931	0.29
1932	-0.18
1933	-0.38
1934	-1.75
1935	2.55
1936	1.46
1937	1.46
1938	1.07
1939	0.6
1940	-3.39
1941	-2.8
1942	-3.74
1943	1.11
1944	0.62
1945	-0.13
1946	0.68
1947	-4.02
1948	1.77
1949	0.48
1950	1.97
1951	0.48
1952	0.15
1953	-0.3
1954	-1.08
1955	0.79
1956	-0.58

Tiempo (años)	Temperatura de Invierno
1957	1.91
1958	0.74
1959	0.6
1960	0.93
1961	1.65
1962	0.6
1963	-5.58
1964	-2.06
1965	-0.38
1966	2.24
1967	1.71
1968	-0.05
1969	-0.89
1970	-2.14
1971	0.01
1972	1.52
1973	0.29
1974	2.36
1975	3.87
1976	0.74
1977	1.34
1978	0.4
1979	-1.22
1980	2.24
1981	-0.44
1982	-1.08
1983	1.85
1984	0.4
1985	-2.65

Precipitación de Invierno en la Región del Báltico
 (Extraídos de: [http:// www.hisklid.de/downloads](http://www.hisklid.de/downloads))

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1501	159.1
1502	223.8
1503	191.5
1504	207.6
1505	175.3
1506	143
1507	143
1508	143
1509	143
1510	143
1511	207.6
1512	94.5
1513	191.5
1514	143
1515	207.6
1516	143
1517	175.3
1518	175.3
1519	143
1520	110.6
1521	143
1522	62.1
1523	175.3
1524	256.1
1525	126.8
1526	159.1
1527	191.5
1528	143
1529	143
1530	159.1

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1531	126.8
1532	207.6
1533	223.8
1534	207.6
1535	159.1
1536	126.8
1537	159.1
1538	110.6
1539	191.5
1540	207.6
1541	175.3
1542	191.5
1543	207.6
1544	159.1
1545	175.3
1546	94.5
1547	126.8
1548	143
1549	159.1
1550	175.3
1551	175.3
1552	191.5
1553	143
1554	143
1555	143
1556	191.5
1557	159.1
1558	191.5
1559	159.1
1560	126.8

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1561	159.1
1562	126.8
1563	159.1
1564	175.3
1565	159.1
1566	191.5
1567	143
1568	143
1569	175.3
1570	175.3
1571	191.5
1572	175.3
1573	191.5
1574	159.1
1575	143
1576	143
1577	207.6
1578	143
1579	175.3
1580	126.8
1581	191.5
1582	223.8
1583	126.8
1584	175.3
1585	143
1586	175.3
1587	175.3
1588	78.3
1589	126.8
1590	191.5

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1591	143
1592	62.1
1593	159.1
1594	94.5
1595	62.1
1596	175.3
1597	191.5
1598	240
1599	143
1600	78.3
1601	175.3
1602	223.8
1603	45.9
1604	126.8
1605	207.6
1606	143
1607	62.1
1608	175.3
1609	126.8
1610	143
1611	143
1612	191.5
1613	175.3
1614	240
1615	62.1
1616	94.5
1617	110.6
1618	223.8
1619	94.5
1620	175.3

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1621	110.6
1622	126.8
1623	110.6
1624	143
1625	207.6
1626	78.3
1627	191.5
1628	143
1629	175.3
1630	159.1
1631	94.5
1632	94.5
1633	62.1
1634	175.3
1635	94.5
1636	207.6
1637	110.6
1638	191.5
1639	143
1640	191.5
1641	159.1
1642	159.1
1643	159.1
1644	110.6
1645	126.8
1646	110.6
1647	143
1648	143
1649	94.5
1650	175.3

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1651	223.8
1652	159.1
1653	143
1654	110.6
1655	207.6
1656	175.3
1657	191.5
1658	223.8
1659	191.5
1660	159.1
1661	191.5
1662	159.1
1663	175.3
1664	110.6
1665	207.6
1666	110.6
1667	159.1
1668	191.5
1669	126.8
1670	159.1
1671	159.1
1672	143
1673	159.1
1674	207.6
1675	143
1676	175.3
1677	207.6
1678	159.1
1679	240
1680	143

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1681	126.8
1682	240
1683	110.6
1684	126.8
1685	126.8
1686	126.8
1687	159.1
1688	126.8
1689	143
1690	110.6
1691	126.8
1692	175.3
1693	175.3
1694	223.8
1695	175.3
1696	159.1
1697	94.5
1698	143
1699	94.5
1700	175.3
1701	175.3
1702	143
1703	159.1
1704	159.1
1705	143
1706	78.3
1707	175.3
1708	175.3
1709	143
1710	143

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1711	175.3
1712	175.3
1713	175.3
1714	78.3
1715	94.5
1716	175.3
1717	175.3
1718	175.3
1719	143
1720	223.8
1721	207.6
1722	175.3
1723	191.5
1724	143
1725	143
1726	159.1
1727	191.5
1728	159.1
1729	175.3
1730	175.3
1731	207.6
1732	175.3
1733	159.1
1734	159.1
1735	159.1
1736	159.1
1737	207.6
1738	94.5
1739	110.6
1740	94.5

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1741	110.6
1742	62.1
1743	45.9
1744	29.8
1745	62.1
1746	110.6
1747	175.3
1748	110.6
1749	191.5
1750	126.8
1751	207.6
1752	126.8
1753	110.6
1754	191.5
1755	94.5
1756	126.8
1757	29.8
1758	143
1759	126.8
1760	110.6
1761	159.1
1762	126.8
1763	94.5
1764	191.5
1765	143
1766	126.8
1767	143
1768	94.5
1769	110.6
1770	126.8

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1771	126.8
1772	143
1773	94.5
1774	175.3
1775	110.6
1776	126.8
1777	62.1
1778	78.3
1779	78.3
1780	126.8
1781	143
1782	94.5
1783	191.5
1784	191.5
1785	126.8
1786	94.5
1787	94.5
1788	175.3
1789	223.8
1790	110.6
1791	223.8
1792	159.1
1793	159.1
1794	110.6
1795	62.1
1796	110.6
1797	62.1
1798	94.5
1799	94.5
1800	62.1

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1801	110.6
1802	175.3
1803	78.3
1804	175.3
1805	159.1
1806	175.3
1807	159.1
1808	143
1809	175.3
1810	78.3
1811	175.3
1812	110.6
1813	45.9
1814	94.5
1815	126.8
1816	110.6
1817	143
1818	143
1819	94.5
1820	159.1
1821	94.5
1822	126.8
1823	110.6
1824	94.5
1825	110.6
1826	94.5
1827	175.3
1828	175.3
1829	126.8
1830	94.5

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1831	126.8
1832	94.5
1833	94.5
1834	207.6
1835	143
1836	143
1837	159.1
1838	110.6
1839	175.3
1840	175.3
1841	94.5
1842	62.1
1843	175.3
1844	159.1
1845	94.5
1846	207.6
1847	143
1848	94.5
1849	94.5
1850	159.1
1851	94.5
1852	126.8
1853	126.8
1854	110.6
1855	175.3
1856	94.5
1857	78.3
1858	45.9
1859	94.5
1860	159.1

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1861	94.5
1862	159.1
1863	110.6
1864	62.1
1865	94.5
1866	110.6
1867	223.8
1868	126.8
1869	143
1870	94.5
1871	126.8
1872	62.1
1873	126.8
1874	45.9
1875	159.1
1876	143
1877	191.5
1878	159.1
1879	159.1
1880	110.6
1881	159.1
1882	45.9
1883	143
1884	126.8
1885	126.8
1886	110.6
1887	110.6
1888	126.8
1889	45.9
1890	94.5
1891	45.9
1892	159.1

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1893	126.8
1894	94.5
1895	126.8
1896	94.5
1897	110.6
1898	78.3
1899	126.8
1900	191.5
1901	126.8
1902	126.8
1903	126.8
1904	110.6
1905	110.6
1906	126.8
1907	126.8
1908	110.6
1909	94.5
1910	143
1911	94.5
1912	143
1913	110.6
1914	126.8
1915	159.1
1916	207.6
1917	110.6
1918	94.5
1919	143
1920	191.5
1921	94.5
1922	126.8
1923	159.1
1924	110.6

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1925	94.5
1926	175.3
1927	110.6
1928	110.6
1929	94.5
1930	110.6
1931	175.3
1932	94.5
1933	62.1
1934	94.5
1935	175.3
1936	191.5
1937	159.1
1938	175.3
1939	143
1940	110.6
1941	191.5
1942	126.8
1943	94.5
1944	126.8
1945	126.8
1946	159.1
1947	110.6
1948	240
1949	78.3
1950	143
1951	143
1952	126.8
1953	126.8
1954	110.6
1955	191.5
1956	143

Tiempo (años)	Precipitación de Invierno
1957	143
1958	191.5
1959	126.8
1960	143
1961	143
1962	175.3
1963	94.5
1964	45.9
1965	159.1
1966	191.5
1967	191.5
1968	175.3
1969	110.6
1970	175.3
1971	94.5
1972	45.9
1973	78.3
1974	143
1975	159.1
1976	110.6
1977	191.5
1978	143
1979	175.3
1980	159.1
1981	143
1982	191.5
1983	207.6
1984	191.5
1985	143

Be-10

(Beer et al., 1994)

Tiempo (años)	Be-10
1501.5	0.726253
1502.5	0.775944
1503.5	0.845523
1504.5	0.95488
1505.5	1.09406
1506.5	1.253112
1507.5	1.382309
1508.5	1.44188
1509.5	1.441783
1510.5	1.401916
1511.5	1.362054
1512.5	1.34208
1513.5	1.312168
1514.5	1.28226
1515.5	1.222538
1516.5	1.162824
1517.5	1.162746
1518.5	1.212355
1519.5	1.291767
1520.5	1.361232
1521.5	1.381011
1522.5	1.361049
1523.5	1.331156
1524.5	1.331067
1525.5	1.380641
1526.5	1.430208
1527.5	1.449975
1528.5	1.430016
1529.5	1.41006
1530.5	1.419895

Tiempo (años)	Be-10
1531.5	1.469443
1532.5	1.518984
1533.5	1.499027
1534.5	1.39966
1535.5	1.250676
1536.5	1.101712
1537.5	1.012316
1538.5	0.9924
1539.5	1.002257
1540.5	1.031957
1541.5	1.051732
1542.5	1.091347
1543.5	1.140877
1544.5	1.16064
1545.5	1.140723
1546.5	1.051379
1547.5	0.94221
1548.5	0.882643
1549.5	0.912333
1550.5	0.9916
1551.5	1.060941
1552.5	1.050955
1553.5	0.981486
1554.5	0.902113
1555.5	0.882227
1556.5	0.951552
1557.5	1.030779
1558.5	1.050531
1559.5	0.97118
1560.5	0.852203

Tiempo (años)	Be-10
1561.5	0.772876
1562.5	0.782732
1563.5	0.861938
1564.5	0.931227
1565.5	0.921258
1566.5	0.841953
1567.5	0.772564
1568.5	0.752704
1569.5	0.83188
1570.5	0.940753
1571.5	1.029808
1572.5	1.089147
1573.5	1.138577
1574.5	1.188
1575.5	1.237417
1576.5	1.237333
1577.5	1.158066
1578.5	1.029323
1579.5	0.930287
1580.5	0.930224
1581.5	1.048905
1582.5	1.226939
1583.5	1.33569
1584.5	1.345493
1585.5	1.256369
1586.5	1.167256
1587.5	1.127612
1588.5	1.117645
1589.5	1.07801
1590.5	0.969155

Tiempo (años)	Be-10
1591.5	0.810871
1592.5	0.682272
1593.5	0.682226
1594.5	0.83048
1595.5	1.057802
1596.5	1.255437
1597.5	1.344315
1598.5	1.314572
1599.5	1.186
1600.5	1.027797
1601.5	0.879498
1602.5	0.790507
1603.5	0.750931
1604.5	0.78052
1605.5	0.849623
1606.5	0.918716
1607.5	0.93841
1608.5	0.88896
1609.5	0.82964
1610.5	0.819708
1611.5	0.88878
1612.5	1.007216
1613.5	1.066392
1614.5	1.00708
1615.5	0.839177
1616.5	0.661424
1617.5	0.612023
1618.5	0.760041
1619.5	1.03635
1620.5	1.302752

Tiempo (años)	Be-10
1621.5	1.391482
1622.5	1.292708
1623.5	1.075539
1624.5	0.878133
1625.5	0.799146
1626.5	0.818823
1627.5	0.877955
1628.5	0.897624
1629.5	0.848247
1630.5	0.798876
1631.5	0.798822
1632.5	0.877659
1633.5	1.015649
1634.5	1.17334
1635.5	1.281713
1636.5	1.33092
1637.5	1.33083
1638.5	1.281453
1639.5	1.21237
1640.5	1.123584
1641.5	1.044665
1642.5	0.995321
1643.5	0.955838
1644.5	0.94592
1645.5	0.945856
1646.5	0.955644
1647.5	0.985133
1648.5	1.03432
1649.5	1.09335
1650.5	1.132673

Tiempo (años)	Be-10
1651.5	1.132597
1652.5	1.063584
1653.5	0.955191
1654.5	0.846813
1655.5	0.777834
1656.5	0.767936
1657.5	0.807263
1658.5	0.876116
1659.5	0.954803
1660.5	1.053165
1661.5	1.161356
1662.5	1.249849
1663.5	1.289127
1664.5	1.24968
1665.5	1.151202
1666.5	1.023221
1667.5	0.924772
1668.5	0.875523
1669.5	0.8853
1670.5	0.924584
1671.5	0.973698
1672.5	1.03264
1673.5	1.121076
1674.5	1.219333
1675.5	1.288079
1676.5	1.307656
1677.5	1.228917
1678.5	1.101035
1679.5	0.96334
1680.5	0.904299

Tiempo (años)	Be-10
1681.5	0.914066
1682.5	0.992628
1683.5	1.071179
1684.5	1.09076
1685.5	1.051382
1686.5	0.972708
1687.5	0.913694
1688.5	0.913632
1689.5	0.97251
1690.5	1.041203
1691.5	1.090242
1692.5	1.099989
1693.5	1.119556
1694.5	1.1784
1695.5	1.315791
1696.5	1.482619
1697.5	1.639606
1698.5	1.698399
1699.5	1.639383
1700.5	1.511664
1701.5	1.403593
1702.5	1.364239
1703.5	1.442658
1704.5	1.570133
1705.5	1.677966
1706.5	1.687664
1707.5	1.599247
1708.5	1.451979
1709.5	1.31454
1710.5	1.245785

Tiempo (años)	Be-10
1711.5	1.255509
1712.5	1.304464
1713.5	1.363219
1714.5	1.372933
1715.5	1.343422
1716.5	1.274693
1717.5	1.196169
1718.5	1.117656
1719.5	1.048957
1720.5	0.990069
1721.5	0.940992
1722.5	0.901723
1723.5	0.872259
1724.5	0.8624
1725.5	0.862341
1726.5	0.872081
1727.5	0.872022
1728.5	0.832773
1729.5	0.744547
1730.5	0.646536
1731.5	0.577925
1732.5	0.558296
1733.5	0.626816
1734.5	0.7345
1735.5	0.842169
1736.5	0.910656
1737.5	0.920385
1738.5	0.88116
1739.5	0.84194
1740.5	0.802725

Tiempo (años)	Be-10
1741.5	0.792882
1742.5	0.792828
1743.5	0.802561
1744.5	0.812293
1745.5	0.822024
1746.5	0.831753
1747.5	0.812127
1748.5	0.802288
1749.5	0.812017
1750.5	0.870657
1751.5	0.958636
1752.5	1.046603
1753.5	1.075873
1754.5	1.0269
1755.5	0.919257
1756.5	0.831187
1757.5	0.83113
1758.5	0.899515
1759.5	0.987443
1760.5	1.016704
1761.5	0.957983
1762.5	0.860171
1763.5	0.801468
1764.5	0.840507
1765.5	0.967494
1766.5	1.094464
1767.5	1.133475
1768.5	1.084544
1769.5	0.99654
1770.5	0.957395

Tiempo (años)	Be-10
1771.5	0.986635
1772.5	1.064712
1773.5	1.103709
1774.5	1.0548
1775.5	0.937536
1776.5	0.820288
1777.5	0.771409
1778.5	0.790884
1779.5	0.868937
1780.5	0.946979
1781.5	0.995724
1782.5	1.015179
1783.5	1.02487
1784.5	1.00528
1785.5	0.936896
1786.5	0.839245
1787.5	0.73185
1788.5	0.683013
1789.5	0.712237
1790.5	0.819504
1791.5	0.926757
1792.5	0.994976
1793.5	1.004662
1794.5	0.99484
1795.5	1.02403
1796.5	1.092224
1797.5	1.179911
1798.5	1.218833
1799.5	1.1895
1800.5	1.111424

Tiempo (años)	Be-10
1801.5	1.02361
1802.5	0.9748
1803.5	0.955239
1804.5	0.945427
1805.5	0.955108
1806.5	0.994024
1807.5	1.091403
1808.5	1.227744
1809.5	1.34458
1810.5	1.383459
1811.5	1.324912
1812.5	1.207925
1813.5	1.129917
1814.5	1.15906
1815.5	1.266113
1816.5	1.373152
1817.5	1.373058
1818.5	1.256116
1819.5	1.08077
1820.5	0.9736
1821.5	0.993004
1822.5	1.109752
1823.5	1.245952
1824.5	1.2848
1825.5	1.206851
1826.5	1.031592
1827.5	0.846626
1828.5	0.710339
1829.5	0.65191
1830.5	0.681053

Tiempo (años)	Be-10
1831.5	0.788022
1832.5	0.963072
1833.5	1.147825
1834.5	1.28392
1835.5	1.303284
1836.5	1.196216
1837.5	1.001641
1838.5	0.845988
1839.5	0.81676
1840.5	0.923653
1841.5	1.088864
1842.5	1.205445
1843.5	1.185921
1844.5	1.03032
1845.5	0.855301
1846.5	0.758056
1847.5	0.77744
1848.5	0.87456
1849.5	0.971667
1850.5	0.991032
1851.5	0.922957
1852.5	0.816032
1853.5	0.738264
1854.5	0.738213
1855.5	0.825577
1856.5	0.942064
1857.5	1.039113
1858.5	1.068173
1859.5	1.01955
1860.5	0.902968

Tiempo (años)	Be-10
1861.5	0.786402
1862.5	0.7281
1863.5	0.776587
1864.5	0.922133
1865.5	1.106484
1866.5	1.242283
1867.5	1.271311
1868.5	1.174184
1869.5	1.009147
1870.5	0.853835
1871.5	0.756756
1872.5	0.7276
1873.5	0.737251
1874.5	0.7566
1875.5	0.795345
1876.5	0.853483
1877.5	0.931008
1878.5	1.008523
1879.5	1.056937
1880.5	1.056864
1881.5	1.008315
1882.5	0.959772
1883.5	0.959706
1884.5	1.027493
1885.5	1.124349
1886.5	1.192116
1887.5	1.201725
1888.5	1.172571
1889.5	1.17249
1890.5	1.240235

Tiempo (años)	Be-10
1891.5	1.356413
1892.5	1.443512
1893.5	1.443413
1894.5	1.3077
1895.5	1.075146
1896.5	0.842624
1897.5	0.716665
1898.5	0.7263
1899.5	0.84245
1900.5	0.987632
1901.5	1.094066
1902.5	1.123035
1903.5	1.084235
1904.5	1.00672
1905.5	0.929216
1906.5	0.861401
1907.5	0.832308
1908.5	0.851605
1909.5	0.890253
1910.5	0.948248
1911.5	1.006235
1912.5	1.025515
1913.5	0.996422
1914.5	0.938313
1915.5	0.87054
1916.5	0.802776
1917.5	0.773707
1918.5	0.763983
1919.5	0.80261
1920.5	0.87024

Tiempo (años)	Be-10
1921.5	0.957198
1922.5	1.044144
1923.5	1.082741
1924.5	1.053667
1925.5	0.9666
1926.5	0.860215
1927.5	0.763509
1928.5	0.734464
1929.5	0.75374
1930.5	0.792339
1931.5	0.82127
1932.5	0.830875
1933.5	0.821157
1934.5	0.8211
1935.5	0.821043
1936.5	0.811328
1937.5	0.762982
1938.5	0.685671
1939.5	0.627683
1940.5	0.62764
1941.5	0.695184
1942.5	0.772373
1943.5	0.82059
1944.5	0.78192
1945.5	0.685339
1946.5	0.588772
1947.5	0.57908
1948.5	0.675547
1949.5	0.83955
1950.5	0.993881

Tiempo (años)	Be-10
1951.5	1.071002
1952.5	1.051632
1953.5	0.984028
1954.5	0.89714
1955.5	0.829556
1956.5	0.752336
1957.5	0.655837
1958.5	0.53042
1959.5	0.424307
1960.5	0.366421
1961.5	0.38568
1962.5	0.491708
1963.5	0.626643
1964.5	0.74228
1965.5	0.800065
1966.5	0.780732
1967.5	0.693936
1968.5	0.558965
1969.5	0.43365
1970.5	0.366168
1971.5	0.395049
1972.5	0.520272
1973.5	0.67438
1974.5	0.789933
1975.5	0.799511
1976.5	0.7224
1977.5	0.597143
1978.5	0.520056
1979.5	0.52965
1980.5	0.616277

Tiempo (años)	Be-10
1981.5	0.712521
1982.5	0.741356
1983.5	0.693168
1984.5	0.587227
1985.5	0.4813

Numero de Manchas Solares

(Extraídos de: <http://sidc.oma.be/DATA/yearssn.dat>)

Tiempo (años)	NMS
1700.5	5
1701.5	11
1702.5	16
1703.5	23
1704.5	36
1705.5	58
1706.5	29
1707.5	20
1708.5	10
1709.5	8
1710.5	3
1711.5	0
1712.5	0
1713.5	2
1714.5	11
1715.5	27
1716.5	47
1717.5	63
1718.5	60
1719.5	39
1720.5	28
1721.5	26
1722.5	22
1723.5	11
1724.5	21
1725.5	40
1726.5	78
1727.5	122
1728.5	103
1729.5	73

Tiempo (años)	NMS
1730.5	47
1731.5	35
1732.5	11
1733.5	5
1734.5	16
1735.5	34
1736.5	70
1737.5	81
1738.5	111
1739.5	101
1740.5	73
1741.5	40
1742.5	20
1743.5	16
1744.5	5
1745.5	11
1746.5	22
1747.5	40
1748.5	60
1749.5	80.9
1750.5	83.4
1751.5	47.7
1752.5	47.8
1753.5	30.7
1754.5	12.2
1755.5	9.6
1756.5	10.2
1757.5	32.4
1758.5	47.6
1759.5	54

Tiempo (años)	NMS
1760.5	62.9
1761.5	85.9
1762.5	61.2
1763.5	45.1
1764.5	36.4
1765.5	20.9
1766.5	11.4
1767.5	37.8
1768.5	69.8
1769.5	106
1770.5	101
1771.5	81.6
1772.5	66.5
1773.5	34.8
1774.5	30.6
1775.5	7
1776.5	19.8
1777.5	92.5
1778.5	154
1779.5	126
1780.5	84.8
1781.5	68.1
1782.5	38.5
1783.5	22.8
1784.5	10.2
1785.5	24.1
1786.5	82.9
1787.5	132
1788.5	131
1789.5	118

Tiempo (años)	NMS
1790.5	89.9
1791.5	66.6
1792.5	60
1793.5	46.9
1794.5	41
1795.5	21.3
1796.5	16
1797.5	6.4
1798.5	4.1
1799.5	6.8
1800.5	14.5
1801.5	34
1802.5	45
1803.5	43.1
1804.5	47.5
1805.5	42.2
1806.5	28.1
1807.5	10.1
1808.5	8.1
1809.5	2.5
1810.5	0
1811.5	1.4
1812.5	5
1813.5	12.2
1814.5	13.9
1815.5	35.4
1816.5	45.8
1817.5	41
1818.5	30.1
1819.5	23.9

Tiempo (años)	NMS
1820.5	15.6
1821.5	6.6
1822.5	4
1823.5	1.8
1824.5	8.5
1825.5	16.6
1826.5	36.3
1827.5	49.6
1828.5	64.2
1829.5	67
1830.5	70.9
1831.5	47.8
1832.5	27.5
1833.5	8.5
1834.5	13.2
1835.5	56.9
1836.5	122
1837.5	138
1838.5	103
1839.5	85.7
1840.5	64.6
1841.5	36.7
1842.5	24.2
1843.5	10.7
1844.5	15
1845.5	40.1
1846.5	61.5
1847.5	98.5
1848.5	125
1849.5	96.3

Tiempo (años)	NMS
1850.5	66.6
1851.5	64.5
1852.5	54.1
1853.5	39
1854.5	20.6
1855.5	6.7
1856.5	4.3
1857.5	22.7
1858.5	54.8
1859.5	93.8
1860.5	95.8
1861.5	77.2
1862.5	59.1
1863.5	44
1864.5	47
1865.5	30.5
1866.5	16.3
1867.5	7.3
1868.5	37.6
1869.5	74
1870.5	139
1871.5	111
1872.5	102
1873.5	66.2
1874.5	44.7
1875.5	17
1876.5	11.3
1877.5	12.4
1878.5	3.4
1879.5	6
1880.5	32.3
1881.5	54.3
1882.5	59.7

Tiempo (años)	NMS
1883.5	63.7
1884.5	63.5
1885.5	52.2
1886.5	25.4
1887.5	13.1
1888.5	6.8
1889.5	6.3
1890.5	7.1
1891.5	35.6
1892.5	73
1893.5	85.1
1894.5	78
1895.5	64
1896.5	41.8
1897.5	26.2
1898.5	26.7
1899.5	12.1
1900.5	9.5
1901.5	2.7
1902.5	5
1903.5	24.4
1904.5	42
1905.5	63.5
1906.5	53.8
1907.5	62
1908.5	48.5
1909.5	43.9
1910.5	18.6
1911.5	5.7
1912.5	3.6
1913.5	1.4
1914.5	9.6
1915.5	47.4

Tiempo (años)	NMS
1916.5	57.1
1917.5	104
1918.5	80.6
1919.5	63.6
1920.5	37.6
1921.5	26.1
1922.5	14.2
1923.5	5.8
1924.5	16.7
1925.5	44.3
1926.5	63.9
1927.5	69
1928.5	77.8
1929.5	64.9
1930.5	35.7
1931.5	21.2
1932.5	11.1
1933.5	5.7
1934.5	8.7
1935.5	36.1
1936.5	79.7
1937.5	114
1938.5	110
1939.5	88.8
1940.5	67.8
1941.5	47.5
1942.5	30.6
1943.5	16.3
1944.5	9.6
1945.5	33.2
1946.5	92.6
1947.5	152
1948.5	136

Tiempo (años)	NMS
1949.5	135
1950.5	83.9
1951.5	69.4
1952.5	31.5
1953.5	13.9
1954.5	4.4
1955.5	38
1956.5	142
1957.5	190
1958.5	185
1959.5	159
1960.5	112
1961.5	53.9
1962.5	37.6
1963.5	27.9
1964.5	10.2
1965.5	15.1
1966.5	47
1967.5	93.7
1968.5	106
1969.5	106
1970.5	105
1971.5	66.6
1972.5	68.9
1973.5	38
1974.5	34.5
1975.5	15.5
1976.5	12.6
1977.5	27.5
1978.5	92.5
1979.5	155
1980.5	155
1981.5	141

Tiempo (años)	NMS
1982.5	116
1983.5	66.6
1984.5	45.9
1985.5	17.9
1986.5	13.4
1987.5	29.2
1988.5	100
1989.5	158
1990.5	143
1991.5	146
1992.5	94.3
1993.5	54.6
1994.5	29.9
1995.5	17.5
1996.5	8.6
1997.5	21.5
1998.5	64.3
1999.5	93.3
2000.5	120
2001.5	111
2002.5	104
2003.5	63.7
2004.5	40.4
2005.5	29.8
2006.5	15.2
2007.5	7.5
2008.5	2.9
2009.5	3.1
2010.5	16.5
2011.5	55.7
2012.5	57.7

Grupo de Manchas Solares
(Schove, 1983; Velasco, et al. 2013)

Tiempo (años)	GMS
1501	2.9191
1502	10.703
1503	25.299
1504	45.733
1505	59.355
1506	77.843
1507	63.247
1508	49.625
1509	32.11
1510	22.38
1511	10.703
1512	3.8921
1513	1.9461
1514	3.8921
1515	19.461
1516	48.652
1517	66.166
1518	61.301
1519	49.625
1520	32.11
1521	17.515
1522	8.7573
1523	4.8652
1524	1.9461
1525	13.622
1526	40.867
1527	85.627
1528	127.47
1529	100.22
1530	82.708

Tiempo (años)	GMS
1531	61.301
1532	42.813
1533	22.38
1534	4.8652
1535	21.407
1536	58.382
1537	105.09
1538	89.519
1539	72.004
1540	43.786
1541	24.326
1542	14.595
1543	2.9191
1544	12.649
1545	38.921
1546	85.627
1547	134.28
1548	111.9
1549	97.303
1550	77.843
1551	58.382
1552	44.759
1553	22.38
1554	12.649
1555	18.488
1556	41.84
1557	75.897
1558	115.79
1559	102.17
1560	95.357

Tiempo (años)	GMS
1561	78.816
1562	56.436
1563	43.786
1564	29.191
1565	17.515
1566	9.7303
1567	7.7843
1568	14.595
1569	38.921
1570	84.654
1571	126.49
1572	104.11
1573	84.654
1574	64.22
1575	46.706
1576	29.191
1577	16.542
1578	4.8652
1579	19.461
1580	68.112
1581	107.03
1582	86.6
1583	70.058
1584	48.652
1585	24.326
1586	8.7573
1587	4.8652
1588	6.8112
1589	17.515
1590	29.191

Tiempo (años)	GMS
1591	43.786
1592	50.598
1593	57.409
1594	47.679
1595	34.056
1596	18.488
1597	9.7303
1598	2.9191
1599	4.8652
1600	8.7573
1601	24.326
1602	46.706
1603	68.112
1604	85.627
1605	68.112
1606	48.652
1607	20.434
1608	4.8652
1609	4.8652
1610	36
1611	34.1
1612	92.7
1613	109.6
1614	121
1615	80.3
1616	20.1
1617	2.3
1618	1.3
1619	15
1620	15

Tiempo (años)	GMS
1621	15
1622	15
1623	15
1624	9.6
1625	42.4
1626	26.6
1627	16.5
1628	23.2
1629	18.7
1630	0
1631	4.4
1632	0
1633	14.3
1634	3
1635	4.3
1636	0
1637	0
1638	68.6
1639	76.8
1640	15
1641	0
1642	47.4
1643	17.6
1644	11.6
1645	0
1646	0
1647	0
1648	0
1649	0
1650	0

Tiempo (años)	GMS
1651	0
1652	4
1653	0.9
1654	0.7
1655	0.5
1656	0.6
1657	0.2
1658	0
1659	0
1660	2
1661	0.8
1662	0
1663	0
1664	0
1665	0
1666	0
1667	0
1668	0
1669	0
1670	0
1671	0.9
1672	0.4
1673	0
1674	0.2
1675	0
1676	1.8
1677	0.3
1678	0.2
1679	0
1680	0.8

Tiempo (años)	GMS
1681	0
1682	0
1683	0
1684	1.4
1685	0
1686	0.6
1687	0.1
1688	0.5
1689	0.2
1690	0
1691	0
1692	0
1693	0
1694	0
1695	0.1
1696	0
1697	0
1698	0
1699	0
1700	0.4
1701	0.5
1702	0.6
1703	2.7
1704	4.1
1705	5.5
1706	3.2
1707	5.3
1708	2.8
1709	1.6
1710	0.4

Tiempo (años)	GMS
1711	0
1712	0
1713	0.3
1714	0.9
1715	3.6
1716	9.1
1717	17.5
1718	9
1719	33.9
1720	23.4
1721	21.4
1722	11
1723	4.4
1724	15.6
1725	12.8
1726	36.2
1727	36.5
1728	64.2
1729	24
1730	69.7
1731	0
1732	18
1733	0
1734	0
1735	18.3
1736	48.6
1737	24
1738	17
1739	52.5
1740	9.3

Tiempo (años)	GMS
1741	57.7
1742	16.1
1743	8.3
1744	0
1745	0
1746	0
1747	0
1748	61
1749	63.2
1750	58
1751	33.7
1752	29
1753	23.9
1754	8.8
1755	4.7
1756	7.3
1757	24.8
1758	40.7
1759	49.5
1760	45.5
1761	68.5
1762	46.2
1763	34.2
1764	30.5
1765	8.4
1766	3.7
1767	33.9
1768	71.3
1769	98.5
1770	97.6

Tiempo (años)	GMS
1771	79.4
1772	66.2
1773	32.4
1774	25.8
1775	5.6
1776	14.1
1777	38.3
1778	72
1779	80.8
1780	55
1781	71.1
1782	32.9
1783	21.1
1784	4.8
1785	16
1786	63.3
1787	89.2
1788	82.5
1789	79.7
1790	65.1
1791	43.2
1792	42
1793	41
1794	30.2
1795	15.7
1796	13.7
1797	7.7
1798	4.7
1799	5.6
1800	11

Tiempo (años)	GMS
1801	51.1
1802	35.3
1803	18.5
1804	21.6
1805	25.6
1806	13.3
1807	5
1808	3.5
1809	1.2
1810	0
1811	0.3
1812	4
1813	9.1
1814	10.4
1815	16.8
1816	30.8
1817	28
1818	21.7
1819	19.2
1820	10.7
1821	4.3
1822	3
1823	1.2
1824	5.1
1825	14.4
1826	28.6
1827	44.4
1828	57
1829	59.2
1830	64.3

Tiempo (años)	GMS
1831	39.2
1832	22.7
1833	6.5
1834	9.8
1835	46.3
1836	100.2
1837	109.4
1838	77.4
1839	65.1
1840	48.3
1841	26.6
1842	18.8
1843	8.2
1844	11.8
1845	29.8
1846	43.8
1847	58
1848	85.8
1849	83.7
1850	55
1851	58.1
1852	49.8
1853	35.6
1854	17.3
1855	4.5
1856	3.1
1857	17.4
1858	44.4
1859	75.6
1860	85.6

Tiempo (años)	GMS
1861	70.7
1862	50.5
1863	40.9
1864	34.5
1865	22.6
1866	13.7
1867	6.2
1868	28.9
1869	62.3
1870	96.2
1871	86.9
1872	80.1
1873	51.7
1874	35
1875	15.5
1876	9.1
1877	8.5
1878	2.7
1879	4.4
1880	24.8
1881	45.2
1882	47.9
1883	54.7
1884	61.7
1885	47.3
1886	22.6
1887	12.7
1888	7.6
1889	5.8
1890	7.8

Tiempo (años)	GMS
1891	38.9
1892	68.3
1893	87.9
1894	88
1895	69.2
1896	39.7
1897	30.6
1898	26
1899	12.3
1900	9.1
1901	2.5
1902	3.8
1903	24.1
1904	45.3
1905	61
1906	56.2
1907	61.4
1908	53.1
1909	46.4
1910	21.5
1911	8.5
1912	3.6
1913	1.6
1914	12.4
1915	50.5
1916	67.1
1917	110.1
1918	89.2
1919	71.6
1920	43.5

Tiempo (años)	GMS
1921	28.7
1922	15.8
1923	6.9
1924	18.2
1925	51.2
1926	70.8
1927	77.6
1928	82.3
1929	74.4
1930	44.2
1931	26
1932	13.5
1933	5.9
1934	10.4
1935	42.8
1936	88.8
1937	120.6
1938	113.6
1939	97.3
1940	71.7
1941	49.9
1942	32.8
1943	15.5
1944	10.7
1945	37.3
1946	95.3
1947	144.9
1948	127.5
1949	129.3
1950	76

Tiempo (años)	GMS
1951	58.3
1952	29.6
1953	13.6
1954	4.4
1955	38.1
1956	126.1
1957	165.9
1958	175.1
1959	149.5
1960	103.8
1961	49.1
1962	31.4
1963	24.5
1964	10.2
1965	14.6
1966	43.8
1967	95.8
1968	98.2
1969	96
1970	108.5
1971	73.5
1972	72
1973	39.3
1974	34
1975	15.1
1976	13.5
1977	30.1
1978	102.7
1979	155.7
1980	141.1

Tiempo (años)	GMS
1981	140.9
1982	116.4
1983	71.6
1984	44
1985	16.9
1986	12.1
1987	27.6
1988	89.3
1989	147.7
1990	148.5
1991	146.2
1992	96.2
1993	53.9
1994	35.7
1995	19
1996	8.3681
1997	20.92
1998	62.566
1999	90.784
2000	116.37
2001	108.01
2002	101.2
2003	61.982
2004	39.311
2005	28.996
2006	14.79
2007	7.2977
2008	2.8218
2009	3.0164
2010	16.055

Tiempo (años)	GMS
2011	54.198

Irradiancia Solar Total (Lean, et al. 1995, Velasco, et al. 2013)

(Extraídos de:

ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/contributions_by_author/lean1995/lean1995data.txt)

Tiempo (años)	TSI
1501	1364.4
1502	1364.4
1503	1364.7
1504	1365.1
1505	1365.5
1506	1365.7
1507	1365.6
1508	1365.2
1509	1364.8
1510	1364.4
1511	1364.2
1512	1364.2
1513	1364.2
1514	1364.4
1515	1364.6
1516	1364.8
1517	1365
1518	1365
1519	1364.9
1520	1364.7
1521	1364.5
1522	1364.4
1523	1364.4
1524	1364.4
1525	1364.6
1526	1364.7
1527	1364.8
1528	1364.8
1529	1364.7
1530	1364.6

Tiempo (años)	TSI
1531	1364.6
1532	1364.5
1533	1364.6
1534	1364.6
1535	1364.8
1536	1364.9
1537	1365.1
1538	1365.1
1539	1365.1
1540	1364.9
1541	1364.7
1542	1364.6
1543	1364.5
1544	1364.6
1545	1364.7
1546	1364.9
1547	1365
1548	1365
1549	1364.9
1550	1364.8
1551	1364.7
1552	1364.5
1553	1364.5
1554	1364.5
1555	1364.6
1556	1364.9
1557	1365.1
1558	1365.3
1559	1365.4
1560	1365.3

Tiempo (años)	TSI
1561	1365.1
1562	1364.9
1563	1364.7
1564	1364.5
1565	1364.5
1566	1364.6
1567	1364.9
1568	1365.3
1569	1365.7
1570	1365.9
1571	1366
1572	1365.9
1573	1365.7
1574	1365.4
1575	1365.2
1576	1365.1
1577	1365.2
1578	1365.4
1579	1365.7
1580	1366
1581	1366.2
1582	1366.2
1583	1366
1584	1365.6
1585	1365.3
1586	1365
1587	1364.8
1588	1364.8
1589	1364.9
1590	1365.1

Tiempo (años)	TSI
1591	1365.3
1592	1365.5
1593	1365.7
1594	1365.7
1595	1365.5
1596	1365.2
1597	1364.8
1598	1364.6
1599	1364.6
1600	1364.7
1601	1365.1
1602	1365.5
1603	1365.8
1604	1366
1605	1365.8
1606	1365.4
1607	1364.8
1608	1364.4
1609	1364.3
1610	1364.7
1611	1365.1
1612	1365.4
1613	1365.6
1614	1365.5
1615	1365.3
1616	1365.1
1617	1364.9
1618	1364.8
1619	1364.8
1620	1364.8

Tiempo (años)	TSI
1621	1364.9
1622	1364.9
1623	1365
1624	1365
1625	1365.1
1626	1365
1627	1365
1628	1364.9
1629	1364.9
1630	1364.8
1631	1364.7
1632	1364.7
1633	1364.6
1634	1364.7
1635	1364.7
1636	1364.8
1637	1364.9
1638	1365
1639	1365
1640	1365.1
1641	1365.1
1642	1365
1643	1364.9
1644	1364.8
1645	1364.6
1646	1364.5
1647	1364.5
1648	1364.4
1649	1364.5
1650	1364.5

Tiempo (años)	TSI	Tiempo (años)	TSI	Tiempo (años)	TSI	Tiempo (años)	TSI	Tiempo (años)	TSI
1651	1364.6	1681	1364.5	1711	1364.5	1741	1365.2	1771	1365.3
1652	1364.7	1682	1364.5	1712	1364.6	1742	1365	1772	1365.1
1653	1364.7	1683	1364.5	1713	1364.8	1743	1364.8	1773	1364.9
1654	1364.7	1684	1364.5	1714	1365	1744	1364.6	1774	1364.9
1655	1364.7	1685	1364.5	1715	1365.2	1745	1364.6	1775	1365
1656	1364.6	1686	1364.5	1716	1365.4	1746	1364.7	1776	1365.2
1657	1364.5	1687	1364.5	1717	1365.4	1747	1365	1777	1365.4
1658	1364.4	1688	1364.5	1718	1365.3	1748	1365.4	1778	1365.5
1659	1364.4	1689	1364.5	1719	1365.1	1749	1365.7	1779	1365.5
1660	1364.5	1690	1364.4	1720	1364.9	1750	1365.7	1780	1365.4
1661	1364.6	1691	1364.4	1721	1364.7	1751	1365.6	1781	1365.2
1662	1364.6	1692	1364.4	1722	1364.6	1752	1365.3	1782	1365
1663	1364.5	1693	1364.4	1723	1364.6	1753	1365.1	1783	1364.8
1664	1364.4	1694	1364.4	1724	1364.8	1754	1365	1784	1364.8
1665	1364.3	1695	1364.5	1725	1365	1755	1364.9	1785	1364.9
1666	1364.2	1696	1364.5	1726	1365.3	1756	1365	1786	1364.9
1667	1364.2	1697	1364.5	1727	1365.6	1757	1365.1	1787	1365
1668	1364.2	1698	1364.5	1728	1365.6	1758	1365.2	1788	1365.1
1669	1364.3	1699	1364.5	1729	1365.5	1759	1365.4	1789	1365.2
1670	1364.3	1700	1364.5	1730	1365.3	1760	1365.4	1790	1365.2
1671	1364.4	1701	1364.5	1731	1365	1761	1365.4	1791	1365.1
1672	1364.4	1702	1364.6	1732	1364.9	1762	1365.3	1792	1365
1673	1364.5	1703	1364.7	1733	1364.8	1763	1365.1	1793	1364.9
1674	1364.6	1704	1364.7	1734	1364.9	1764	1365	1794	1364.8
1675	1364.7	1705	1364.7	1735	1364.9	1765	1364.9	1795	1364.7
1676	1364.7	1706	1364.7	1736	1365.1	1766	1365	1796	1364.7
1677	1364.7	1707	1364.7	1737	1365.2	1767	1365.1	1797	1364.7
1678	1364.7	1708	1364.6	1738	1365.3	1768	1365.3	1798	1364.7
1679	1364.6	1709	1364.6	1739	1365.3	1769	1365.4	1799	1364.8
1680	1364.6	1710	1364.5	1740	1365.3	1770	1365.4	1800	1364.9

Tiempo (años)	TSI
1801	1365.1
1802	1365.1
1803	1365.1
1804	1365.1
1805	1365
1806	1364.9
1807	1364.8
1808	1364.7
1809	1364.6
1810	1364.6
1811	1364.6
1812	1364.7
1813	1364.8
1814	1364.9
1815	1365
1816	1365.1
1817	1365.1
1818	1365
1819	1365
1820	1364.9
1821	1364.7
1822	1364.7
1823	1364.7
1824	1364.9
1825	1365.1
1826	1365.4
1827	1365.6
1828	1365.7
1829	1365.6
1830	1365.5

Tiempo (años)	TSI
1831	1365.4
1832	1365.3
1833	1365.3
1834	1365.4
1835	1365.5
1836	1365.7
1837	1365.8
1838	1365.8
1839	1365.7
1840	1365.6
1841	1365.4
1842	1365.2
1843	1365.2
1844	1365.2
1845	1365.3
1846	1365.5
1847	1365.6
1848	1365.7
1849	1365.8
1850	1365.7
1851	1365.6
1852	1365.5
1853	1365.3
1854	1365.2
1855	1365.1
1856	1365.2
1857	1365.3
1858	1365.4
1859	1365.6
1860	1365.7

Tiempo (años)	TSI
1861	1365.7
1862	1365.6
1863	1365.5
1864	1365.3
1865	1365.2
1866	1365.2
1867	1365.2
1868	1365.4
1869	1365.5
1870	1365.7
1871	1365.8
1872	1365.7
1873	1365.6
1874	1365.4
1875	1365.2
1876	1365.1
1877	1365
1878	1365
1879	1365.1
1880	1365.2
1881	1365.4
1882	1365.5
1883	1365.6
1884	1365.5
1885	1365.4
1886	1365.3
1887	1365.1
1888	1365.1
1889	1365.1
1890	1365.2

Tiempo (años)	TSI
1891	1365.4
1892	1365.5
1893	1365.7
1894	1365.7
1895	1365.7
1896	1365.5
1897	1365.4
1898	1365.2
1899	1365.1
1900	1365
1901	1365
1902	1365.1
1903	1365.2
1904	1365.4
1905	1365.5
1906	1365.6
1907	1365.6
1908	1365.5
1909	1365.4
1910	1365.2
1911	1365
1912	1365
1913	1365
1914	1365.2
1915	1365.4
1916	1365.6
1917	1365.8
1918	1365.8
1919	1365.7
1920	1365.5

Tiempo (años)	TSI
1921	1365.3
1922	1365.2
1923	1365.2
1924	1365.2
1925	1365.4
1926	1365.6
1927	1365.7
1928	1365.7
1929	1365.6
1930	1365.4
1931	1365.3
1932	1365.1
1933	1365.1
1934	1365.2
1935	1365.5
1936	1365.9
1937	1366.1
1938	1366.2
1939	1366.1
1940	1365.9
1941	1365.7
1942	1365.5
1943	1365.5
1944	1365.5
1945	1365.7
1946	1366
1947	1366.2
1948	1366.3
1949	1366.2
1950	1366

Tiempo (años)	TSI
1951	1365.7
1952	1365.5
1953	1365.4
1954	1365.5
1955	1365.8
1956	1366.2
1957	1366.5
1958	1366.6
1959	1366.5
1960	1366.3
1961	1365.9
1962	1365.6
1963	1365.4
1964	1365.4
1965	1365.5
1966	1365.7
1967	1365.9
1968	1366.1
1969	1366.2
1970	1366.2
1971	1366.1
1972	1365.9
1973	1365.7
1974	1365.5
1975	1365.5
1976	1365.6
1977	1365.8
1978	1366.1
1979	1366.3
1980	1366.5

Tiempo (años)	TSI
1981	1366.5
1982	1366.3
1983	1366
1984	1365.7
1985	1365.5

Rayos C3smicos

(Usoskin , et al. 2002; Usoskin, et al., 2005; Alanko-Huotari, et al., 2006)

(**Extraídos de:** ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/climate_forcing/solar_variability/usoskin-cosmic-ray.txt)

Tiempo (años)	RC
1501	98.900856
1502	97.649005
1503	96.840054
1504	96.786446
1505	97.512593
1506	98.758608
1507	100.0968
1508	101.10601
1509	101.52327
1510	101.31601
1511	100.66746
1512	99.893965
1513	99.321067
1514	99.161823
1515	99.447387
1516	100.03596
1517	100.68868
1518	101.17234
1519	101.34241
1520	101.17715
1521	100.76109
1522	100.23582
1523	99.743923
1524	99.389349
1525	99.224975
1526	99.260975
1527	99.477894
1528	99.831467
1529	100.24833
1530	100.62289
1531	100.8282
1532	100.74654

Tiempo (años)	RC
1533	100.31369
1534	99.561521
1535	98.637799
1536	97.783494
1537	97.261668
1538	97.258184
1539	97.796809
1540	98.712133
1541	99.701268
1542	100.43673
1543	100.68752
1544	100.39303
1545	99.664458
1546	98.721035
1547	97.791917
1548	97.031129
1549	96.487651
1550	96.138803
1551	95.955992
1552	95.955157
1553	96.197731
1554	96.740892
1555	97.56879
1556	98.550674
1557	99.458499
1558	100.04159
1559	100.12174
1560	99.663858
1561	98.794521
1562	97.761988
1563	96.850826
1564	96.284539

Tiempo (años)	RC
1565	96.157982
1566	96.42501
1567	96.938927
1568	97.52223
1569	98.033939
1570	98.407573
1571	98.648025
1572	98.794339
1573	98.870407
1574	98.852052
1575	98.672682
1576	98.270758
1577	97.658104
1578	96.970352
1579	96.459364
1580	96.409407
1581	97.000554
1582	98.18162
1583	99.626985
1584	100.82336
1585	101.26054
1586	100.63611
1587	98.997636
1588	96.783776
1589	94.715613
1590	93.532274
1591	93.69106
1592	95.179491
1593	97.498921
1594	99.833576
1595	101.35835
1596	101.52744

Tiempo (años)	RC
1597	100.2235
1598	97.792211
1599	94.97594
1600	92.685644
1601	91.664244
1602	92.224297
1603	94.155404
1604	96.791753
1605	99.241683
1606	100.71424
1607	100.77086
1608	99.41617
1609	97.079489
1610	94.501311
1611	92.495583
1612	91.668528
1613	92.238895
1614	94.004806
1615	96.425943
1616	98.80161
1617	100.49561
1618	101.10847
1619	100.54596
1620	99.019142
1621	97.006165
1622	95.148063
1623	94.06613
1624	94.162179
1625	95.481785
1626	97.682328
1627	100.13118
1628	102.12623

Tiempo (años)	RC
1629	103.13945
1630	102.96419
1631	101.7493
1632	99.958106
1633	98.24235
1634	97.22402
1635	97.265729
1636	98.339574
1637	100.04935
1638	101.80285
1639	103.06446
1640	103.56052
1641	103.34844
1642	102.74658
1643	102.16223
1644	101.88656
1645	101.96543
1646	102.22592
1647	102.43595
1648	102.48736
1649	102.48424
1650	102.68071
1651	103.29979
1652	104.34471
1653	105.53469
1654	106.42218
1655	106.6191
1656	105.99884
1657	104.79028
1658	103.52584
1659	102.82213
1660	103.0687

Tiempo (años)	RC
1661	104.20561
1662	105.73589
1663	106.97255
1664	107.36465
1665	106.72237
1666	105.29075
1667	103.67961
1668	102.6195
1669	102.60581
1670	103.63647
1671	105.21056
1672	106.58828
1673	107.14645
1674	106.62618
1675	105.21443
1676	103.48934
1677	102.20946
1678	101.97955
1679	102.96371
1680	104.80672
1681	106.79914
1682	108.19078
1683	108.46462
1684	107.4604
1685	105.40411
1686	102.88826
1687	100.72439
1688	99.645346
1689	100.00851
1690	101.65948
1691	104.00372
1692	106.25782

Tiempo (años)	RC
1693	107.761
1694	108.17413
1695	107.51267
1696	106.08695
1697	104.38943
1698	102.91943
1699	101.99864
1700	101.6818
1701	101.80711
1702	102.13757
1703	102.50278
1704	102.868
1705	103.30794
1706	103.91362
1707	104.69145
1708	105.5135
1709	106.1454
1710	106.33104
1711	105.88789
1712	104.77893
1713	103.15114
1714	101.33188
1715	99.766806
1716	98.90038
1717	99.033406
1718	100.2044
1719	102.13543
1720	104.28141
1721	105.99323
1722	106.72565
1723	106.19118
1724	104.44271

Tiempo (años)	RC
1725	101.91294
1726	99.351287
1727	97.58041
1728	97.162942
1729	98.172757
1730	100.17129
1731	102.39
1732	104.04726
1733	104.63227
1734	104.02671
1735	102.48843
1736	100.5521
1737	98.847467
1738	97.875837
1739	97.850033
1740	98.661938
1741	99.959624
1742	101.28363
1743	102.20965
1744	102.45405
1745	101.92795
1746	100.7512
1747	99.230178
1748	97.783007
1749	96.811207
1750	96.560397
1751	97.03255
1752	97.989167
1753	99.046691
1754	99.826008
1755	100.08948
1756	99.809044

Tiempo (años)	RC
1757	99.147639
1758	98.367748
1759	97.703475
1760	97.253653
1761	96.950703
1762	96.622713
1763	96.116971
1764	95.420329
1765	94.709971
1766	94.297264
1767	94.480216
1768	95.373092
1769	96.801174
1770	98.325891
1771	99.404474
1772	99.606279
1773	98.780557
1774	97.123479
1775	95.13281
1776	93.448019
1777	92.627969
1778	92.969901
1779	94.430767
1780	96.645814
1781	99.032704
1782	100.96342
1783	101.94177
1784	101.72007
1785	100.35192
1786	98.205698
1787	95.910303
1788	94.186555

Tiempo (años)	RC
1789	93.608985
1790	94.41407
1791	96.423917
1792	99.099093
1793	101.72265
1794	103.65248
1795	104.50851
1796	104.22605
1797	103.02286
1798	101.33067
1799	99.681888
1800	98.54966
1801	98.197957
1802	98.611904
1803	99.538106
1804	100.61788
1805	101.55476
1806	102.23431
1807	102.73644
1808	103.23705
1809	103.85274
1810	104.51992
1811	104.98848
1812	104.94037
1813	104.16566
1814	102.70981
1815	100.92627
1816	99.384645
1817	98.642536
1818	98.991689
1819	100.31609
1820	102.12985

Tiempo (años)	RC
1821	103.77692
1822	104.68915
1823	104.56968
1824	103.45569
1825	101.69254
1826	99.826537
1827	98.411655
1828	97.796942
1829	98.001132
1830	98.728586
1831	99.510098
1832	99.903954
1833	99.67011
1834	98.853913
1835	97.759698
1836	96.82264
1837	96.421721
1838	96.714916
1839	97.570939
1840	98.623204
1841	99.418085
1842	99.588498
1843	98.981886
1844	97.711224
1845	96.126878
1846	94.711555
1847	93.922255
1848	94.036411
1849	95.056078
1850	96.695471
1851	98.461729
1852	99.814798

Tiempo (años)	RC
1853	100.34503
1854	99.896928
1855	98.613414
1856	96.902146
1857	95.318127
1858	94.383944
1859	94.420036
1860	95.450663
1861	97.201538
1862	99.181816
1863	100.83216
1864	101.6891
1865	101.50747
1866	100.32503
1867	98.477805
1868	96.541001
1869	95.163303
1870	94.839175
1871	95.725344
1872	97.576453
1873	99.826624
1874	101.80239
1875	102.97165
1876	103.10082
1877	102.28031
1878	100.85636
1879	99.296542
1880	98.017801
1881	97.249127
1882	96.998008
1883	97.123939
1884	97.461807

Tiempo (años)	RC
1885	97.920889
1886	98.508018
1887	99.269903
1888	100.19649
1889	101.15101
1890	101.87827
1891	102.09564
1892	101.62279
1893	100.49212
1894	98.991928
1895	97.604027
1896	96.832915
1897	96.994653
1898	98.068989
1899	99.686466
1900	101.26587
1901	102.24464
1902	102.28719
1903	101.39114
1904	99.88485
1905	98.319586
1906	97.26468
1907	97.080372
1908	97.777022
1909	99.018894
1910	100.26519
1911	100.98721
1912	100.86605
1913	99.903932
1914	98.433436
1915	97.014607
1916	96.223525

Tiempo (años)	RC
1917	96.406301
1918	97.512203
1919	99.085416
1920	100.43553
1921	100.91919
1922	100.19617
1923	98.371523
1924	95.999031
1925	93.9047
1926	92.85468
1927	93.23822
1928	94.917257
1929	97.272357
1930	99.431385
1931	100.5972
1932	100.30814
1933	98.557191
1934	95.816352
1935	92.944307
1936	90.907184
1937	90.406256
1938	91.607168
1939	94.048199
1940	96.762246
1941	98.650986
1942	98.943848
1943	97.482649
1944	94.782216
1945	91.869879
1946	89.869737
1947	89.530133
1948	90.977579

Tiempo (años)	RC
1949	93.725508
1950	96.870696
1951	99.441538
1952	100.7355
1953	100.46578
1954	98.749282
1955	96.059326
1956	93.143206
1957	90.837634
1958	89.816091
1959	90.382752
1960	92.365796
1961	95.122291
1962	97.717915
1963	99.271748
1964	99.278798
1965	97.762631
1966	95.272925
1967	92.722277
1968	91.046762
1969	90.845703
1970	92.18864
1971	94.614284
1972	97.295022
1973	99.342489
1974	100.11948
1975	99.408902
1976	97.44441
1977	94.853718
1978	92.480702
1979	91.091201
1980	91.099206

Tiempo (años)	RC
1981	92.431457
1982	94.547141
1983	96.619221
1984	97.846216
1985	97.749411

Baricentro

(Extraídos de: <http://landscheidt.wordpress.com/6000-year-ephemeris/>)

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1501	12.5451	1.5267
1502	38.8306	1.4318
1503	67.3256	1.3182
1504	97.9736	1.2225
1505	129.9203	1.174
1506	161.5442	1.1789
1507	191.4247	1.2256
1508	219.2303	1.2888
1509	245.1728	1.3385
1510	269.7326	1.3486
1511	293.8365	1.3056
1512	318.0933	1.1919
1513	343.361	1.008
1514	55.7888	0.7677
1515	48.1323	0.5097
1516	109.0701	0.3478
1517	176.6352	0.4526
1518	217.0366	0.7218
1519	244.3802	1.0182
1520	267.4033	1.3012
1521	288.7949	1.5525
1522	309.6478	1.7574
1523	330.4487	1.9022
1524	316.9104	1.9723
1525	12.6155	1.9589
1526	33.9578	1.8626
1527	55.4587	1.6973
1528	77.4308	1.4781
1529	100.2427	1.2259
1530	124.7489	0.9594

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1531	153.6307	0.6952
1532	193.2919	0.4664
1533	252.8926	0.3609
1534	312.8184	0.4555
1535	230.8901	0.6553
1536	25.9793	0.8653
1537	54.2824	1.0491
1538	81.1268	1.194
1539	107.235	1.2973
1540	132.9225	1.3666
1541	158.3886	1.4089
1542	183.7937	1.4352
1543	209.2564	1.4521
1544	234.8775	1.46
1545	260.7141	1.46
1546	286.8126	1.4453
1547	313.1764	1.4101
1548	339.9666	1.3449
1549	95.7612	1.2449
1550	34.1752	1.1121
1551	62.1756	0.9534
1552	92.1289	0.7815
1553	126.5626	0.6159
1554	169.4175	0.4922
1555	220.4064	0.4702
1556	267.9092	0.5751
1557	305.4345	0.7638
1558	336.1962	0.9864
1559	131.7546	1.2108
1560	29.1055	1.4137

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1561	53.6475	1.5753
1562	77.4159	1.6853
1563	100.5832	1.739
1564	123.2922	1.7403
1565	145.8026	1.6938
1566	168.4263	1.6081
1567	191.5867	1.4882
1568	215.9863	1.3384
1569	242.1954	1.1656
1570	271.0766	0.9806
1571	304.3601	0.7999
1572	294.6468	0.652
1573	29.803	0.5767
1574	76.4706	0.5924
1575	117.7806	0.6757
1576	153.1881	0.7871
1577	184.5905	0.9045
1578	213.7229	1.0203
1579	241.5876	1.1348
1580	268.7374	1.2496
1581	295.4533	1.3651
1582	321.7924	1.4767
1583	347.4051	1.5727
1584	12.4895	1.6426
1585	37.2639	1.6767
1586	61.1989	1.6608
1587	84.3102	1.5996
1588	106.8572	1.4907
1589	129.0131	1.3379
1590	151.148	1.144

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1591	174.3806	0.9117
1592	201.167	0.6464
1593	241.3105	0.3776
1594	301.7954	0.2688
1595	28.2614	0.4851
1596	62.5812	0.7999
1597	88.584	1.0991
1598	111.8528	1.3501
1599	133.7872	1.5384
1600	155.0153	1.6593
1601	175.9783	1.7148
1602	197.1101	1.7123
1603	218.906	1.6551
1604	241.9056	1.5512
1605	266.8153	1.4119
1606	294.3679	1.2533
1607	325.3135	1.0995
1608	179.8771	0.9782
1609	36.3697	0.912
1610	71.7516	0.8978
1611	104.3703	0.9085
1612	134.1474	0.9139
1613	162.1924	0.8924
1614	190.2183	0.835
1615	220.4929	0.7452
1616	256.4134	0.6482
1617	300.5475	0.6016
1618	263.8693	0.6794
1619	28.0377	0.8844
1620	60.1792	1.157

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1621	87.022	1.4385
1622	110.6544	1.6897
1623	132.1969	1.8874
1624	152.3116	2.0182
1625	171.4624	2.0753
1626	190.0104	2.0553
1627	208.2713	1.9547
1628	226.599	1.7684
1629	245.0624	1.4978
1630	263.5459	1.1499
1631	281.9627	0.7378
1632	297.5043	0.288
1633	168.0361	0.1807
1634	161.7555	0.6012
1635	179.3779	0.9812
1636	197.2009	1.2964
1637	215.1373	1.5389
1638	233.3342	1.7056
1639	252.104	1.7942
1640	271.784	1.8042
1641	292.8161	1.739
1642	315.7411	1.6038
1643	341.3013	1.4158
1644	69.6918	1.209
1645	44.3061	1.0339
1646	81.8384	0.9416
1647	119.091	0.9512
1648	152.4047	1.0295
1649	180.9783	1.1242
1650	206.0844	1.193

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1651	229.4196	1.2084
1652	252.2343	1.1589
1653	275.7081	1.0313
1654	301.6545	0.8282
1655	335.0744	0.5729
1656	47.2005	0.3691
1657	105.9398	0.4514
1658	149.6802	0.7582
1659	177.2666	1.102
1660	199.5422	1.423
1661	219.6403	1.7
1662	238.6997	1.9189
1663	257.3527	2.069
1664	275.9563	2.1397
1665	294.7417	2.1179
1666	313.8098	1.9995
1667	333.1301	1.7834
1668	304.1238	1.4796
1669	12.6207	1.1155
1670	33.1432	0.721
1671	59.6259	0.324
1672	181.396	0.134
1673	253.5439	0.4427
1674	276.0222	0.7693
1675	296.3543	1.0541
1676	316.73	1.2873
1677	337.7731	1.4604
1678	182.2234	1.5649
1679	22.864	1.5986
1680	47.1427	1.5678

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1681	72.7313	1.4904
1682	99.7093	1.3927
1683	128.1371	1.3008
1684	157.6677	1.236
1685	187.6044	1.2062
1686	217.0812	1.2085
1687	245.566	1.2263
1688	273.2326	1.24
1689	300.1942	1.2218
1690	326.8199	1.1608
1691	255.253	1.0463
1692	22.5212	0.8829
1693	55.0469	0.6923
1694	96.6879	0.5222
1695	150.5766	0.4618
1696	201.9279	0.5706
1697	239.5526	0.7857
1698	268.4804	1.0353
1699	293.4495	1.2862
1700	316.6599	1.5141
1701	339.1352	1.7038
1702	159.1284	1.8363
1703	23.3729	1.8966
1704	45.2634	1.884
1705	66.9862	1.7988
1706	88.6109	1.6537
1707	110.4067	1.4636
1708	132.8756	1.2405
1709	156.9583	0.9945
1710	184.7861	0.7391

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1711	221.9802	0.4999
1712	280.5156	0.3599
1713	261.6929	0.4355
1714	29.6433	0.6464
1715	61.9523	0.874
1716	89.8163	1.0751
1717	115.7016	1.2349
1718	140.548	1.3519
1719	164.8647	1.4312
1720	189.0277	1.4788
1721	213.3338	1.5042
1722	238.0344	1.51
1723	263.2997	1.5007
1724	289.2152	1.4752
1725	315.7556	1.4326
1726	342.7851	1.3674
1727	59.4316	1.2778
1728	37.6221	1.1633
1729	65.4212	1.0279
1730	94.0863	0.8781
1731	124.9831	0.7222
1732	161.1265	0.5771
1733	205.9773	0.4809
1734	256.668	0.4914
1735	302.0326	0.6211
1736	338.0879	0.8252
1737	82.2199	1.0565
1738	35.2557	1.2818
1739	60.4748	1.4773
1740	84.4877	1.6245

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1741	107.5862	1.7167
1742	130.0391	1.7551
1743	152.1139	1.7392
1744	174.1868	1.6775
1745	196.6579	1.5747
1746	220.074	1.434
1747	245.1022	1.2636
1748	272.7236	1.0728
1749	304.3596	0.8786
1750	317.209	0.7112
1751	25.8049	0.6105
1752	72.1038	0.602
1753	114.0858	0.6652
1754	149.9603	0.7574
1755	181.9914	0.8523
1756	211.9664	0.9421
1757	241.1203	1.0295
1758	269.9466	1.1221
1759	298.5934	1.2249
1760	326.8662	1.3395
1761	245.9987	1.4584
1762	21.1987	1.5679
1763	46.7501	1.6518
1764	71.0593	1.6956
1765	94.1172	1.6938
1766	116.1279	1.6422
1767	137.3344	1.5385
1768	158.153	1.3827
1769	179.0675	1.1741
1770	200.9767	0.9138

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1771	226.2534	0.6076
1772	270.8607	0.2871
1773	117.3353	0.248
1774	73.2258	0.5768
1775	100.3797	0.9307
1776	123.0564	1.2421
1777	144.102	1.4912
1778	164.3133	1.6685
1779	184.175	1.7745
1780	204.0801	1.8095
1781	224.4763	1.7789
1782	245.8603	1.6862
1783	268.8583	1.5384
1784	294.3214	1.3504
1785	323.3481	1.1455
1786	209.2234	0.9627
1787	35.5435	0.8475
1788	75.0003	0.8237
1789	110.8933	0.8659
1790	141.9691	0.9256
1791	169.5246	0.9635
1792	195.6191	0.9582
1793	221.9608	0.9015
1794	250.7163	0.7984
1795	285.7432	0.6752
1796	330.9029	0.5994
1797	45.5167	0.6664
1798	62.6805	0.8811
1799	94.7167	1.1664
1800	120.8501	1.4548

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1801	143.6163	1.7104
1802	164.3437	1.9099
1803	183.7892	2.0427
1804	202.4575	2.1011
1805	220.7165	2.0764
1806	238.8425	1.9655
1807	256.9923	1.7627
1808	275.2007	1.4696
1809	293.1713	1.0959
1810	309.8301	0.6645
1811	305.1366	0.2195
1812	191.0716	0.2632
1813	195.7744	0.6768
1814	211.68	1.0454
1815	228.6529	1.3532
1816	246.2819	1.5931
1817	264.4932	1.759
1818	283.401	1.8456
1819	303.3853	1.8511
1820	324.7862	1.7764
1821	343.0578	1.6292
1822	13.5751	1.4292
1823	42.4058	1.2152
1824	75.3542	1.0338
1825	111.8476	0.9328
1826	148.5283	0.9279
1827	181.8192	0.9904
1828	210.9496	1.0729
1829	237.1498	1.1344
1830	261.8535	1.1473

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1831	286.3856	1.0958
1832	312.0573	0.9718
1833	341.1009	0.7831
1834	38.7174	0.5688
1835	75.2528	0.4428
1836	135.4535	0.5492
1837	175.8013	0.8162
1838	203.814	1.1185
1839	226.8955	1.407
1840	247.8228	1.661
1841	267.7484	1.864
1842	287.3355	2.0033
1843	306.9037	2.0648
1844	326.635	2.0333
1845	346.5228	1.9074
1846	70.6039	1.6914
1847	26.5179	1.4025
1848	46.7984	1.066
1849	68.349	0.7044
1850	97.2752	0.3427
1851	200.2827	0.1436
1852	280.4161	0.4028
1853	306.6414	0.7227
1854	328.6801	1.0128
1855	330.5638	1.2597
1856	12.4046	1.45
1857	35.114	1.5729
1858	58.2932	1.6251
1859	82.076	1.6136
1860	106.5591	1.5573

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1861	131.8677	1.4748
1862	158.2257	1.3852
1863	185.6786	1.3033
1864	214.1679	1.2393
1865	243.3421	1.1944
1866	272.8371	1.1633
1867	302.3414	1.1336
1868	331.7795	1.0886
1869	164.0812	1.0187
1870	31.5012	0.9176
1871	63.3768	0.7943
1872	98.8226	0.6695
1873	140.0718	0.5812
1874	185.5685	0.5759
1875	228.2924	0.6735
1876	264.219	0.8476
1877	294.4547	1.0606
1878	321.1605	1.2819
1879	346.0734	1.49
1880	39.5802	1.6629
1881	33.2539	1.7825
1882	55.9696	1.8363
1883	78.1584	1.8245
1884	99.9302	1.7504
1885	121.4763	1.6237
1886	143.1732	1.4533
1887	165.5594	1.2459
1888	189.6281	1.0089
1889	217.501	0.7528
1890	255.1037	0.5056

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1891	315.0012	0.3606
1892	65.3974	0.4457
1893	64.6737	0.6692
1894	96.1533	0.9036
1895	123.048	1.1071
1896	148.0986	1.2684
1897	172.1647	1.3859
1898	195.7237	1.4638
1899	219.3827	1.5096
1900	243.4895	1.5293
1901	268.3018	1.5282
1902	293.9464	1.5092
1903	320.4039	1.4714
1904	332.6796	1.4156
1905	14.8439	1.3396
1906	42.2004	1.2436
1907	69.4115	1.1288
1908	96.6786	0.997
1909	124.7225	0.8505
1910	155.1896	0.6948
1911	191.5388	0.5459
1912	238.7754	0.4494
1913	292.8005	0.48
1914	338.3931	0.6451
1915	42.8005	0.8805
1916	42.1759	1.1315
1917	68.0871	1.3633
1918	92.2217	1.5533
1919	115.1202	1.6878
1920	137.3231	1.7646

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1921	159.0217	1.7847
1922	180.4467	1.7478
1923	202.1892	1.6621
1924	224.7416	1.5312
1925	248.7821	1.3604
1926	275.2059	1.1611
1927	305.4322	0.9504
1928	326.5979	0.7615
1929	24.2332	0.6383
1930	70.0692	0.6144
1931	111.8565	0.6697
1932	147.5291	0.7554
1933	179.105	0.837
1934	208.8955	0.9037
1935	238.382	0.9584
1936	268.4562	1.0131
1937	299.1668	1.0829
1938	330.0413	1.179
1939	177.7168	1.3018
1940	29.1039	1.4399
1941	56.203	1.5719
1942	81.2566	1.6767
1943	104.6107	1.7405
1944	126.5273	1.7555
1945	147.3723	1.7115
1946	167.4835	1.609
1947	187.2826	1.443
1948	207.1575	1.2122
1949	227.7707	0.9173
1950	250.8493	0.5654

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1951	263.5018	0.1962
1952	78.407	0.2793
1953	113.387	0.6785
1954	135.549	1.05
1955	155.7211	1.3644
1956	175.0436	1.6093
1957	193.9749	1.7796
1958	212.8888	1.8745
1959	232.1334	1.8948
1960	252.2741	1.8391
1961	273.6478	1.7126
1962	296.7565	1.5245
1963	322.6757	1.2915
1964	249.3575	1.0488
1965	29.3622	0.8487
1966	71.3487	0.7505
1967	112.6442	0.7708
1968	147.712	0.8574
1969	177.006	0.9484
1970	202.9666	1.0041
1971	227.7536	1.0065
1972	253.1937	0.9487
1973	281.5628	0.8361
1974	316.5415	0.6964
1975	170.0709	0.605
1976	53.4635	0.666
1977	95.5237	0.8817
1978	127.1016	1.1656
1979	152.6149	1.4512
1980	174.9495	1.7047

Tiempo (años)	Baricentro (Longitud)	Baricentro Distancia)
1981	195.3855	1.904
1982	214.5915	2.0359
1983	233.2266	2.0929
1984	251.6369	2.063
1985	270.0392	1.9414

Apéndice B

Lazo De Amarre De Fase (PLL)

Introducción

Un lazo de amarre de fase (PLL, phase locked loop) es un circuito capaz de generar una oscilación cuya fase con respecto a una señal de entrada se mantiene acotada, contando para ello con una realimentación que compara la fase de las dos señales y actúa modificando la frecuencia de la oscilación generada. En la figura B1 se muestra un esquema simplificado del PLL.

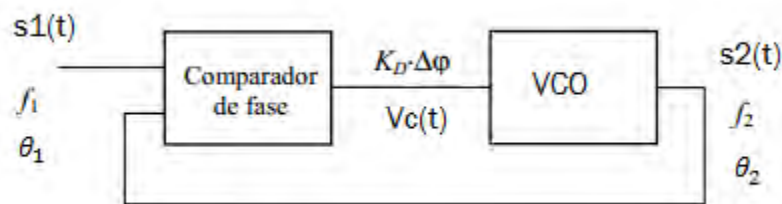


Figura B1. Diagrama esquemático de un lazo de amarre de fase

El comparador de fase produce una señal $K_D \Delta \phi$ proporcional a la diferencia de fase entre la señal de entrada $S1(t)$ y la señal $S2(t)$ generada por el oscilador controlado por voltaje (VCO, voltage-controlled oscillator) la cual se aplica a la entrada del VCO. El VCO produce una señal con una frecuencia $f2$ que varía linealmente con $Vc(t)$ (Leal Silva, 1997).

El PLL se encadena cuando la señal $Vc(t)$ es tal que, aplicada al VCO, hace que éste oscile exactamente a la misma frecuencia que la entrada.

Análisis del PLL en el dominio del tiempo

En la figura B2 se muestra el diagrama a bloques del PLL. La comparación de fase se realiza mediante un multiplicador y un filtro paso bajas. Si suponemos que las señales de entrada al comparador son:

$$s1(t) = S_1 \cos(\omega_1 t) . \quad (B.1)$$

$$s2(t) = S_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_0) . \quad (B.2)$$

Entonces la multiplicación de estas señales es:

$$Vd(t) = s1(t)s2(t) = S_1 \cos(\omega_1 t) S_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_0) . \quad (B.3)$$

$$Vd(t) = \frac{S_1 S_2}{2} [\sin((\omega_2 - \omega_1)t + \varphi_0) + \sin((\omega_2 + \omega_1)t + \varphi_0)] . \quad (B.4)$$

Suponemos que el PLL está encadenado cuando la frecuencia de salida del VCO y la frecuencia de la señal de entrada al PLL son iguales $\omega_2 = \omega_1$

$$Vd(t) = \frac{s_1 s_2}{2} [\text{sen}(\varphi_0) + \text{sen}((2\omega_2)t + \varphi_0)] . \quad (\text{B.5})$$

La señal $Vd(t)$ pasa a través del Filtro Pasa bajas (F.P.B.) el cual elimina el término de alta frecuencia $2\omega_2$

$$Vc(t) = \frac{s_1 s_2}{2} \text{sen}(\varphi_0) . \quad (\text{B.6})$$

Si el error de fase es pequeño entonces $\text{sen}(\varphi_0) \approx \varphi_0$, la señal de salida del filtro es proporcional a la diferencia de fase entre las dos señales.

$$Vc(t) = \frac{s_1 s_2}{2} \varphi_0 . \quad (\text{B.7})$$

$$Vc(t) = K_D \varphi_0 , \quad (\text{B.8})$$

donde $K_D = \frac{s_1 s_2}{2}$.

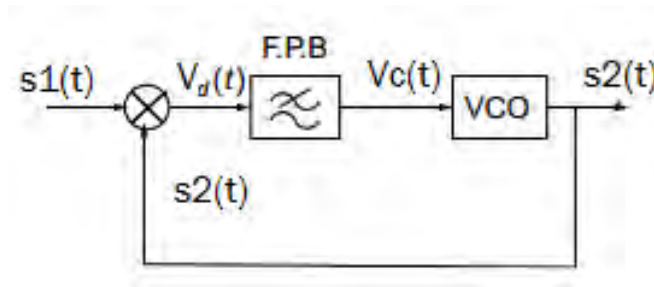


Figura B2. Diagrama a bloques del PLL.

El VCO es un oscilador que varía su frecuencia en función de la tensión aplicada a su entrada. La frecuencia instantánea del VCO será:

$$f_2(t) = f_0 + K_v Vc(t) , \quad (\text{B.9})$$

donde f_0 es la frecuencia central del VCO y K_v es la constante del VCO. La fase instantánea de salida del VCO está dada por:

$$\theta_2(t) = 2\pi K_v \int_0^t Vc(\tau) d(\tau) . \quad (\text{B.10})$$

Análisis del PLL en el dominio de la frecuencia

La transformada de Laplace nos permite encontrar la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia. En la figura B3 se muestra el diagrama en el dominio de la frecuencia.

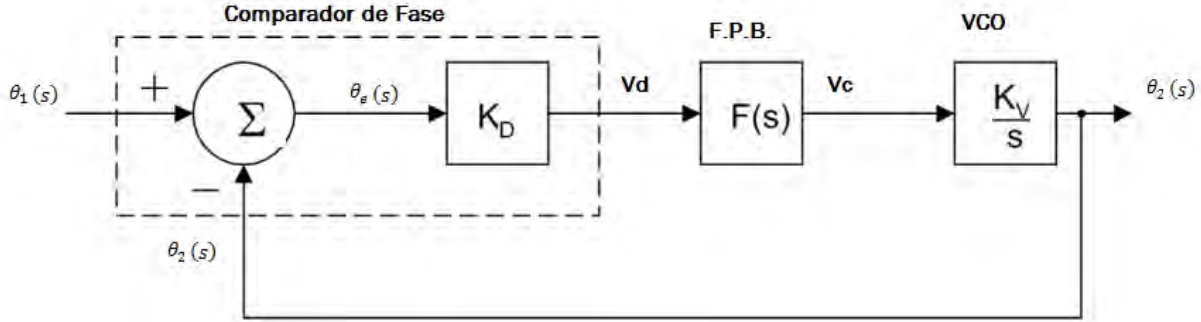


Figura B3. Diagrama del PLL en el dominio de la frecuencia.

Fase de entrada $\theta_1(s)$, fase de salida $\theta_2(s)$, error de fase $\theta_e(s)$, $F(s)$ es la función de transferencia del Filtro Paso Bajas y $\frac{K_v}{s}$ es la función de transferencia del VCO. La función de transferencia del PLL es la relación de la fase de salida entre la fase de entrada.

$$H(s) = \frac{\theta_2(t)}{\theta_1(t)} = \frac{K_v F(s)}{s + K_v F(s)} \quad (B.11)$$

El orden del PLL depende del orden del Filtro Paso Bajas que utilice (Leal Silva, 1997). En este trabajo utilizamos un filtro de primer orden, $F(s) = \frac{1}{1+s\tau}$, lo cual implica un PLL de segundo orden y esto nos da la siguiente función de transferencia del PLL:

$$H(s) = \frac{\theta_2(t)}{\theta_1(t)} = \frac{K_D K_v \frac{1}{1+s\tau}}{s + K_D K_v \frac{1}{1+s\tau}} = \frac{K_D K_v}{s^2 + s + K_D K_v} \quad (B.12)$$

Criterios de Estabilidad en el Tiempo

Si analizamos la función de transferencia de un sistema, en relación a sus polos y sus ceros, podemos predecir su comportamiento. Una función matemática "tiende a indefinirse" o en términos claros "tiende a infinito" si el denominador se va a cero. Esta es la forma de crear un polo. Una función matemática se "va a cero" si el numerador se va a cero. Esta es la manera de formar un cero.

Para un sistema de segundo orden, partiremos del ejemplo en el que su función de transferencia es:

$$H(s) = \frac{K_D K_v}{s^2 + s + K_D K_v} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \quad (B.13)$$

donde:

w_n es la Frecuencia natural sin amortiguamiento = $\sqrt{K_D K_v}$, ζ es el amortiguamiento.

$0 < \zeta < 1$ Subamortiguamiento.

$\zeta = 1$ Amortiguamiento crítico.

$\zeta > 1$ Sobre amortiguado.

$\zeta = 0$ No amortiguado (oscilador)

En la figura B4 se muestran la respuesta al escalón del PLL propuesto en este trabajo. Las características de desempeño de un sistema se especifican en términos de la respuesta transitoria para una entrada escalón.

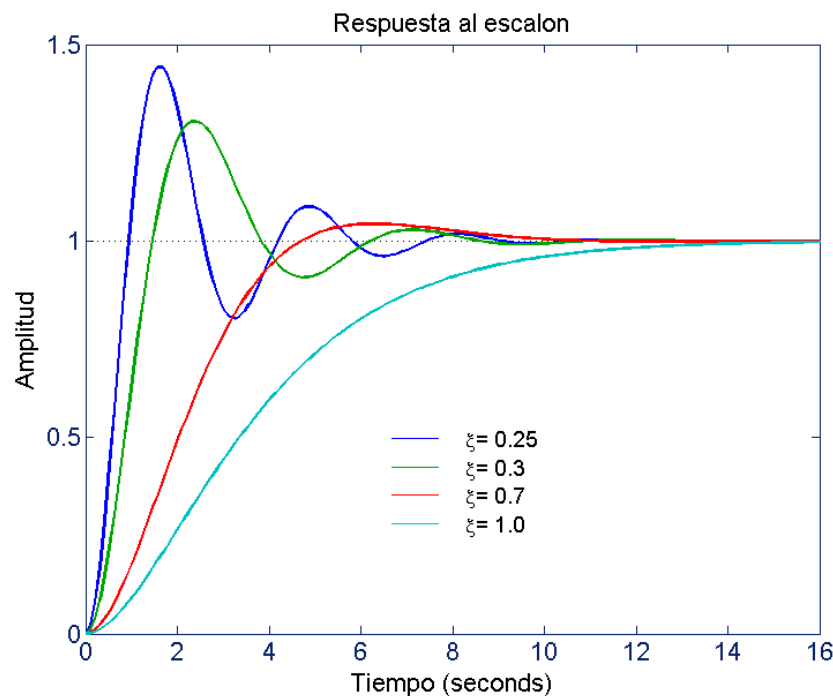


Figura B4. Curvas de respuesta al escalón unitario del PLL propuesto.

La respuesta transitoria para una entrada escalón unitario de un sistema exhibe oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estable. A continuación se definen las especificaciones de la respuesta transitoria:

- 1.- El tiempo de retardo t_d : es el tiempo para que la respuesta alcance la primera mitad del valor final.
- 2.- Tiempo de levantamiento t_r : tiempo para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% ó del 0 al 100% de su valor final.

3.- Tiempo pico, t_p : tiempo en el cual la respuesta alcanza el primer pico del máximo sobre impulso. $t_p = \frac{\pi}{\omega_n}$

4.- Máximo sobre impulso, M_p : es el valor pico máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad. $M_p = e^{\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}}$

5.- Tiempo de asentamiento, t_s : tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final y permanezca dentro de él. $t_s = \frac{C}{\zeta\pi\omega_n}$, C es 4 para un criterio de 2% o 3 para un criterio de 5 %

Criterio de Estabilidad de Bode

El criterio de estabilidad de Bode para la respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia, puede determinar los límites de estabilidad para lazos de control por retroalimentación aun cuando se incluya un tiempo muerto en el lazo. El criterio consiste en determinar la frecuencia a la cual el ángulo fase de la función de transferencia de lazo abierto es -180° ($-\pi$ radianes) y la Relación entre las Amplitudes para dicha frecuencia. El criterio de estabilidad de Bode determinado sobre la base de la respuesta de un sistema en el dominio de la frecuencia se puede establecer de la siguiente manera:

Para que un sistema sea estable, la Relación entre las Amplitudes debe ser menor que la unidad cuando el ángulo fase es -180° ($-\pi$ radianes). Es decir,

Si $AR < 1$ a un $\theta = -180^\circ$, el sistema es estable

Si $AR > 1$ a un $\theta = -180^\circ$, el sistema es inestable

La "Relación entre las amplitudes" o AR, entre las señales de salida y entrada es un factor de la amplitud de la señal de entrada que permite calcular la amplitud de la señal de salida).

El "Angulo fase" es la cantidad de radianes o grados de atraso o adelanto de la señal de salida con respecto a la señal de entrada. Cuando el ángulo fase es positivo expresa un adelanto mientras que cuando es negativo corresponde a un atraso.

En nuestro trabajo de investigación se estudió la estabilidad del PLL diseñado y se obtuvo el diagrama de Bode. Los resultados se muestran en la figura B5.

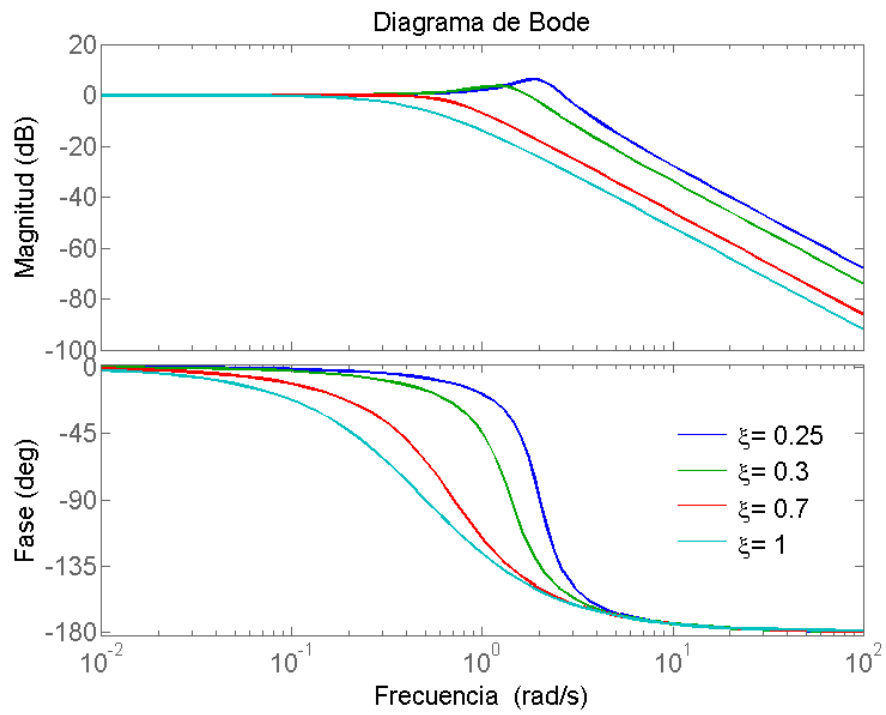


Figura B5. Diagrama de Bode del PLL propuesto.



Solar forcing on the ice winter severity index in the western Baltic region

M.C. Leal-Silva^a, V.M. Velasco Herrera^{b,*}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., Copacarán, 04510 México City, México

^b Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, D.F., Copacarán, 04510 México City, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 January 2012

Received in revised form

18 May 2012

Accepted 9 August 2012

Available online 3 September 2012

Keywords:

Cross-frequency coupling

Ice winter severity index

Wavelet transform

Solar activity

Barycentre motion

ABSTRACT

The Sun is the fundamental energy source of the Earth's climate and therefore its variations can contribute to natural climate variations. In the present work we study the variability of ice winter severity index in the Baltic Sea since the 15th century and its possible connection with solar activity. Based on a new method for finding and measuring amplitude-phase cross-frequency coupling in time series with a low signal/noise ratio, we suggest that the ice winter severity index in the Baltic Sea is modulated by solar activity and solar motion in several frequency bands during the last 500 years. According to our model a strong coupling between the decadal periodicity in the ice winter severity index time series and the secular periodicity of solar activity is present. We found that the ice winter severity index is strongly modulated by solar activity at the decadal periodicity. We also found that the 180 year periodicity of the Barycentre motion modulates the amplitudes of the decadal periodicity of solar activity and the ice winter severity index. This method represents a useful tool to study the solar-terrestrial relationship.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

The Baltic Sea is a semi-enclosed sea of about 415,000 km² connected to the North Sea and to the Atlantic Ocean (located from 10°E to 30°E and from 53°N to 66°N), see Fig. 1. The climate of the Baltic Sea basin is characterized by large seasonal contrasts, due to its geographical location, variable topography, and land-sea contrasts. The climate is influenced by major air pressure systems, particularly the North Atlantic Oscillation during wintertime, which affects the atmospheric circulation and precipitation in the Baltic Sea basin (Helkom, 2007).

Ice is a very important element in the climate system of the Baltic region since it can affect directly or indirectly many of the oceanographic, climatic, ecological, economical and cultural patterns (Mikelsone et al., 2008). The extent and the thickness of the winter ice cover and the duration of the season can characterize the ice climate in the Baltic Sea.

The study of ice winter condition in the Baltic Sea is of great importance since it is expected that even the smallest climatic change will be due to the impact of ice (Eriksson et al., 2007). Sea ice conditions are an indicator of the severity of the winter season (Haapala and Lepparanta, 1997). The Baltic Sea experiences a seasonal ice cover. The maximum ice area and the day of its occurrence vary from year to year depending on the

strength of the winter (Helkom, 2007). Unusual ice conditions have been documented since AD 690 but periodic recordings of ice observations started in the 16th century (Speerschneider, 1915).

The analyses of the 20th century time series have shown a tendency towards milder ice conditions. Jevrejeva et al. (2004) have shown a decrease of the probability of ice occurrence. Haapala and Lepparanta, 1997 have observed a diminution of the duration of the ice season in the Baltic Sea during 1889–1994 (1997).

In previous works it has been suggested that the increasing greenhouse gas (GHG) forcing may play a major role in diminishing the sea ice cover (Johannessen, 2008; Serreze et al., 2000; Stroeve et al., 2007) and has induced global warming. The ice conditions and the air surface temperature variations are not only caused by GHG, but are also caused by natural climate variations (Omstedt and Chen, 2001; Polyakov et al., 2002; Soon et al., 2011).

Jepy (2005) studied the influence of temperature on ice conditions; she found that temperature is an essential parameter for the formation of ice but it is not the only one. Jami et al. (1999) studied the ice cover fluctuations in relationship with solar activity from 1720 to 1992 confirming the 22-year oscillation, corresponding to the whole cycle of solar activity. Loewe and Koslowski (1998) analyzed the relation between ice winter severity and solar activity since 1879; they showed that the accumulated areal ice volume (AIV) is modulated for the 8 year periodicity and the most severe winters occurred when the solar activity was low.

* Corresponding author. Tel.: +52 56224113x18.

E-mail address: vmv@geofisica.unam.mx (V.M. Velasco Herrera).



Fig. 1. Geographical location of Western Baltic region.

The study of climate and climate change is important because it will affect people around the world in diverse ways (The BACC Author Team, 2008; Adams et al., 1990; Frumkin and McMichael, 2008). During the last years, the majority of Baltic Sea analysis focuses on increasing greenhouse gas (Wesslander et al., 2010; Vehviläinen and Hattunen, 1997).

Many efforts have been made in order to explain the Baltic region climate. The causes of the climate changes are usually complex and require research and modeling in order to attempt to understand them (The BACC Author Team, 2008). Hansson and Ormstedt (2008) provide a reconstruction of sea temperatures and they found that the late 20th century warming in the Baltic Sea region cannot be determined to be unprecedented over the past 500 years. Leijonhufvud et al. (2010) produced two new 500 year series taking advantage of the documentary records that reflect the sea ice conditions in the Stockholm Harbor. Shabalova and van Engelen (2003) presented a reconstruction of winter and summer temperatures in the Low Countries (the present-day Netherlands and Belgian Flanders), based upon documentary evidence. Jevrejeva (2001) presents the reconstructed severity of winter seasons in the northern Baltic Sea on the basis of historical time series of ice break-up at the port of Riga (1529–1990); he found a decreasing trend for the time series of ice break-up dates for severe winters. Tarand and Nordli (2001) also estimated the winter severity for the Tallin port using historical evidence (the first day of ice break-up in Tallin port, the first day of ice break-up on the river in Northern Estonia and the first day of rye harvest).

In this paper, we proposed to consider not only the fluctuations in ice winter in the western Baltic region due to greenhouse gases but also the secular solar variability and the Barycentre motion.

The Sun has an obvious effect on climate since its radiation is the main energy source for the outer envelopes of our planet. The Sun is a variable but the most obvious evidence for its variable activity is the appearance and disappearance of sunspots. Until now we still lack a fundamental understanding of all causal relationships between solar activity and climate (Bard and Frank, 2006).

The longest recorded aspects of solar variations are changes in sunspots. In the 17th century astronomers used the telescope to make observations of sunspots (Eddy, 1976). Direct irradiance measurements have only been available during the last three cycles and are based on a composite of many different observing satellites.

Some studies have suggested a long-term relationship between solar activity and Global climate (Eddy, 1976). The long-term behavior of solar activity can be reconstructed from the measured cosmogenic isotope content in terrestrial archives (Stuiver, 1961). Cosmogenic isotopes are produced in the Earth's atmosphere by energetic cosmic rays (CR) whose flux is modulated in the heliosphere by the turbulent heliospheric magnetic

field and variable solar wind, both being ultimately defined by solar magnetic activity (Usoskin et al., 2006).

Since there are no direct observational data to study the solar variability over long period of time scales, we have to rely on proxy data, for instance, cosmogenic isotopes such as Beryllium-10. The analysis of the cosmogenic isotopes record is more difficult than the analysis of the number of sunspots. This is due to the fact that the ^{14}C and ^{10}Be concentration reflects the production rate, which is modulated not only by the solar activity, but also by atmospheric transport and deposition processes (Beer et al., 1994).

Some authors have proposed that geophysical oscillations of different frequencies can interact with one another (Remmert and Wallace, 2009). The solar motion around the barycentre of the solar system has been claimed as one of the possible origins of solar variability (Jose, 1965; Charvátová, 1988). Many authors tried to explain the influence of the planets on sunspot numbers (Brown, 1900; Jose, 1965; Charvátová, 1988); they assume that the cause for periodicities in solar activity is the motion of the Sun around the mass center of the solar system; however, a clear physical mechanism has not been identified yet. It has been suggested that a 179-year periodicity (barycentre periodicity) modulates the amplitudes of the 11-year sunspot cycle (Cohen and Lintz, 1974). Charvátová and Štefčík (2004) have established the possible relationship between the solar motion and the climate phenomena.

There has been several manifestation of cross-frequency coupling between the geophysical time series. Many efforts have been made in order to identify and measure this type of coupling, but no method has been chosen as the gold standard for detecting the phenomena. In the amplitude–phase cross-frequency coupling the amplitude of a high-frequency oscillation is modulated by the phase of low-frequency rhythms (Vort et al., 2010; Canolty et al., 2006; Demiralp et al., 2007). This type of coupling has been observed in studies on brain oscillations, climate systems, electronic devices, etc. (Knyazev, 2011; Wei et al., 2007; Mokhov et al., 2011; Blasius and Stone, 2000).

Several methods are applied to find the coupling between different frequencies, but nevertheless each of them exhibits their own limitations. There are two main limitations in the actual methods: they are sensitive to variations in cross-frequency over time and on the other hand a frequency band must be specified before the method is applied (Cohen, 2008). Here we present a new method to study the cross-frequency coupling based on coherent demodulation and wavelet filtering transform. This method is able to detect and quantify the intensity of coupling even in signals with low signal/noise ratio and over-modulation. We present an example of its application, applying the method to analyze how the ice winter severity index is affected by the solar activity.

We firstly examine the link between the Ice Winter Severity Index (IWSIB) and ^{10}Be , using the coherent wavelet transform (CWT), to verify if any coherent relationship between these time series is present. Secondly we test the mechanism of how the secular periodicity of solar activity modulates the ice winter severity index and also how the Barycentre motion influences the 180 year periodicity.

2. Method and data

We used the annual time series of IWSIB data since 1501–1995 for the western Baltic region.

The data from the study of Koslowski and Glaser (1995, 1999) was obtained from the Historical Climatic Data Bank (<http://www.hskid.de/download.s>) and the 1400–1500 data obtained

from an ice winter severity index extension made by Koslowski and Schmelzer (2007) and by Schmelzer and Holfort (2011).

We also used the annual ¹⁰Be record for the 1424–1985 period, measured in an ice core from a site in Greenland (Beer et al., 1994), and the relationship between the Sun and the Solar System Barycentre (distance in solar radii, from 3000BC to 3000AD) [http://landscheidt.wordpress.com/6000-year-ephemeris/]. The time series are all of different lengths; we restrict analyses to the common period of 1424–1985 (Appendix B).

To study the behavior of the time series, it is necessary to find out its main periodicities. The power variations of each of these periodicities are obtained by applying the wavelet transform.

To obtain the wavelet transform of a time series, X_n , with equal time spacing δ_t and $n=0\dots N-1$, we need a wavelet function, $\psi_0(\eta)$, that depends on a nondimensional "time" parameter η (Torrence and Compo, 1998). Morlet wavelet is an example of a wavelet function and it consists of a plane wave modulated by a Gaussian:

$$\psi_0(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 \eta} e^{-\eta^2/2}$$

For $\psi_0(\eta)$ to be a mother wavelet, it must have finite energy and a zero mean (admissibility condition, $\omega_0 = 6$) (Farge, 1992). The continuous wavelet transform of a discrete sequence X_n is defined as the convolution of X_n with a scaled and translated version of $\psi_0(\eta)$.

$$W_n(s) = \sum_{m=0}^{N-1} X_m \psi^* \left[\frac{(n-m)\delta_t}{s} \right]$$

where s is the "dilation" parameter (scale), and n is the translation parameter (slide in time), $*$ denotes complex conjugated. The wavelet function $\psi_0(\eta)$ is complex, so the wavelet transform is also complex. The wavelet power spectrum is $|W_n(s)|^2$.

Since the wavelet transform is a band pass filter with a known response function. The reconstructed time series is just the sum of the real part of the wavelet transform over all scales (Torrence and Compo, 1998). The decomposition of a signal can be obtained from a time-scale filter. Time-scale filter is defined as

$$X_n = \frac{\delta_j \delta_t^{-1/2}}{C_0 \psi_0(0)} \sum_{j=0}^J \frac{\text{Re}\{W_n(s_j)\}}{s_j^{1/2}}$$

where δ_j is the factor for scale averaging, C_0 is a constant ($\delta_j=0.6$ and $C_0=0.776$, for Morlet wavelet), and ψ_0 removes the energy scaling (Torrence and Compo, 1998).

The cross wavelet spectrum of two series X and Y , with wavelet transforms $W_n^X(s)$ and $W_n^Y(s)$ is defined as

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$$

We also examine the link between the time series, using the coherence wavelet transform, to verify if there is a coherent relationship between these time series. The wavelet squared transform coherency (WTC) is especially useful in highlighting the time and frequency intervals, when the two phenomena have a strong interaction (Torrence and Compo, 1998; Torrence and Webster, 1999). The wavelet square coherency $R_n^2(s)$ is defined as

$$R_n^2(s) = \frac{|< s^{-1} W_n^{XY}(s) >|^2}{< s^{-1} |W_n^X(s)|^2 > < s^{-1} |W_n^Y(s)|^2 >}$$

where $\langle \rangle$ indicates smoothing in time and scale, s^{-1} is used to convert to an energy density and $0 \leq R_n^2(s) \leq 1$. The absolute value is the square of the smoothed cross-wavelet spectrum XWT, normalized by the smoothed wavelet power spectra. Unlike the cross wavelet power, which is a measure of the common power, the wavelet square coherency is a measure of the intensity of the

covariance of the two series in time–frequency space (Torrence and Compo, 1998).

The WTC measures the degree of similarity between the input (X) and the system output (Y), as well as the consistency of the output signal (X) due to the input (Y) for each frequency component. When $R_n^2(Y)=1$ or ~ 1 , this indicates that all frequency components of the output signal (Y) correspond to the input (X) implying that there is synchronization between output signal (X) and input signal (Y). The synchronization can be in phase, frequency and/or amplitude (Velasco et al., 2010; Velasco, 2012). If $R_n^2(Y) \ll 1$ does not necessarily mean that output Y is not related to input X , this also could be due to the presence of noise, nonlinearities and time delays in the system (Velasco et al., 2010; Velasco, 2012).

The arrows in the coherence wavelet spectra show on average the degree of linear or nonlinear dependence between the X and Y time series in time–frequency space; arrows at 0° (pointing to the right) indicate that both time series are perfectly positively correlated (in phase) and arrows at 180° (pointing to the left) indicate that they are perfectly negatively correlated (180° anti-phase). It is important to point out that these two cases imply a linear relationship between the considered phenomena. Non-horizontal arrows indicate an out of phase situation, meaning that the two studied phenomena have a more complex non-linear relationship.

The statistical significance level of the wavelet coherence is estimated using Monte Carlo methods with red noise (Grinsted et al., 2004). The 5% significance level (95% confidence level) implies that for a random time series, 5% of the points will be above that threshold just by chance.

We focused our study on finding and measuring cross-frequency coupling in time series with a low signal/noise ratio and over-modulation using a wavelet filtering and a coherent detection.

The Amplitude–phase Cross-Frequency Coupling Index (CFCI) is able to detect amplitude–phase coupling between two frequency signals of interest: the modulating signal (L) and the amplitude modulated signal (H).

The CFCI is calculated from a phase–amplitude distribution-like plot (Tort et al., 2010), which is obtained following the next procedure:

The signals of interest are detected using the wavelet transform (WT). The WT shows the main periodicities of the time series and reveal if a modulation behavior can be suspected from a periodicity. The modulating signal (L) and the amplitude modulated signal (H) are extracted from the time series using the wavelet filtering. The phase of the H signal is also obtained using the WT.

The "modulated" signal H is demodulated using a coherent detection (HA, demodulated signal).

The phases of the H signal are binned and the mean amplitude of HA over each phase bin is calculated and normalized. The modulation ratio (MR) is inferred from the amplitude–phase plot (Chattopadhyay, 2006) as $MR = MR = (h_{\max} - h_{\min}) / (h_{\max} + h_{\min})$ where h_{\max} and h_{\min} are the maximal and minimal amplitude heights, respectively, inferred from the phase–amplitude plot.

The CFCI is calculated as $CFCI = MR(HA_{\max} - HA_{\min})$; here HA_{\max} and HA_{\min} are the maximal and minimal amplitude heights of the demodulated signal.

We subdivided the cross frequency coupling into 4 classes of coupling based on the CFCI, Table 1.

To illustrate the method we use a synthetic time series denoted by X (Fig. 2a). The X signal was modeled as $X = (1 + M \times \cos(2\pi f_1 t)) \times \cos(2\pi f_2 t) + \cos(2\pi f_1 t) + \text{Red noise}$,

where M is the AM modulation index ($M=0.9$), $f_c=1/70$ years and $f_m=1/11$ years are the frequencies, and the red noise has a first order regressive coefficient of 0.7, mean=0 and variance=0.2.

We apply the wavelet transform to the X signal to find the main periodicities (Fig. 2b). The global wavelet spectrum (Fig. 2c) shows two main periodicities at 11 and 70 years. The 70 year periodicity shows constant power throughout the whole period and the 11 year periodicity shows an intermittent power behavior, which suggests a modulation. Now we extract them from the X signal using the wavelet filtering method.

We extracted the 11 year periodicity (denoted as H signal) (Fig. 3a) as our high-frequency signal and the 70 year periodicity (denoted as L signal) (Fig. 3b) as our low-frequency signal, but we do not know if they are related. Then the H signal is demodulated (denoted as HA) using a phase locked loop as a carrier detector (Fig. 3a). We also calculate the phases for the L signal (Fig. 3c). The demodulated signal (HA) seems to have common features

with the L signal but we need to apply the cross frequency coupling method to quantify the relationship between the signals. The amplitude–phase plot was computed (Fig. 3d) and the CFC was calculated (CFC=0.45) and we find strong coupling between the signals.

2.1 Comparison between two demodulation methods

We review the non-coherent and coherent demodulation methods and compare their performances (Fig. 4).

2.1.1. Envelope detection

The envelope detection can be achieved without a coherent reference to the carrier waveform.

The detection is performed with a rectifier and a low pass filter. The envelope detection is the simplest form of demodulation but can only be applied when $M \leq 1$ (M —modulation index). The envelope detection is sensitive to envelope distortion.

2.1.2. Coherent demodulation using a PLL as a carrier synchronization

The AM signal is multiplied by a sine wave of the same frequency and phase as the transmitted carrier (Appendix A). The carrier signal is recovered by the PLL. A synchronous detector is not sensitive to envelope distortion.

In Fig. 4 we show the measures results obtained for the coherent and non-coherent demodulation methods during the

Table 1
Types of cross frequency coupling (modulation) based on the CFC measure.

Type of coupling	CFC
Weak modulation	0.05–0.2
Moderate modulation	0.2–0.35
Strong modulation	0.35–0.5
Over modulated	>0.5

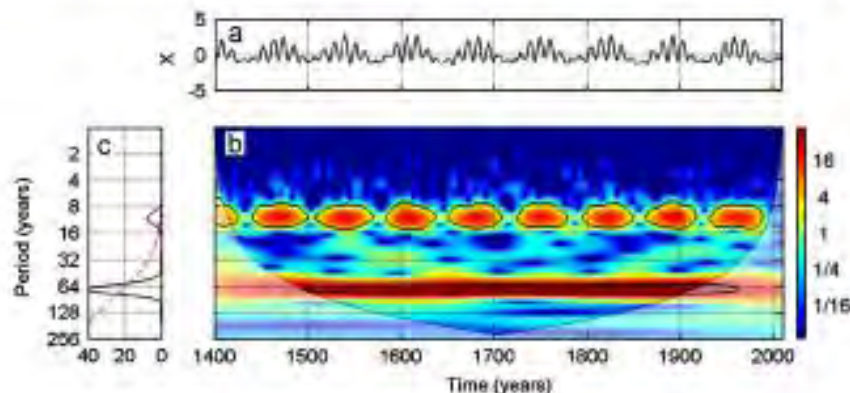


Fig. 2. (a) X time series, (b) Morlet wavelet spectrum and (c) global wavelet spectrum.

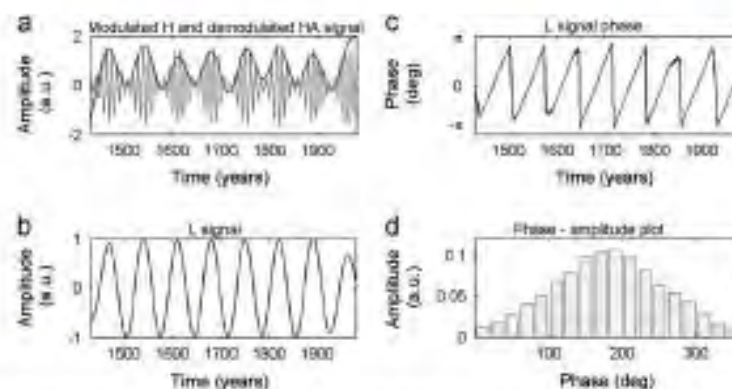


Fig. 3. The time series (a) wavelet-filtered and the H (a) and L (b) signals are extracted. The HA signal is obtained from the demodulation process. The phase of the L signal (c) is calculated using the wavelet transform. The mean amplitude distribution over the phase line plot (d).

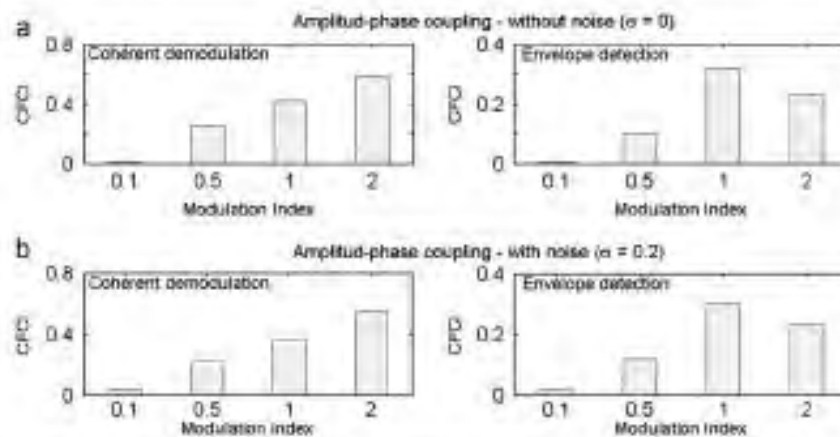


Fig. 4. Performance comparison between the coherent and non-coherent demodulation methods. Four different cases of coupling strength are analyzed for each demodulation method. (a) Time series for four cases. (b) Time series in the presence of red noise with $\alpha = 0.2$.

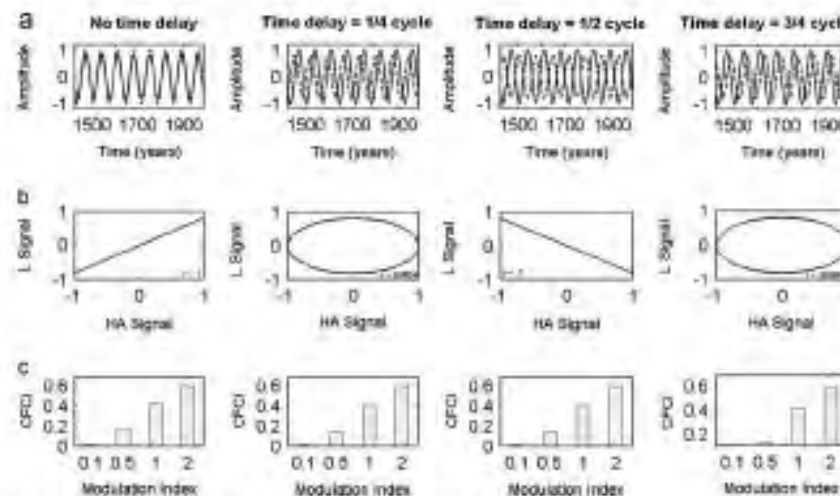


Fig. 5. (a) Time of modulated (L, solid line) and demodulated (HA, dashed line) signals. (b) Scatter plots between L and HA signals, which shows that the correlation coefficient (r) depends on the phase lag between L and HA signals. (c) CFC measure values for modulation indices of 0.1, 0.5, 1, and 2.

analysis of similar phase–amplitude coupling cases. For the same cases of coupling strength we have analyzed the performance of the measures with (Fig. 4b) and without (Fig. 4a) noise. In both cases for $M < 1$ the method is able to detect and measure the CFC. The envelope detection (non-coherent) method is unable to give a reliable measure of the CFC when an over-modulation exists ($M > 1$).

We also review the effect of a phase lag between the modulated signal and the demodulated signal (Fig. 5). In Fig. 5 we show the CFC comparison for 4 different phase lags. The results show that the CFC measure does not depend on the phase lag between the signals as it does for the correlation measure.

3. Results

First we applied the wavelet transform to the normalized time series in order to find the main periodicities. The time series were transformed in order to have a normal probability density function; otherwise unreliable results can be obtained (Grinsted et al., 2004). Fig. 6(a) shows the IWSIB and Fig. 6(d) the ^{10}Be time series;

the wavelet spectrum is presented in Fig. 6(b and e). The global wavelet spectrum (Fig. 6c and f) shows the main periodicities. Both time series present 8 and 12 year periodicities close to or above the confidence level. They also present a secular periodicity close to the 95% level of confidence. In Table 2 we show the main periodicities of each time series.

In order to investigate if there is a relationship between the IWSIB and the ^{10}Be time series (Fig. 7a) we use the coherence wavelet transform (Fig. 7b). While both series exhibit considerable power at the decadal periodicity (Schwabe-cycle) (Fig. 7c), there is no consistent phase relationship between each other as clearly shown by the random orientations of the arrows in Fig. 7(b). There is no clear evidence of any significant coherence at this periodicity. The series also present high power at the secular periodicities and the coherence wavelet transform shows a high coherence for a short period of time but it is not possible to conclude if they are related from this analysis. The mean coherence phase (Moore et al., 2007) analysis shows coupling ($\rho > 0.2$) of the 13, 30, 60 and 180 year periodicities (Fig. 7d), which suggests a relationship between the time series. We perform a mean coherence phase analysis for different time

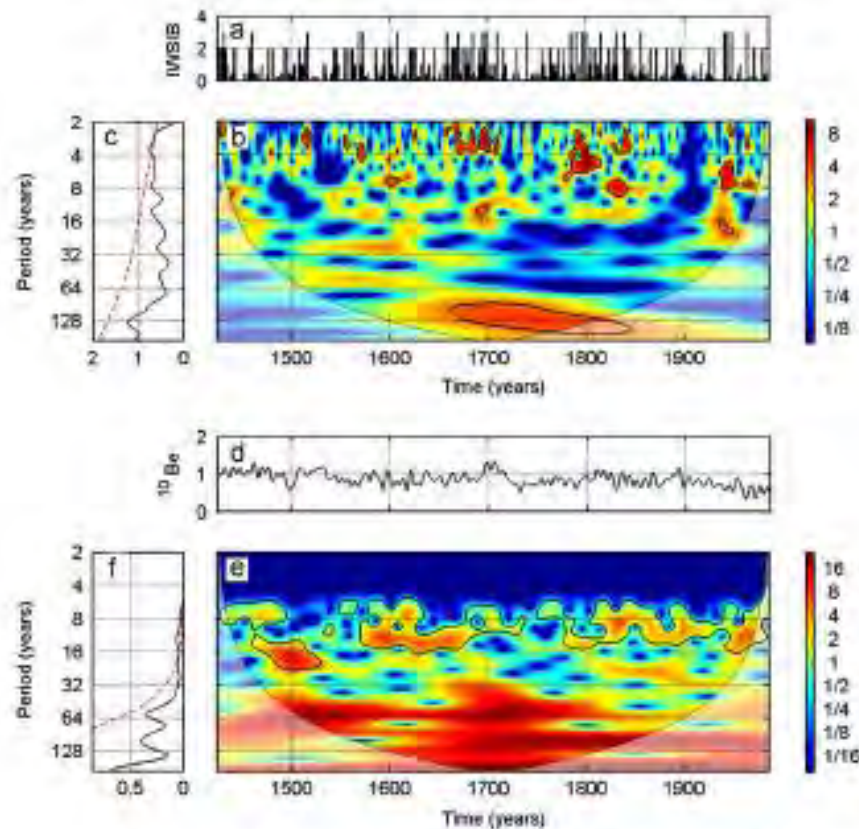


Fig. 6. (a) IWSIB time series, (b) IWSIB Model wavelet spectrum and (c) IWSIB global wavelet spectrum; (d) ¹⁰Be time series, (e) ¹⁰Be Model wavelet spectrum and (f) ¹⁰Be global wavelet spectrum.

Table 2
Summary of wavelet (main) periodicities.

Main periodicities			
Periodicity	IWSIB	¹⁰ Be	Bayernica notation
Quasi-triennial-cycle	3.5 (2–6)		
Quasi-decadal-cycle	8 (6–9)		
Schwabe cycle	12.3 (9–18)	12 (9–17)	13 (9–15)
Hale-cycle		22 (17–30)	20 (14–27)
70 yr cycle	27 (20–40)		
Yoshimura-Gleisberg cycles	55 (40–80)	60 (50–70)	55 (50–60)
VMU-cycle	100 (70–130)	105 (75–140)	
De Vries or Suess cycle		190 (140–235)	105 (100–220)

lags (not shown here) and we found that the series have a phase lag of around 30 years. We lagged the IWSIB time series by 30 years (Fig. 8a) and recalculated the coherence-wavelet transform (Fig. 8b); from this analysis we found that there is a high coherence between the time series and that they are synchronized at the 40–130 year band (Fig. 8c and d). The time lag of 30 years found in this work was previously reported by Eichler et al. (2009), and they have also shown that the temperature follows the sun with a time lag of 10–30 years. Since the influence of solar activity on climate has not yet been fully resolved, such observations provide an important contribution to its understanding. Eichler et al. (2009) gives one possible mechanism which has been discussed by various authors, which might explain this lag, the possible cause is the indirect effect of the sun on temperature

changes involving ocean-induced changes in atmospheric circulation. Ocean water warms up to a higher level in places where the solar radiation is most powerful, for example in the sub-tropics and the tropics. The heat energy is carried from the lower to the higher latitudes by the ocean, and then released back into the atmosphere. Because of the high thermal capacity of the oceans and the variable velocities of their currents, these processes are subject to considerable delay.

We now use the CICI method to investigate phase-amplitude cross frequency coupling between the secular periodicity (105 years) of ¹⁰Be (solar activity indicator) and the decadal periodicity (12 years) of ice winter severity index. We extract the decadal periodicity of IWSIB using the wavelet filtering method and we demodulated it using a coherent demodulation method, we also

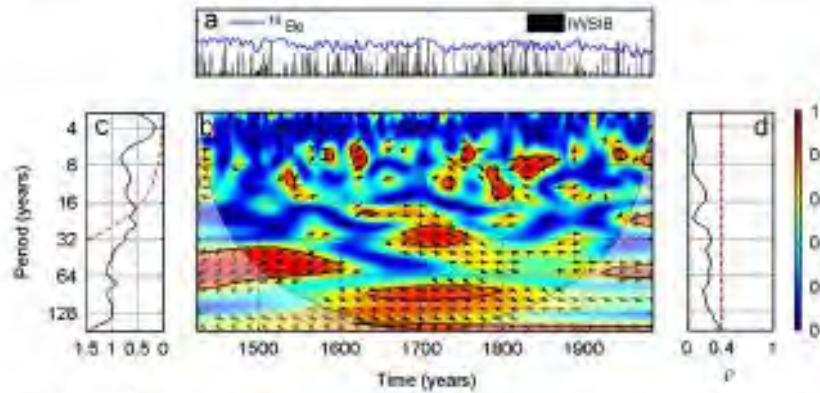


Fig. 7. (a) WSB and ^{10}Be time series, (b) coherence wavelet transform and (c) global power spectrum and (d) mean coherence phase.

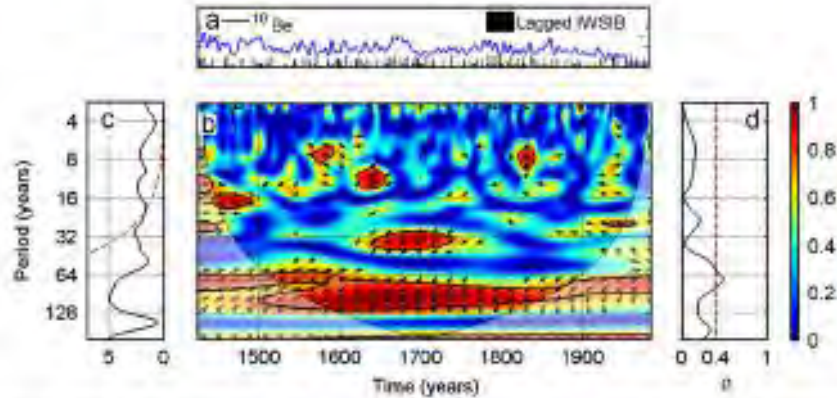


Fig. 8. (a) 30 yr lagged WSB and ^{10}Be time series, (b) coherence wavelet transform, (c) global power spectrum and (d) mean coherence phase.

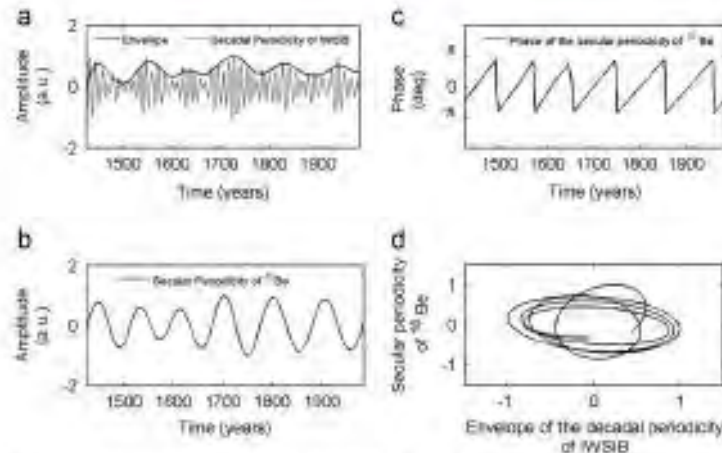


Fig. 9. (a) The decadal periodicity of WSB and its envelope (b) the secular periodicity of ^{10}Be , (c) the phase of the secular periodicity of ^{10}Be and (d) scatter plot between the envelope of the decadal periodicity of WSB and the secular periodicity of ^{10}Be and the correlation coefficient (r). There is a time lag of around 30 yr between the envelope of the decadal periodicity of WSB and the secular periodicity of ^{10}Be .

calculated the phase of the secular periodicity of ^{10}Be and calculated the CFCL.

Fig. 9(a) shows the envelope of the decadal periodicity of the WSB obtained from the coherent demodulation method, the

secular periodicity of ^{10}Be (100 and 180 year periodicities) obtained by wavelet filtering (Fig. 9b) and the phase of the secular periodicity of ^{10}Be (Fig. 9c). In Fig. 9(d) we can see that the signals are synchronized but with a time lag.

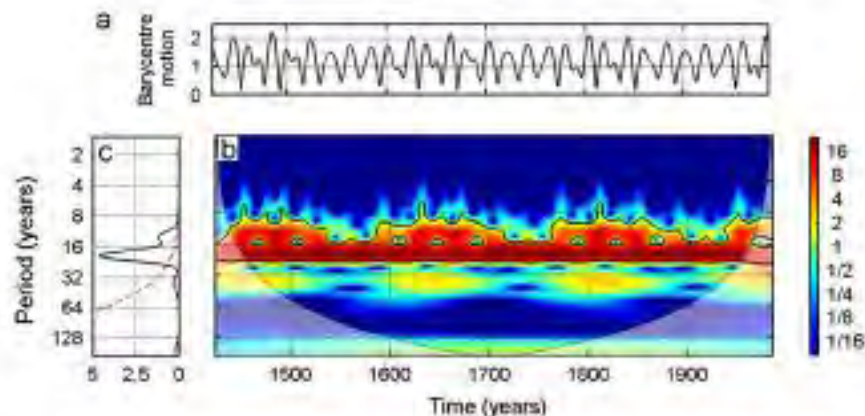


Fig. 10. (a) Barycentre motion time series, (b) Morlet wavelet spectrum and (c) global wavelet spectrum.

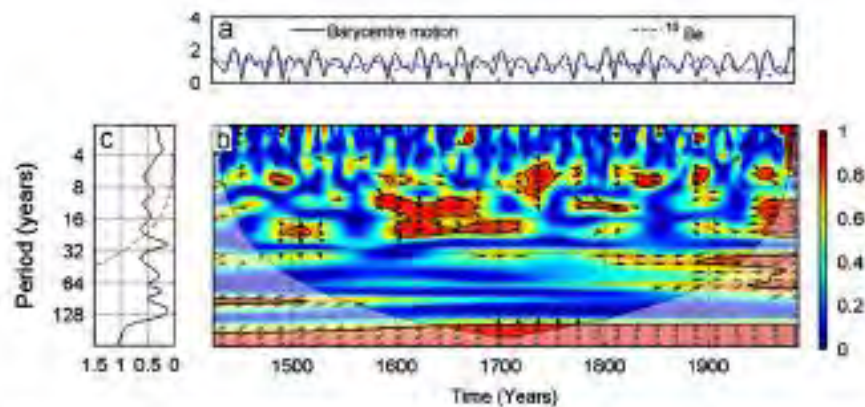


Fig. 11. (a) Barycentre motion and ¹⁰Be time series, (b) coherence wavelet transform and (c) global power spectrum.

The CFCI was applied to quantify the relationship. The results show strong significant cross-frequency coupling (CFCI = 0.43) between both time series with a phase lag of around 30 years. Significance testing was calculated by Monte Carlo methods against 1000 realizations of a red noise background (Grinsted *et al.*, 2004) to infer whether the observed value actually differs from what would be expected from chance.

We perform a second analysis in order to find out if there is an evidence that confirms that solar motion is affecting the solar activity and in consequence the earth climate. We perform the same analysis as before, for this analysis we use the ¹⁰Be and the barycentre motion time series (Fig. 10a). We applied the wavelet transform to the barycentre motion time series in order to find the main periodicities (Fig. 10b). The global wavelet spectrum shows that this time series also contains a decadal periodicity (Fig. 10c). We applied a coherence wavelet transform to the ¹⁰Be and the Barycentre motion time series (Fig. 11a) in order to find out if they are related. The coherence wavelet analysis (Fig. 11b and c) shows that there is no consistent phase relationship between the time series. There is no clear evidence of any significant coherence at the decadal periodicity.

We applied the CFCI method in order to find out if there is a cross-frequency coupling between the time series. We extract the 180 year periodicity from the envelope of the decadal periodicity of ¹⁰Be time series (Fig. 12a) and the 180 year periodicity from the Barycentre

time series (Fig. 12b) and its phase (Fig. 12c). We calculated the CFCI measure to find out if the variation on the solar activity is related to the Barycentre motion. The results show that solar activity is strongly modulated (CFCI = 0.42) by the Barycentre motion at the decadal periodicity. In Fig. 12(d) we can see that the envelopes of the decadal periodicity of ¹⁰Be and the 180 year periodicity from the Barycentre motion time series are synchronized.

4. Discussion and conclusions

We use the coherence wavelet transform between the *IWSB* and ¹⁰Be in order to find a possible solar influence on ice winter severity index in the Western Baltic region in the last 500 years. From this analysis we found no clear evidence of any significant coherence because of the presence of noise, nonlinearities and/or time delays in the system. But using the coherence phase analysis we found that there is a phase lag of 30 years between the time series. We lagged the *IWSB* time series and obtained the coherence wavelet transform. We confirmed that at the secular periodicities there exists a significant coherence between the time series.

In this work we presented a novel method for assessing amplitude-phase cross-frequency coupling. We performed comparisons of the CFCI measure for two demodulation methods and we demonstrated that the coherent demodulation method is well

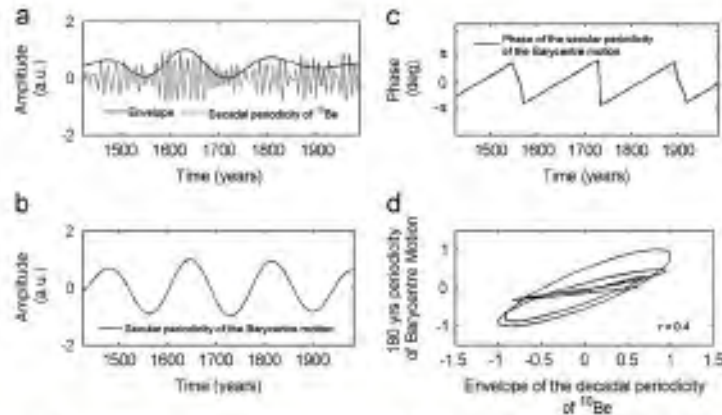


Fig. 12. (a) The decadal periodicity of ^{10}Be and its envelope; (b) the secular periodicity of the Barycentre motion; (c) the phase of the secular periodicity of the Barycentre motion and (d) scatter plots between the envelope of the decadal periodicity of ^{10}Be and the secular periodicity of the barycentre motion and the correlation coefficient (r). There is a time lag of around 30 yr between the time series.

suit for assessing the intensity of the coupling in the presence of noise, over-modulation and different phase lags.

We have applied the CFCI measure to a proxy data of solar activity ^{10}Be and to the IWSIB time series. The results obtained by the new method show significant strong coupling between the secular periodicity of solar activity (^{10}Be) and the decadal periodicity of IWSIB. This confirms the hypothesis that the earth climate is strongly affected by solar activity.

We have also applied the CFCI measure to the Barycentre motion and the ^{10}Be time series. Our results demonstrate that the 11 year periodicity of solar activity is strongly modulated by the 180 year periodicity of Barycentre motion, which confirms that the solar activity is affected by the Barycentre motion.

According to our results the climate in the Baltic during the last 500 years was affected by the solar activity, and also by the Barycentre motion.

During the pre-industrial and post-industrial period the dominant force was the solar activity (Barycentre motion) and we recommend that this force should be considered in the climatic models in order to have an accurate climate reconstruction. However, anthropogenic greenhouse gas increases are needed to study the climate reconstruction of the late 20th century.

The Power Distribution Function of Ice Winter Severity Index shows that the IWSIB below 0.5 represents more than 3% of all the data, which means that for 425 years of 562 years, the IWSIB has been very low. A moderate winter has been for 19.75% of the time and only for 4.62% of the time there has been severe winters, and these winters have been localized around the Spörer, Maunder, Dalton and Modern Minima. If the tendency continues we could expect more severe winters in the following secular minimums.

The ice formation in the Baltic is regulated by different internal and external factors. However this study shows that the ice formation in the Baltic region has been, mostly, low for the last 600 years. The high ice formation occurred on the secular maximums of solar activity; these results are really important in modeling and forecasting the ice in the Baltic.

Acknowledgments

The authors wish to thank the Universidad Nacional Autónoma de México for its support. This work was partially supported by DGAPA-UNAM IN117009-3 Grant, CONACYT-180148 Grant and IXTLI: IX100810 Grant.

Appendix A. Coherent demodulation

The coherent detection is applied to the task of amplitude demodulation under conditions in which the signal/noise ratio is poor (Fig. A1); in these circumstances, a PLL (phase locked loop) offers considerable performance advantages over the envelope detection system (Kenington et al., 1990).

$X(t)$ is a modulated signal with the frequency and the phase represented by f_c and Φ_c . The PLL generated a signal $Y(t)$ with a frequency and phase represented by f_p and Φ_p , respectively. The task of the PLL is to modify Φ_c until $f_c = f_p$ and $\Phi_c = \Phi_p$. When those conditions are met, the generated signal will be phase-locked to the external signal. The PLL has extracted the carrier. Then the demodulation is based on simple multiplication and a low pass filter; the modulated signal $X(t)$ is multiplied by the generated signal $Y(t)$ and low-pass filtered (Fig. 1). The demodulated signal HA shows if an amplitude modulation exists.

Appendix B. Data ice winter severity index

The ice winter severity index time series from 1424 to 1985 (562 data) is shown in Fig. B1. This time series is a reconstruction of 7 types of winter severity based on the accumulated areal ice volume along the German Baltic (Kosłowski and Glaser, 1999; Kosłowski and Schmelzer, 2007).

The Power Distribution Function (PDF) of IWSIB is presented in Fig. B2. The ice winter severity index was grouped into 3 types of winters (Table B1). Table B1 shows that the IWSIB below 0.5 represents more than 3% of all the data, which means that for 425 years of 562 years the IWSIB has been very low. A moderate winter has been for 19.75% of the time and only for 4.62% of the time there has been severe winters, and these winters have been localized around the Spörer, Maunder, Dalton and Modern Minima. If the tendency continues we could expect more severe winters in the following secular minimums predicted by several authors for 2010–2080 (Dahau and de Jager, 2010; Velasco et al., 2008, 2010).

The ice formation in the Baltic is regulated by different internal and external factors. However this study shows that the ice formation in the Baltic region has been, mostly, low for the last 600 years. The high ice formation occurred on the secular maximums of solar activity; these results are really important in modeling and forecasting the ice in the Baltic.

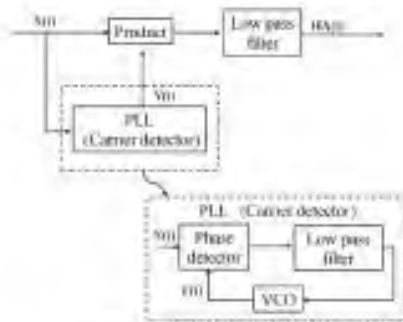


Fig. A1. Coherent demodulator for an AM signal.

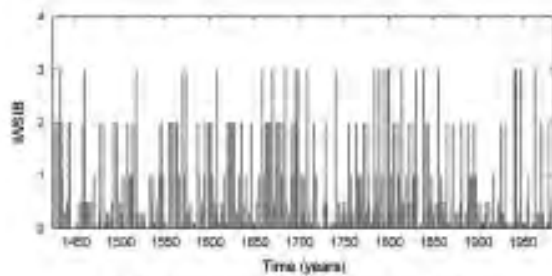


Fig. B1. Ice winter severity index (IWSIB) time series.

Beryllium 10

Since there are no direct observational data to study the solar variability over long period of time scales, the sunspots data are the longer solar activity time series (available at the Royal Observatory of Belgium: <http://sidc.oma.be/>), we have to rely on proxy data of cosmogenic isotopes such as ^{10}Be and ^{14}C or different solar index reconstructions for the study of solar activity.

The cosmogenic isotope ^{10}Be in polar ice cores can potentially give information on the history of cosmogenic production rates in the past (Kasberk and Vioa, 1984). Beryllium-10 is a cosmogenic isotope created in the atmosphere by galactic cosmic rays. The variation of ^{10}Be concentration in this work is used as an indicator of solar activity. The ^{10}Be time series from 1424 to 1985 is shown in Fig. B3.

Barycentric motion

The solar inertial motion is the movement of the Sun around the barycentre (center of gravity) of our solar system. The motion

Table B1
Types of winter based on the IWSIB

Type of winter	IWSIB	Number of winters	Percent
Weak	0.0–0.5	425	82.74
Moderate	1.0–2.0	111	19.75
Severe	3.0	20	3.62

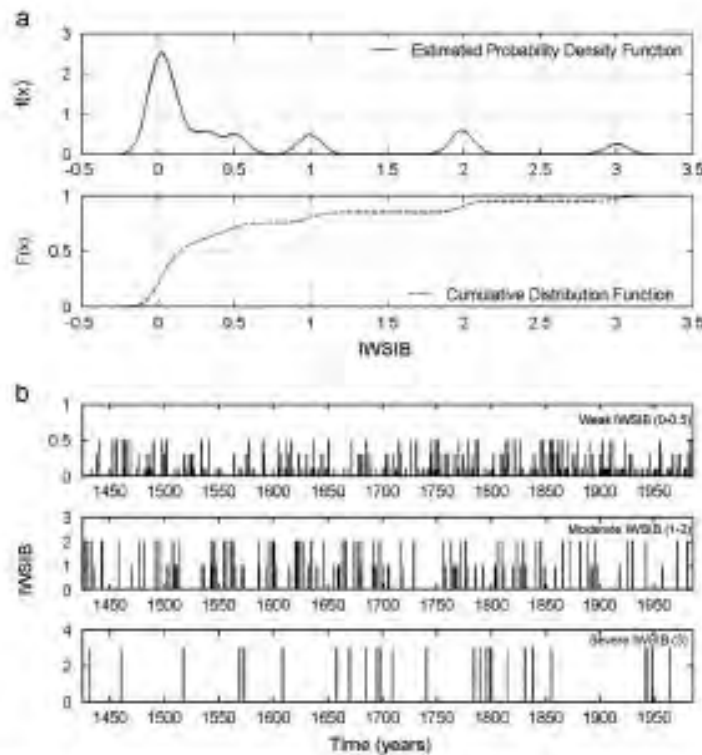


Fig. B2. (a) The Probability Distribution Function of IWSIB time series. (b) The classification of the winter years.

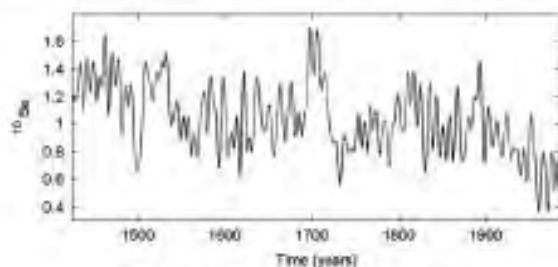


Fig. 83. The cosmogenic isotope ¹⁰Be time series.

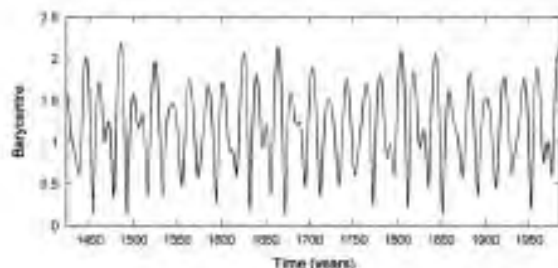


Fig. 84. The Barycentre motion time series.

is due to the varying position of the planets. The first study about the solar inertial motion was produced by Jose (1965). The Astronomical Computations for the Solar System barycentre was generated by the Solar System Dynamics Group, Horizons On-Line Ephemeris System, Jet Propulsion Laboratory. The Barycentre motion time series from 1424 to 1985 is shown in Fig. 84.

Linear correlation coefficient

The linear correlation coefficient (r) is a measure of the degree of the linear relationship between two variables. The correlation coefficient takes on values ranging between $+1$ and -1 . If there is no linear relationship between two variables the correlation coefficient is 0 or very low. As the strength of the linear relationship between the variables increases so does the correlation coefficient.

The correlation coefficient for the ¹⁰Be and the ¹⁰Be time series is 0.03 and for the ¹⁰Be and the barycentre motion time series it is 0.024. The correlation coefficient is very low, which means that there is no linear relationship between the variables.

The relationship between the whole time series is non-linear, but this does not mean that there is no linear relationship between the components of the time series. We perform a coherence analysis between the time series in order to find out if there is a linear relationship between the components of the time series (Torrence and Compo, 1998).

References

Adams, R.M., et al., 1990. Global climate and US agriculture. *Nature* 345 (6272), 219–224.
 Bard, E., Frank, M., 2000. Climate change and solar variability: what's new under the sun? *Earth and Planetary Science Letters* 248 (1–2), 1–14.
 Barrio, B., Stens, L., 2000. Chaos and phase synchronization in ecological systems. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 10 (10), 2361–2380.
 Brown, E.W., 1900. A possible explanation of the sunspot period. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 60, 599–606.
 Beer, J., et al., 1994. ¹⁰Be as an indicator of solar variability and climate. In: *Neume-Bien, E. (Ed.), The Solar Engine and Its Influence on Terrestrial Atmosphere and Climate*. Springer-Verlag, pp. 221–232.

Canaly, R., et al., 2006. High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex. *Science* 313, 1026–1028.
 Cohen, T.J., Litt, P.R., 1974. Long term periodicity in the sunspot cycle. *Nature* 250, 298–300.
 Cohen, M.X., 2008. Assessing transient cross-frequency coupling in EEG data. *Journal of Neuroscience Methods* 168 (2), 494–499.
 Chattopadhyay, D., 2006. *Electronics (Fundamentals and Applications)*, seventh ed. New Age International, ISBN: 81-224-1780-9.
 Charvátovský, I., 1988. The solar motion and the variability of solar activity. *Advances in Space Research* 8 (7), 147–150.
 Charvátovský, I., Štefáček, J., 2004. Periodicities between 6 and 16 years in surface air temperature in possible relation to solar inertial motion. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 68 (3–4), 2119–2127.
 Dachs, S., de Jager, C., 2010. The forthcoming grand minimum of solar activity. *Journal of Geology* 8, 1983–1999.
 Demiralp, T., et al., 2007. Gamma amplitudes are coupled to theta phase in human EEG during visual perception. *International Journal of Psychophysiology* 94 (1), 24–30.
 Eddy, J.A., 1976. The minster minimum. *Science* 192, 1189–1203.
 Eicherle, A.S., et al., 2009. Temperature response in the Alta region lags solar forcing. *Geophysical Research Letters* 36, L01808. <http://dx.doi.org/10.1029/2008.013593>.
 Erikson, C., et al., 2007. Characterizing the European sub-arctic winter climate since 1500 using ice, temperature and circulation time series. *Journal of Climate* 20, 5330–5334.
 Farge, M., 1992. Wavelet transforms and their applications to turbulence. *The Annual Review of Fluid Mechanics* 24, 205–257.
 Franklin, H., McMichael, A.J., 2008. Climate change and public health: thinking, acting and communicating. *American Journal of Preventive Medicine* 35 (5), 403–410.
 Crutwell, A., et al., 2004. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear Processes in Geophysics* 11, 501–506.
 Hameed, J., Deparisotto, M., 1997. The Baltic Sea ice season in changing climate. *Environmental Research* 2, 93–108.
 Hansen, D., Oerter, A., 2008. Modeling the Baltic Sea ocean climate on centennial time scale: temperature and sea ice. *Climate Dynamics* 30, 703–728.
 Helcom, 2007. Climate change in the Baltic Sea area. HELCOM Thematic Assessment in 2007. In: *Baltic Sea Environment Proceedings*, p. 111.
 Jants, A., et al., 1998. Long-term fluctuations of the ice cover of the Baltic Sea. *Geografica Metrika* 32, 39–45.
 Jorjeyeva, S., 2001. Severity of winter seasons in the northern Baltic Sea between 1520 and 1990: reconstruction and analysis. *Climate Research* 17, 55–62.
 Jorjeyeva, S., Moore, J.C., Crutwell, A., 2009. Oceanic and atmospheric transport of meltwater El Niño–Southern Oscillation (ENSO) signatures to the Polar Region. *Geophysical Research Letters* 31, L24210.
 Johannessen, O.M., 2008. Decreasing arctic sea ice mirror increasing CO₂ on decadal time scale. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 1 (1), 51–56.
 Kowling, P.D., 1965. Sun's motion and sunspots. *Astronomical Journal* 70 (3), 193–200.
 Livingston, P.R., et al., 1990. Amplitude modulation and the low-order phase-locked loop. *Communications, Speech and Vision, IEEE Proceedings* 137 (1), 17–24.
 Kuznetsov, G.G., 2011. Cross-frequency coupling of brain oscillations: an impact of state anxiety. *International Journal of Psychophysiology* 80 (2), 238–245.
 Kuznetsov, G., Glaser, R., 1995. Reconstruction of the ice winter severity index (IWI) in the western Baltic. *Climate Change* 31 (1), 79–98.
 Kuznetsov, G., Glaser, R., 1999. Variations in reconstructed ice winter severity in the Western Baltic from 1501 to 1995, and their implications for the North Atlantic oscillation. *Climate Change* 41 (2), 173–191.
 Kuznetsov, G., Schneider, N., 2007. Ice winter severity in the western Baltic Sea in the period 1301–1500. *Deutscher See* 42 (47), 56.
 Leijonhufvud, L., et al., 2010. Five centuries of Stockholm winter spring temperatures reconstructed from documentary evidence and instrumental observations. *Climate Change* 104, 109–141.
 Lepy, E., 2005. Influence of the temperature on ice conditions in the Bay of Bothnia. In: *Fifth Workshop on Baltic Sea Ice Climate*, Hamburg, Germany, pp. 23–28.
 Loewe, P., Kozłowski, C., 1998. The Western Baltic Sea ice season in terms of a mass-related severity index, 1870–1992. II. Spectral characteristics and association with NAO, QBO and solar cycle. *Tellus A* 50 (2), 219–241.
 Makhov, I.I., et al., 2011. Alternating mutual influence of El Niño/Southern Oscillation and Indian monsoon. *Geophysical Research Letters* 38, L08704.
 Mikkelson, I., et al., 2008. Ice and weather conditions in the gulf of Riga, their impact on Riga Harbour winter navigation, 1996–2006. In: *Proceedings of the XXV Nordic Hydrological Conference*, vol. 1. Nordic Association for Hydrology, Reykjavik, Iceland, pp. 113–120.
 Moore, J.C., et al., 2007. Evidence from wavelet lag coherence for negligible solar forcing of climate at multi-year and decadal periods. In: *Trends, Quantities, A. Dinev, James B. (Eds.), Nonlinear Dynamics in Geosciences*. Springer-Verlag, New York, pp. 457–464.
 Omski, A., Chen, D., 2001. Influence of atmospheric circulation on the maximum ice extent in the Baltic Sea. *Journal of Geophysical Research* 106, 4493–4500.
 Polyakov, I., et al., 2002. Trends and variations in arctic climate systems. *EOS, Transactions, American Geophysical Union* 83, 547–548.
 Rasmussen, C.M., Wu, F., 1984. Production of long-lived cosmogenic nuclei and their applications. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 95, 91–99.

- Berner, K.J., Wallace, J.M., 2009. Cross-frequency coupling, slowdowns, and blocking in the Northern Hemisphere winter circulation. *Journal of Climate* 22, 5050–5066.
- Sereze, M.C., et al., 2000. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover. *Science* 288, 1533–1536.
- Shabalova, M.V., van Engelen, A.F.V., 2003. Evaluation of a reconstruction of winter and summer temperatures in the Low Countries, AD 764–1998. *Climate Change* 58, 219–242.
- Schmeier, M., Hoffert, J., 2011. Ice winter severity in the western Baltic Sea in the period of 1301–1500: comparison with other relevant data. *International Journal of Climatology* 31 (7), 1094–1098.
- Speerschnöder, C., 1915. Om hforholdene i danske Farvande i ældre og nyere Tid, Aarene 690–1860. Publikationer fra det Danske Meteorologiske Institut. Meddelelser, vol. 2, 141 pp.
- Soon, W., et al., 2011. Variation in surface air temperature of China during the 20th century. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 73, 2331–2344.
- Stroeve, J.C., et al., 2007. Arctic sea ice decline: faster than forecast. *Geophysical Research Letters* 34, L09501.
- Stuiver, M., 1961. Variations in radiocarbon concentration and sunspot activity. *Journal of Geophysical Research* 66, 273.
- Tarand, A., Nordk, P.O., 2001. The Tallinn temperature series reconstructed back half a millennium by use of proxy data. *Climate Change* 48, 189–199.
- The BACC Author Team, 2008. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Springer (474 pp.).
- Tort, A.B.L., et al., 2010. Measuring phase-amplitude coupling between neuronal oscillations of different frequencies. *Journal of Neurophysiology* 104, 1195–1210.
- Torrence, C., Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79, 61–78.
- Torrence, C., Webster, P.G., 1999. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system. *Journal of Climate* 12 (8), 2079–2090.
- Usoskin, I.G., et al., 2006. Solar activity reconstructed over the last 7000 years: the influence of geomagnetic field changes. *Geophysical Research Letters* 33, L08104.
- Vehikainen, B., Huttunen, M., 1997. Climate change and water resources in Finland. *Water Environment Research* 2, 3–18.
- Velasco, V.M., 2008. Mini-Ice Age: A New Scene of Climate Change in the XXth Century. American Geophysical Union, Spring Meeting 2008, Abstract#GC-33A-08.
- Velasco, V.M., et al., 2010. The Little Ice Age and Solar Activity. 38th COSPAR Scientific Assembly, 18–25 July 2010, Bremen, Germany.
- Velasco, V.M., 2012. The New Solar Minimum and the Mini-Ice Age of the 21st Century. ST07-AD08, AGCS-AGU, Asia Oceania Geosciences Society, 13–17 August 2012, Singapore.
- Wei, Q., et al., 2007. Amplitude and phase coupling measures for feature extraction in an EEG-based brain computer interface. *Journal of Neural Engineering* 4 (2), 120–129.
- Westlander, K., et al., 2010. Inter-annual and seasonal variations in the air-sea CO₂ balance in the central Baltic Sea and the Kattegat. *Continental Shelf Research* 30 (14–15), 1511–1521 (1983–1999).

Apéndice D

Congresos

1. UGM 2009

http://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos09-1/sesiones_especiales/SE12.pdf

INSTRUMENTACIÓN: SEÑALES, IMÁGENES, ANÁLISIS ESPECTRAL Y NUEVAS TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS GEOFÍSICOS, DESDE CAMBIO CLIMÁTICO HASTA ESTUDIOS AEROSPAZIALES

Geos, Vol. 29, No. 1, Noviembre, 2009

SE12-1

EL CICLO SOLAR 24 Y LA BAJA ACTIVIDAD SOLAR

Velasco Herrera Víctor Manuel
Instituto de Geofísica, UNAM
vmm@geofisica.unam.mx

En esta plática se dará a conocer una teoría que podría explicar la baja actividad solar que está ocurriendo actualmente en nuestra estrella.

Se mostrará que a partir de los datos observacionales galileanos de manchas solares, el Sol ha experimentado periodos de alta actividad solar como son el periodo cálido medieval que de acuerdo a diferentes investigaciones podría ser comparada o de mayor actividad que la actual y periodos de baja actividad solar.

Actualmente los diferentes estudios solares de varios centros de investigación están centrados principalmente en tratar de predecir el siguiente ciclo solar 24; sin embargo nuestros resultados muestran que esta baja actividad solar de los últimos 3 años podría ser el preámbulo del inicio de una nueva etapa de baja actividad solar que duraría varios ciclos solares.

Los resultados del análisis de las manchas solares son comparados con indicadores indirectos de la actividad solar como son los Isótopos Cosmogénicos los cuales permiten tener una idea de la actividad solar de los últimos 100,000 años. Esto permite comprender la actividad solar y sus implicaciones en los diferentes cuerpos celestes.

SE12-2

RECONSTRUCCIÓN DE MANCHAS SOLARES UTILIZANDO REDES NEURONALES

Sosa Flores Oscar¹, Balčyk Tatyana² y Velasco Herrera Víctor Manuel¹
¹Instituto de Geofísica, UNAM
²Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM
osofe@prodigy.net.mx

Se realiza una reconstrucción de la actividad utilizando redes neuronales. Como índice solar se utiliza el número de manchas solares anuales. En esta reconstrucción se muestra los resultados obtenidos por las redes neuronales y se comparan con los datos crudos.

SE12-3

LA PERIODICIDAD DE 1470 DE TEMPERATURAS SUPERFICIALES Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD SOLAR

Sosa Flores Oscar¹ y Velasco Herrera Víctor Manuel²
¹Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, UNAM
²Instituto de Geofísica, UNAM
osofe@prodigy.net.mx

Se analiza la posible relación entre la actividad solar y la periodicidad de 1470 años contenida en registros de temperatura. Para ello se llevó a cabo un análisis espectral de Wavelet y Wavelet de Coherencia. Se utilizan como indicadores de actividad solar registros de Berilio-10 y Carbono-14 y para la reconstrucción de temperaturas el isótopo 18 del oxígeno.

SE12-4

SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DEL CHICKULUB

Hernández López Liz Edith y Velasco Herrera Víctor Manuel
Instituto de Geofísica, UNAM
lrbasket@gmail.com

La estructura del cráter enterrado del Chicxulub fue reconocida inicialmente como un círculo con valores bajos de gravedad que se registra en el noroeste de Yucatán, cuyo centro se ubica en Chicxulub. Actualmente existe una controversia en cuanto a la estructura del Cráter. El objetivo de este trabajo es analizar los datos de Susceptibilidad Magnética por medio de la Transformada Wavelet, con la finalidad de identificar, en base a la firma espectral, la distribución de los materiales a lo largo de los núcleos.

Una de los aspectos más importantes que se ha logrado ver con este trabajo, es que la distribución de dichos materiales no es tan caótica como se pensaba.

SE12-5

ANÁLISIS DE LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES TERRESTRES

Santiago Cruz Félix y Velasco Herrera Víctor Manuel
Instituto de Geofísica, UNAM
felix_cruz@yahoo.com

Se estudia las variaciones de las temperaturas superficiales terrestres, por medio del análisis de wavelets, encontrando las potencias desde el año de 1850 hasta 2009 para las regiones del hemisferio norte, hemisferio sur y Global. Los resultados muestran que la potencia encontrada en los años de 1850 hasta 1919 son mayores que la potencia media, para los años de 1919 hasta 1996 las potencias son menores que la potencia media, y para los años de 1996 hasta 2009 las potencias son mayores que el valor de la potencia media.

SE12-6

ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE HIELO EN LA ZONA DEL BÁLTIICO

Leal Silva María del Carmen
Análisis del índice de hielo de la zona del Báltico
cleala@hotmail.com

Se realiza el estudio wavelet del índice de hielo de la zona del Báltico de 1600 a 1900. Los resultados muestran un decremento en el índice de hielo en los periodos cálidos (alta actividad solar) y un incremento en los periodos de baja actividad solar.

SE12-7

LA NUEVA MINI ERA DEL HIELO DEL SIGLO XXI

Velasco Herrera Víctor Manuel
Instituto de Geofísica, UNAM
vmm@geofisica.unam.mx

En esta plática se mostrarán los resultados de las investigaciones de la influencia de la variabilidad solar y su influencia en el cambio climático. Se muestra que para los siguientes años se espera una nueva mini era del hielo que durara entre 40-80 años y las temperaturas podrían disminuir entre 0.5 a 2 grados.

SE12-8

ESTUDIO DEL ÁCIDO METANO SULFÚRICO Y SU RELACIÓN CON LAS VARIACIONES CLIMÁTICAS TERRESTRES

Ocero Rosales Jaime Arturo y Mendoza Ortega Blanca
Instituto de Geofísica, UNAM
jartm_jean@yahoo.com.mx

La actividad solar ha sido propuesta como uno de los principales factores de la variabilidad climática. Además otros tipos de procesos como los biológicos han sido propuestos como un factor importante en las variaciones climáticas de la Tierra a través del albedo nuboso. En el presente trabajo se uso el análisis wavelet para investigar la relación entre las concentraciones de Ácido Metano Sulfúrico (MSA), que es producto de las algas marinas y el Berilio-10, un isótopo que se forma en la atmósfera y es un proxy de los rayos cósmicos. También se realizó un análisis espectral entre el MSA y el flujo de radio de 10.7. Se encontró que los diversos análisis espectrales y de coherencia presentan diferentes periodicidades asociadas a la actividad solar, los cuales están ligados con las variaciones climáticas de la Tierra.

SE12-9

EXPLORACIÓN AEROSPAZIAL EN 3-D

Velasco Herrera Víctor Manuel
Instituto de Geofísica, UNAM
vmm@geofisica.unam.mx

En esta plática se hablará de las misiones a Marte, los 40 años de la llegada a la Luna, los 50 años del primer satélite artificial, de las misiones a los diferentes cuerpos celestes del sistema solar incluyendo nuestro planeta pero en 3-d, esto permitirá a los asistentes observar las imágenes como si estuvieran en la Luna, Marte, Fobos, etc. lo que permitirá tener otra imagen del cosmos.

Análisis wavelet del índice de hielo en la zona del Báltico 1501-1995

Luis Silva M.A.¹, Néstor Herrera V.²



¹Departamento de Física, Universidad de Chile, Casilla 136, Santiago, Chile. ²Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Casilla 136, Santiago, Chile.



Resumen

En este trabajo se analizan las periodicidades en los índices de hielo y las temperaturas del Báltico para el periodo comprendido de 1501 a 1995 por medio del análisis espectral Wavelet. Encontramos que existe una alta coherencia entre las periodicidades de 8 (- 11 años del ciclo solar), 24 (- ciclo 22 Magnético solar) y 120 años (- VMV periodicidad).

Introducción

El clima de Europa a mediados del siglo XIV se deterioró y entró en la llamada "Pequeña Edad de Hielo", la cual duró hasta la segunda mitad del siglo XVI. Las bajas temperaturas de esta época no fueron constantes pero es importante realizar más estudios para poder comprender este periodo ya que la probabilidad de que se repita es muy alta (Vilaso, 2005).

La reconstrucción de la historia del clima en la región del Báltico es de suma importancia para la planificación social y la toma de decisiones (Von Storch, 1993).

El propósito del presente estudio es encontrar las periodicidades de las series de tiempo relacionadas con las variabilidades climatológicas de la zona del Báltico (1501 a 1995).

Datos

La reconstrucción del clima basada en parámetros de hielo son más importantes para determinar la severidad del hielo en invierno (Kondoye, 1995). En la tabla 1 podemos observar la relación que existe entre la severidad del hielo en invierno y el índice de hielo.

Severidad de invierno	Hielo
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1
7	1
8	1
9	1
10	1
11	1
12	1
13	1
14	1
15	1
16	1
17	1
18	1
19	1
20	1
21	1
22	1
23	1
24	1
25	1
26	1
27	1
28	1
29	1
30	1
31	1
32	1
33	1
34	1
35	1
36	1
37	1
38	1
39	1
40	1
41	1
42	1
43	1
44	1
45	1
46	1
47	1
48	1
49	1
50	1
51	1
52	1
53	1
54	1
55	1
56	1
57	1
58	1
59	1
60	1
61	1
62	1
63	1
64	1
65	1
66	1
67	1
68	1
69	1
70	1
71	1
72	1
73	1
74	1
75	1
76	1
77	1
78	1
79	1
80	1
81	1
82	1
83	1
84	1
85	1
86	1
87	1
88	1
89	1
90	1
91	1
92	1
93	1
94	1
95	1
96	1
97	1
98	1
99	1
100	1

Tabla 1. Tipo de severidad de invierno y su correspondencia helio.

Para analizar la relación a largo plazo entre la temperatura y la severidad del hielo en invierno utilizamos series de tiempo anuales reconstruidas tanto para temperatura como para índices de hielo. Estas series de tiempo fueron obtenidas del Banco de Datos Históricas (<http://www.historical.de>).

Metodología

Para analizar variaciones de potencia locales dentro de una sola serie de tiempo no estacionaria e múltiples periodicidades usamos el refinamiento al método wavelet usando la wavelet de Morlet (Torres y Compo, 1998). La wavelet de Morlet consiste de una onda plana modulada por una Gaussiana:

$$\psi_0(t) = \pi^{-1/4} e^{i\omega t} e^{-t^2/2}$$

Donde ω es la frecuencia adimensional. Aquí se usó $\omega = 6$ para cumplir con la condición de adimensionalidad (Farge, 1992). Torres y Compo (1998) definen la potencia wavelet como:

$$|W^2(\omega)|^2$$

donde $W^2(\omega)$ es la transformada wavelet de una serie de tiempo X y s es el índice del tiempo.

El Cono de Influencia es la región del espectro wavelet en el cual los efectos de borde llegan a ser importantes y se definen aquí el tiempo de doblamiento τ para la auto correlación de la potencia wavelet en cada escala. El tiempo de doblamiento τ se relaciona así que la potencia wavelet para una discontinuidad en el borde cae por un factor $e^{-\tau}$ y asegura que los efectos de borde sean insignificables más allá de este punto.

El wavelet de coherencia es una medida de la intensidad de la covarianza de dos series en espacio tiempo-frecuencia (Torres y Compo, 1998) y es utilizado para identificar cuándo el tiempo dentro de la cual dos series de tiempo están coherentes.

Resultados

Los resultados que aparecen en las Figuras 1-3, están resumidos en la tabla 2. En esta tabla mostramos los periodos principales que aparecen en las gráficas globales.

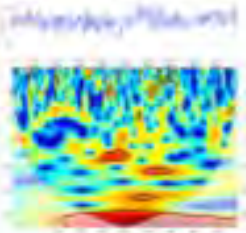


Fig 1

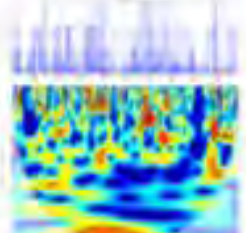


Fig 2

Periodo (años)	Coherencia	Escala (años)	Tempo (años)	Nota
11	0.85	11	1501-1995	Ciclo Solar
22	0.85	22	1501-1995	Ciclo Magnético Solar
120	0.85	120	1501-1995	VMV Periodicidad
8	0.85	8	1501-1995	Ciclo Solar
24	0.85	24	1501-1995	Ciclo Magnético Solar
120	0.85	120	1501-1995	VMV Periodicidad
8	0.85	8	1501-1995	Ciclo Solar
24	0.85	24	1501-1995	Ciclo Magnético Solar
120	0.85	120	1501-1995	VMV Periodicidad
8	0.85	8	1501-1995	Ciclo Solar
24	0.85	24	1501-1995	Ciclo Magnético Solar
120	0.85	120	1501-1995	VMV Periodicidad

Tabla 2. Resumen de la coherencia de los análisis wavelet.

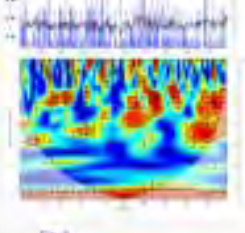


Fig 3

Conclusiones

En este trabajo se analizó la periodicidad de los índices de hielo y las temperaturas, utilizando el método de análisis espectral wavelet. Encontramos que existe una alta coherencia para las periodicidades de 8 (- 11 años del ciclo solar), 24 (- ciclo 22 magnético solar) y 120 años (- VMV).

Referencias

Farge, M. (1992). Wavelet transform and its application to turbulence. *Physica Scripta*, 25, 238-245.

Compo, G. and Torrence, P. (1993). Reconstruction of sea surface temperature using a wavelet transform. *Journal of Climate*, 6, 172-184.

Compo, G. and Torrence, P. (1996). Volatility in sea surface temperature. *Journal of Climate*, 9, 178-193.

Compo, G. and Torrence, P. (1998). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 11, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (1999). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 12, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2000). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 13, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2001). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 14, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2002). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 15, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2003). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 16, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2004). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 17, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2005). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 18, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2006). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 19, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2007). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 20, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2008). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 21, 1606-1619.

Compo, G. and Torrence, P. (2009). Wavelet analysis of sea surface temperature variability. *Journal of Climate*, 22, 1606-1619.

3. Congreso Estudiantil Posgrado de Ingeniería Eléctrica, 2010, Poster

La pequeña edad de hielo y la actividad solar

María del Carmen Leal Silva, UNAM, Facultad de Ingeniería, México DF,
carmen@geofisica.unam.mx

Victor Manuel Velasco Herrera, UNAM, Instituto de Geofísica, México DF,
vmv@geofisica.unam.mx

Resumen

El estudio de las condiciones invernales en la zona del Báltico es de gran importancia ya que el hielo es un elemento primordial del medio ambiente de la zona y afecta directa o indirectamente muchos de los patrones oceanográficos, climáticos, ecológicos económicos y culturales de la región.

Para nuestro estudio analizamos el índice de hielo en la zona del Báltico desde 1501 y su relación con la actividad solar (Berilio-10) utilizando la transformada wavelet de Morlet, el análisis wavelet cruzado y el wavelet de coherencia. Encontramos que la variabilidad de las condiciones de hielo esta modulada entre otros factores por la actividad solar secular.

Introducción

Europa occidental experimentó clima extremadamente frío y condiciones de hielo extremas entre 1430 y 1850 (Pequeña edad de hielo) [1]. El estudio de las condiciones invernales en la zona del Báltico es de gran importancia ya que hasta pequeños cambios en el clima producen un gran impacto en el hielo [2]. La formación y el crecimiento del hielo se ve afectada por factores meteorológicos (temperatura, humedad, velocidad del viento, etc.), oceanográficos-morfológicos (salinidad, temperatura del agua, profundidad del agua, etc.) [3] y otros factores (actividad solar).

En este trabajo presentamos evidencia de variaciones naturales del clima a escalas de tiempo seculares. Estudiamos la severidad de hielo en invierno (IWI) en la zona del Báltico desde 1501 en relación al isótopo Be-10 el cual se forma en la atmósfera y es un indicador de la actividad solar [4]. En nuestro trabajo realizamos el análisis espectral de las series de tiempo aplicando la transformada wavelet de Morlet [5] para obtener las principales periodicidades. Estudiamos la relación que existe entre las series aplicando las transformadas wavelets cruzada y de coherencia.

Datos y Método

En este estudio, utilizamos datos del índice de la severidad de hielo en invierno (IWI) de 1501-2009 para la región del Báltico. Los datos de IWI para el periodo 1501-1995 fueron obtenidos del "Historical Climatic Data Bank Germany" [6] y los datos de 1996-2009 fueron obtenidos del "Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany" [7]. También usamos los datos anuales de concentración de Berilio en núcleos de hielo en Groenlandia Dye-3 para el periodo 1424-1985 como indicador de la actividad solar [4].

Para analizar la evolución en el tiempo de las principales periodicidades de una serie de tiempo no estacionaria nosotros aplicamos el método wavelet utilizando el wavelet de Morlet [5]. La transformada wavelet $W_n(s)$ es el producto interno (o convolución) de la función wavelet trasladada y dilatada con nuestra serie de tiempo original.

El espectro del wavelet cruzado de dos series de tiempo X y Y, con transformadas wavelet $W_n^X(s)$ y $W_n^Y(s)$ se define como: [6]. $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$, donde n es el índice de tiempo, s es la escala y (*) es el complejo conjugado. El ángulo de fase de W_n^{XY} describe la relación de fase entre las series de tiempo X y Y en el dominio tiempo-frecuencia.

Si dos series de tiempo presentan periodicidades similares no necesariamente implica una condición causa efecto. Una manera de encontrar si hay una relación entre dos series es utilizando el wavelet de coherencia. [8].

El wavelet de coherencia puede utilizarse para identificar tanto bandas de frecuencia como intervalos de tiempo donde las series de tiempo están relacionadas [9]. El wavelet cuadrado de coherencia es una medida de la intensidad de la covarianza de dos series. El nivel de significancia estadística se estima utilizando el Monte Carlo con ruido rojo [5].

Resultados

Los resultados de la transformada wavelet se muestran en la figura 1. Podemos observar una gran una gran variabilidad en las condiciones de hielo así como una tendencia hacia la baja en el último siglo. El berilio también presenta a disminuido lo cual es un indicador de un incremento en la actividad solar. Esto podría sugerir que el índice de la severidad de hielo está siendo afectado por la actividad solar.

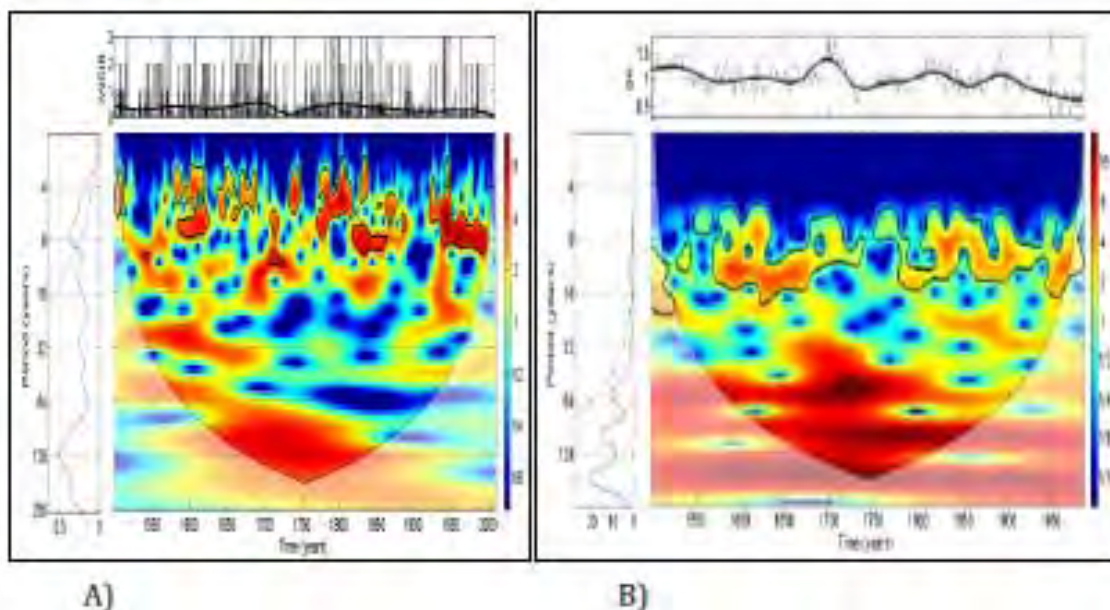


Fig.1. Análisis wavelet de Morlet de los datos estandarizados: IWI (A) and ^{10}Be (B). El panel superior de cada figura muestra las series de tiempo y sus tendencias. El panel central presenta el análisis espectral wavelet. El contorno negro indica el 95% nivel de confianza y la región fuera de la línea delgada muestra el COI. El código de colores utilizado para la potencia se encuentra en el lado derecho de cada panel central. El panel izquierdo muestra el espectro de potencia global, la línea punteada representa el nivel de significancia del espectro global y se refiere a la potencia del ruido rojo al 95 % del nivel de confianza [5].

En la figura 2 se presentan los resultados del wavelet cruzado y del wavelet de coherencia entre las series de tiempo de IMI y Be-10. El análisis espectral muestra una fuerte conexión entre las series de tiempo.

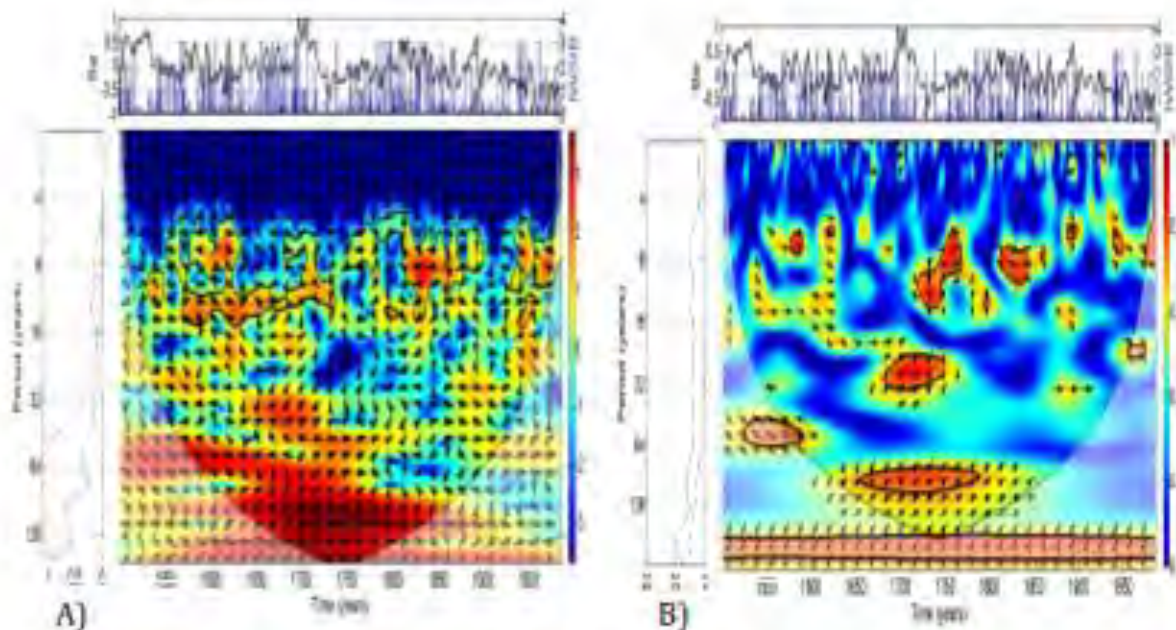


Fig.2. (A) La transformada wavelet cruzada de los datos y (B) el análisis de coherencia cuadrado de las series de tiempo. El panel superior de cada figura muestra las series de tiempo. El panel central presenta el análisis espectral wavelet. El contorno negro indica el 95% nivel de confianza y la región fuera de la línea delgada muestra el COI. El código de colores utilizado para la potencia se encuentra en el lado derecho de cada panel central. El panel izquierdo muestra el espectro de potencia global, la línea punteada representa el nivel de significancia del espectro global y se refiere a la potencia del ruido rojo al 95 % del nivel de confianza [5].

Conclusiones

En el presente estudio se propone el uso de la transformada wavelet continua, el wavelet cruzado y el wavelet de coherencia para investigar como se ve afectada la actividad solar la formación de hielo en el Báltico.

- De las series de tiempo se pueden observar severas condiciones de hielo y baja actividad solar durante la pequeña edad de hielo.
- En el último siglo se ha detectado un incremento en la actividad solar y un decremento en la severidad de hielo.
- Se confirma la presencia de las periodicidades seculares en las series de tiempo de hielo y su sincronización con la actividad solar.

La variabilidad solar está entrando en un mínimo secular [10] por lo que durante los próximos 60 años podríamos esperar un incremento en la severidad del hielo en el Báltico debido a la conexión entre actividad solar y condiciones invernales.

Referencias

- [1] Tkachuck, R., "The Little Ice Age," *Origins* 10(2), pp. 51–65, 1983.
- [2] Omstedt A., and Hansson D., a. The Baltic Sea ocean climate system memory and response to changes in the water and heat balance components. *Cont Shelf Res* 26:236-251. 2006.
- [3] Tinz, B., On the relation between annual maximum extent of ice-cover in the Baltic Sea and sea-level pressure as well as air temperature field. *Geophysica*, 32, 319–341, 1996.
- [4] Beer, J., Blinov, A., Bonani, G., Finkel, R.C., Hofmann, H.J., Lehmann, B., Oeschger, H., Sigg, A., Schwander, J., Staffelbach, T., Stauffer, B., Suter, M., Wöflli, W., Use of ^{10}Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Nature* 347, 164-166, 1990.
- [5] Torrence, C., and Compo, G.P., A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 79, 61-78, 1992.
- [6] <http://www.hisklid.de/>
- [7] http://www.bsh.de/en/Marine_data/Observations/Ice/FlaeelssummeOst.jsp
- [8] Velasco, V.M., Mendoza, B. and J. F. Valdes Galicia. The 120-year solar cycle of the cosmogenic isotopes. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference, Volume 1*, 553- 556, 2007.
- [9] Liu, P. C., Wavelet spectrum analysis and ocean wind waves. *Wavelets in Geophysics*, E. Foufoula-Georgiou and P. Kumar, Eds., Academic Press, 151–166, 1994
- [10] S. Duhau and C. de Jager: The Forthcoming Grand Minimum of Solar Activity; *Journal of Cosmology*, 2010, vol. 8, 1983 – 1999.

4. 1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences ICIAS, 26-29 October, Cancun, Q. R., México, 2010, poster.

Solar influence on the ice winter severity index trend in the Baltic Sea

M. Carmen Leal Silva, Universidad Nacional Autónoma de México, CCADET, México DF, México.

carmen@geofisica.unam.mx,

Víctor Manuel Velasco Herrera, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, México DF

vmv@geofisica.unam.mx

Graciela Velasco Herrera, Universidad Nacional Autónoma de México, CCADET, México DF
graciela.velasco@ccadet.unam.mx

We analyzed the ice winter severity index on the Baltic region for the period 1501-2009. The ice is a very important parameter in the climate system of the Baltic and it can affect directly or indirectly many of the oceanographic, climatic, ecological, economical and cultural patterns. Applying the wavelet analysis we have found that the variability of this index is modulated, among other factors, by the secular solar activity. We propose that the sun is experiencing a new quiet stage, as it happened during the Maunder and Dalton minimums; this new stage has begun at 2010 and it will last for 60 years.

Solar influence on the ice winter severity index trend in the Baltic Sea



Leal Silva M. C.¹, Velasco Herrera V.², Velasco Herrera G.³

¹Universidad Tecnológica de México, Ciudad de México, México
²Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Toluca, México
³Centro de Estudios Científicos, Universidad Tecnológica de México, Ciudad de México, México



Abstract

We analyzed the ice winter severity index on the Baltic region from 1501. The ice is a very important parameter in the climate system of the Baltic and it can affect directly or indirectly many of the oceanographic climatic, ecological, economical and cultural patterns. Applying the wavelet transform analysis and the coherence wavelet analysis we have found that the variability of this index is modulated, among other factors, by the secular solar activity. We expect that the winter condition in the Baltic region will be severe for the following 60 years due to the new quiet stage of the sun.



Introduction

The study of ice winter condition in the Baltic Sea is of great importance since it is expected that even the smallest climatic change will be represented in ice impacts [1].

In this work we present the evidence of natural climatic variations on the secular time scale.

In our study we used the spectral analysis of the time series applying the wavelet transform to obtain the main periodicities. We have also analyzed the relationship between the series applying the coherence analysis.

Data and method

In this study, we used the ice winter severity index (IWSIB) from 1501 for the western Baltic region [2] (<http://www.hskid.de/>). We also used the annual data of ¹⁰Be concentration in polar ice core from the Greenland Dye-3 recorded for the period 1424-1985 [3] as a solar activity indicator.

To analyze the time evolution of the main frequencies we apply the wavelet method using the Morlet wavelet transform [4].

$$W_{\psi}(x) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \psi^n \left[\frac{(x' - x) \Delta t}{\lambda} \right]$$

λ is the scale, and x' is the translation parameter (slide in time), the $(*)$ denotes complex conjugated.

The coherence wavelet is used to identify if the time series are related [5].

$$R_n^2(x) = \frac{|\langle W_{\psi}^{10Be}(x) \rangle|^2}{\langle |W_{\psi}^{10Be}(x)|^2 \rangle \langle |W_{\psi}^{IWSIB}(x)|^2 \rangle}$$

Results

In figures 1 and 2 we present the time series used and their tendencies (upper panel), the wavelet transforms (central panel), the global wavelet spectrum (left panel) and the colour code (right panel).

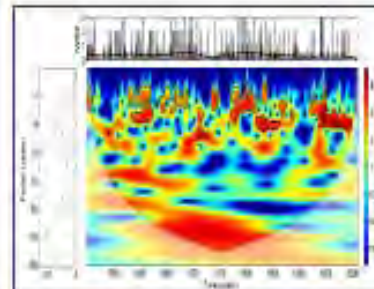


Fig 1 IWSIB wavelet transform.

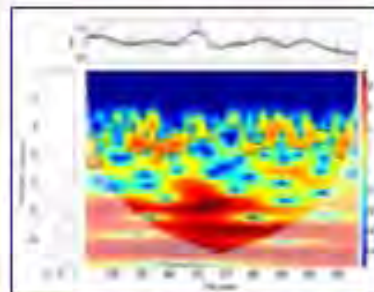


Fig 2 ¹⁰Be isotope wavelet transform.

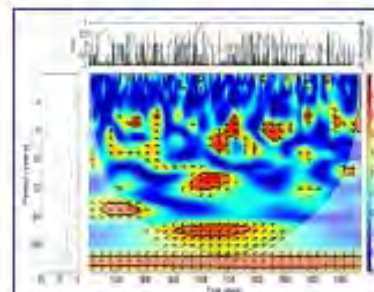


Fig 3 Coherence analysis of IWSIB and ¹⁰Be.

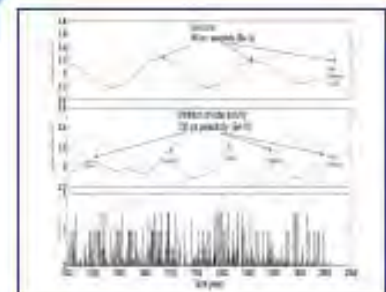


Fig. 4 Secular periodicity of solar activity and IWSIB.

The Morlet wavelet analysis shows some similarities between the time series by visual inspection of the individual wavelets.

The relationship between IWSIB and ¹⁰Be is shown in figure 3. The coherence wavelet shows periodicities with a high coherence level. The secular periodicities of IWSIB are phase synchronized with the solar activity.

The ice winter severity index is modulated by the secular periodicity of solar activity (figure 4).

Conclusions

The conclusions can be summarized as:

- During the little ice age a stronger sea ice condition and a lower solar activity has been detected.
- A milder sea ice conditions during the last century and an increase in solar activity has been found.
- We confirm the presence of secular periodicities in the time series and their synchronization to the ¹⁰Be isotope.
- We can expect a stronger sea ice condition in the Baltic region within the next 60 years due to the eminent decrease on solar activity.

References

- [1] Orstedt, A., and Hansson D., 2006 a. The Baltic Sea ocean climate system memory and response to changes in the water and heat balance components. *Cont. Shelf Res.* 26: 236-251.
- [2] Koslowski G. and Glaser R., 1995. Reconstructed of the ice winter severity since 1701 in the western Baltic. *Climatic Change* 31:79-99.
- [3] Beer, J., et al.: Use of ¹⁰Be in polar ice to trace the 11-year cycle of solar activity. *Nature* 347, 164-166.
- [4] Torrence, C. and Compo G., 1998. A particular guide to wavelet analysis, *bulletin of the American Meteorological Society* 79, 61-78.
- [5] Velasco, V.M., et al.: 2007. The 120-year solar cycle of the cosmogenic isotopes. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Volume 1, 553-556.

5. 38th COSPAR Scientific Assembly. 18-15 July, 2010

Title: The Little Ice Age and Solar Activity

Authors: Velasco Herrera, Victor Manuel; Leal Silva, C. M. Carmen; Velasco Herrera, Graciela

Affiliation: AA(Instituto de Geofisica, Universidad Nacional Autonoma de Mexico),
AB(Universidad Nacional Autonoma de Mexico-Instituto de Geof),
AC(Universidad Nacional Autonoma de Mexico-CCADET)

Publication: 38th COSPAR Scientific Assembly. Held 18-15 July 2010, in Bremen, Germany, p.4

Publication Date: 00/2010

Origin: ADS

Comment: Symposium D, session 21, paper number D21-0078-10 (Poster, Nr. Tue-182)

Bibliographic Code: 2010cosp...38.1763V

Abstract

We analyze the ice winter severity index on the Baltic region since 1501-1995. We found that the variability of this index is modulated among other factors by the secular solar activity. The little ice ages that have appeared in the North Hemisphere occurred during periods of low solar activity. Seemingly our star is experiencing a new quiet stage compared with Maunder or Dalton minimum, this is important because it is estimated that even small changes in weather can represent a great impact in ice index. These results are relevant since ice is a very important element in the climate system of the Baltic region and it can affect directly or indirectly many of the oceanographic, climatic, eco-logical, economical and cultural patterns.



The Little Ice Age and Solar Activity



Łukasz Stieglitz, Aleksandra Błędna, V. V. Yul'ina, Aleksandra Błędna

The Polish Academy of Sciences, Institute of Geophysics, ul. Gagarina 11, 01-465 Warszawa
 Institute of Geophysics, ul. Gagarina 11, 01-465 Warszawa
 Institute of Geophysics, ul. Gagarina 11, 01-465 Warszawa

Abstract

The purpose of this study is to analyse the long-term variability of ice winter severity index in the Baltic Sea since 1501. The inter-annual variability in the ice conditions is large and a tendency towards milder sea ice conditions during the last century has been detected from the ice winter severity index time series. We investigated the relationship between the ice conditions and the ^{10}Be isotope which is formed in the atmosphere and is an indicator of solar activity. In our study we showed the spectral analysis of the time series applying the wavelet transform to obtain the main periodicities. The results show that the ice conditions in the Baltic Sea region are strongly related to winter temperatures, we also confirm the presence of the secular periodicities and their synchronization to the ^{10}Be isotope which is an indicator of solar activity connection.

Introduction

The study of ice winter condition in the Baltic Sea is of great importance since it is expected that even the smallest climatic change will be represented in ice impacts [4].

In this work we present the evidence of natural climatic variations on the secular time scale. We examined the ice winter severity index in the Baltic region (IWSIB) since 1501 in relationship with meteorological factors such as temperature and precipitation. We also studied the connection between IWSIB and the ^{10}Be isotope which is formed in the atmosphere and is an indicator of solar activity [1].

In our study we used the spectral analysis of the time series applying the wavelet transform based on Morlet function to obtain the main periodicities. We have also analyzed the relationship between the series applying the Coherence Analysis.

Data and method

In this study, we used winter data set of temperature (°C), precipitation (mm) and IWSIB since 1501 for the western Baltic region [2] [3]. The most important variation in ice conditions takes place in winter especially trough December to February. The 1501-1995 data were obtained from the Historical Climatic Data Bank Germany (<http://www.hskdd.de/>).

We also used the annual data of ^{10}Be concentration in polar ice core from the Greenland Dye-3 recorded for the period 1424-1995 [1] as a solar activity indicator.

To analyze the time evolution of the main frequencies of a non-stationary time series we apply the wavelet method using the Morlet wavelet transform [5].

If two time series have similar periodicities this does not necessarily imply a cause-effect situation. A way to study if there is a relation between two time series is using the wavelet coherence analysis [6].

Results

The results using the wavelet transform are presented through figures 1-3. The upper panel shows the time series of the involved data and their tendencies. The central panel presents the spectral wavelet analysis of data. The thick black contour indicates the 95% confidence level and the region below the thin line shows the cone of influence. The left panel shows the global power spectrum, the dashed line represents the significance level of the global spectra and it refers to the power of red noise level at 95% confidence [5].

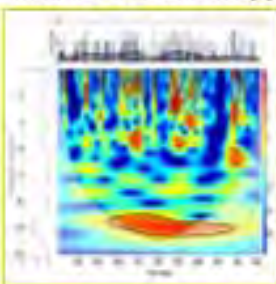


Fig 1. IWSIB raw extraction

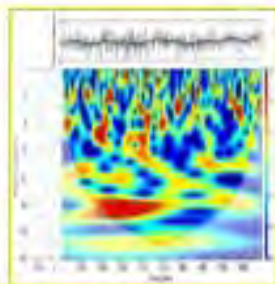


Fig 2. Water temperature/winter conditions

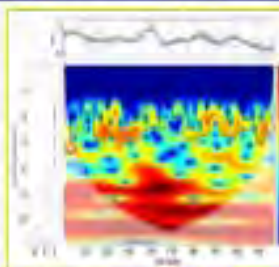


Fig 3. ^{10}Be isotope wavelet transform

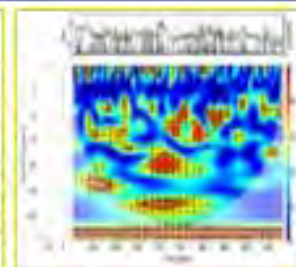


Fig 4. Coherence analysis of IWSIB and ^{10}Be

Time series	Periods in years				
	2-8	12-15	22	60	80-180
^{10}Be	X	X	X	±	±
IWSIB	X	X			X
Temperature	X		±	X	±
Precipitation	X	X	±		X

Table 1. Summary of the main periodicities results for the climate phenomena used and activity

The main periodicities detected in time series of IWSIB, temperature, precipitation and ^{10}Be are shown in table 1. The relationship between the IWSIB and ^{10}Be is shown in figure 4.

The relationship between IWSIB and ^{10}Be is shown in figure 5. The coherence wavelets show periodicities with a high coherence level and phase synchronized.

Conclusions

The conclusions can be summarized as follows:

- The variability of ice conditions, temperature and precipitation is large and a tendency towards milder sea ice conditions, warmer temperature and increase in winter precipitation during the last century has been detected from the time series but also an increase in the solar activity is detected.

- The ice conditions are strongly related to the winter temperatures, we also confirm the presence of secular periodicities in the time series and they are synchronized to the ^{10}Be isotope which is an indicator of solar activity connection.

References

- [1] Beer, J., Blinnov, A., Bond, G., Frank, R.C., Hofmann, H.J., Lohmann, B., Oeschger, H., Sigg, A., Schwander, J., Stauffer, T., Steffler, B., Suter, M., Weller, W., 2000. Use of ^{10}Be in polar ice to track the 11-year cycle of solar activity. *Nature* 347, 954-956.
- [2] Koslowski, G. and Glaser, R., 1995. Reconstructed of the ice winter severity since 1701 in the western Baltic. *Climatic Change* 31: 79-90.
- [3] Koslowski, G. and Glaser, R., 1999. Variations in reconstructed of the ice winter severity since in the western Baltic from 1501 to 1930 and their implications for the North Atlantic Oscillation. *Climatic Change* 43: 175-191.
- [4] Omstedt, A., and Henson D., 2004. The Baltic Sea ocean climate system: memory and response to changes in the water and heat balance components. *Cont. Shelf Res* 24: 235-251.
- [5] Torrence, C. and Compo, G., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79: 61-79.
- [6] Valente, V.M., Mendez, B. and J.F. Valdes Galicia. The 100-year solar cycle of the cosmogenic isotopes. *Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Volume 1, 503-505, 2007.

6. *12th Scientific Assembly, 26-31 August 2013, International Association of Geomagnetism and Aeronomy. Presentación Oral.*

Solar Forcing on the Winter Precipitation in the Western Baltic Region

LEAL-SILVA CARMEN, POSGRADO INGENIERIA, UNAM

V. M. VELASCO HERRERA, INSTITUTO GEOFISICA, UNAM,

Abstract

Changes in climate patterns in the Baltic region are leading to a general increase in annual precipitation and affecting the ice formation. The solar activity variations can contribute to natural climate variations. In the present work we study the variability of Winter Precipitation reconstructed time series in the Baltic Sea since the 15th century and its possible connection with solar activity, based in a method for finding and measuring amplitude-phase cross-frequency coupling in time series. We present and extended Group of sunspots and the Total Solar Irradiance time series from 1501-1985. The extension shows a good correlation with the historical data. The 100 and 200 yrs periodicities found in the reconstructed time series are also presents during the Holocene. The 100 and 200 yrs periodicities do not present an inversion of phase which means that the proposed methodology is good. The reconstruction method allows us to combine the historical data with the instrumental data.

The results suggest that the Winter Precipitation in the Baltic Sea is modulated by solar activity in several frequency bands. According to our model a strong coupling between the 8 yrs periodicity in the Winter Precipitation time series and the secular periodicity of solar activity is present. We found that the Winter Precipitation is strongly modulated by solar activity at the 8 yrs periodicity. We also found that the 180 year periodicity of the Barycentre Motion modulates the amplitudes of the 8 yrs periodicity of the Winter Precipitation. We also use the partial coherence transform in order to find the main contributor to the variance of precipitation time series. We found that solar activity is the main contributor to the variance in the climatic parameters.