



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INGENIERÍA GEOFÍSICA

**MÉTODO PARA EL PRONÓSTICO DE EVENTOS DE NATURALEZA
ESTOCÁSTICA POR ANÁLISIS ESPECTRAL Y ESTADÍSTICO: APLICACIÓN A INCREMENTOS A
NIVEL TERRESTRE DE PARTÍCULAS SOLARES RELATIVISTAS (GLE'S POR SUS SIGLAS EN
INGLÉS) Y HURACANES DEL ATLÁNTICO NORTE DE CATEGORÍA 5**

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO GEOFÍSICO PRESENTA

ALAN JUÁREZ ZÚÑIGA

DR. JORGE ALBERTO PÉREZ Y PERAZA

DIRECTOR DE TESIS

MÉXICO D.F., MAYO DE 2014



A Sandy, Ale, Papá y Mamá

Siempre han estado conmigo y han creído en mí,
mis logros son suyos.

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 3 |
| INTRODUCCIÓN | 4 |
| 1. NOCIONES DE FÍSICA SOLAR | 6 |
| 1.1. EL INTERIOR DEL SOL | 6 |
| 1.2. LA ATMÓSFERA SOLAR | 7 |
| 1.2.1. LA FOTÓSFERA | 8 |
| 1.2.2. LA CROMÓSFERA | 9 |
| 1.2.3. LA CORONA | 9 |
| 1.2.3.1. EL CAMPO MAGNÉTICO SOLAR Y LAS MANCHAS SOLARES | 10 |
| 1.2.3.2. FULGURACIONES SOLARES | 12 |
| 1.2.3.3. VIENTO SOLAR | 13 |
| 1.2.3.4. HELIOSFERA | 14 |
| 1.3. RAYOS CÓSMICOS | 14 |
| 1.3.1. RAYOS CÓSMICOS GALÁCTICOS | 16 |
| 1.3.2. RAYOS CÓSMICOS SOLARES | 17 |
| 1.3.3. RAYOS CÓSMICOS ANÓMALOS | 18 |
| 1.4. EFECTOS Y PELIGRO DE LOS RAYOS CÓSMICOS | 19 |
| 1.5. OCURRENCIA DE LOS EPS RELATIVISTAS | 22 |
| 2. CICLONES TROPICALES | 28 |
| 2.1. FORMACIÓN Y DESARROLLO | 29 |
| 2.1.1. ETAPA DE FORMACIÓN | 30 |
| 2.1.2. CICLÓN TROPICAL MADURO | 31 |
| 2.1.3. DISIPACIÓN | 32 |
| 2.2. CLASIFICACIÓN DE CICLONES TROPICALES | 33 |
| 2.2.1. ESCALA DE HURACANES SAFFIR-SIMPSON | 34 |
| 2.3. IMPACTOS SOCIALES Y AMBIENTALES | 35 |
| 2.3.1. HURACANES EN EL GOLFO DE MÉXICO Y EN EL PACÍFICO MEXICANO | 37 |
| 2.4. PATRONES TEMPORALES DE LOS CICLONES TROPICALES EN EL ATLÁNTICO | 38 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 2.5. | MODELOS DE PRONÓSTICO DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO..... | 42 |
| 3. | PROCEDIMIENTO PARA PRONÓSTICO DE GLE | 45 |
| 3.1. | DATOS DE RCG Y ANÁLISIS PREVIOS..... | 46 |
| 3.2. | PROCEDIMIENTO PARA EL PRONÓSTICO DE GLE | 53 |
| 3.2.1. | VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO..... | 61 |
| 3.2.2. | RESULTADOS Y CONCLUSIONES | 63 |
| 3.3. | PRONÓSTICO DE HURACANES DE CATEGORÍA 5 EN EL ATLÁNTICO..... | 66 |
| 3.3.1. | DATOS DE HURACANES Y SST..... | 68 |
| 3.3.2. | PRONOSTICO DE HA5..... | 69 |
| 3.3.3. | RESULTADOS Y CONCLUSIONES | 74 |
| 3.4. | RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS | 76 |
| | ANEXO A. LÓGICA DIFUSA..... | 78 |
| | ANEXO B. ANÁLISIS DE FOURIER | 83 |
| | ANEXO C. TEORÍA DEL MUESTREO | 90 |
| | ANEXO D. TRANSFORMADA ONDÍCULA | 92 |
| | REFERENCIAS..... | 102 |

RESUMEN

Los Eventos de Partículas Solares relativistas son detectados a nivel de la superficie terrestre (GLE por sus siglas en inglés) por la red mundial de detectores de rayos cósmicos. Estos eventos se asocian con las fulguraciones solares y su ocurrencia se ha asumido de naturaleza estocástica. En esta tesis realizamos una revisión teórica sobre física solar y la estructura del sol, hacemos énfasis en la cromosfera y corona solar por ser la zona productora de partículas relativistas y mencionamos también algunos de los efectos de los GLE en la Tierra e información de estudios previos sobre su ocurrencia. En este trabajo se demuestra por primera vez que el fenómeno no es totalmente aleatorio, sino que presenta periodicidades que permiten predecir su ocurrencia. Esta hipótesis se basa en trabajos previos realizados en el Instituto de Geofísica de la UNAM en los que se puso en evidencia que existe una cierta sincronización entre los modos oscilatorios de las diferentes capas de la atmósfera solar, por lo que la producción de partículas relativistas en esas capas no puede ser un fenómeno totalmente aislado de la fenomenología que tiene lugar desde las capas subfotosféricas hasta la corona solar. Mediante el análisis espectral y aplicando conceptos de estadística y lógica difusa mostramos que, a pesar de su carácter cuasi-estocástico, pronosticamos en este trabajo los intervalos de tiempo más probables para la ocurrencia de los siguientes GLE para el presente y los futuros ciclos solares observando el comportamiento las periodicidades con mayor contenido energético. Como una extensión del trabajo, mostramos que nuestro procedimiento, al que llamamos PAELD, se adapta para pronóstico de otros fenómenos naturales, en particular huracanes Categoría-5 en el Atlántico; obtenemos fechas y presentamos resultados para lo que proponemos como periodos donde las condiciones de formación de un huracán de categoría 5 son óptimas, por esta razón, una sección de la tesis se concentra en entender algunas definiciones y principios de formación de estos fenómenos así como de sus efectos.

INTRODUCCIÓN

Los eventos de protones solares relativistas que producen incrementos a nivel de suelo (GLE por sus siglas en inglés) son fenómenos cuya naturaleza se asume aleatoria. Sin embargo, hasta cierto punto siguen el comportamiento en el tiempo del ciclo de once años de actividad solar pero no siguen la intensidad del ciclo, por ejemplo, durante el ciclo 23 ocurrieron más GLE que en el ciclo 22 que fue más intenso. En total, 71 GLEs han sido registrados, el primero evento medido ocurrió el 28 de febrero de 1942 y el último el 17 de mayo de 2012.

Los procesos que tienen lugar en las diferentes capas de la atmósfera solar presentan una evolución muy compleja en el tiempo y el espacio. Una gran cantidad de esfuerzos se han hecho durante décadas, para crear modelos que permitan explicar su comportamiento. Sin embargo, hasta estos días sólo efectos parciales se puede entender, y por supuesto muy poco se pueden hacer con los modelos teóricos para predecir cuándo una llamarada solar productora de partículas relativistas va a ocurrir. Como resultado, los intentos por predecir GLE se limitan al monitoreo en tiempo real, las observaciones para la predicción requieren de sistemas organizados de estaciones de monitores de neutrones conectadas entre sí y con computadoras que tienen algoritmos específicos, que en el mejor de los casos, sólo brindan información minutos u horas antes de la ocurrencia de un evento.

El análisis espectral de Fourier juega un papel importante en el estudio de señales. Cuando las señales muestran comportamientos periódicos que se repiten en intervalos fijos, el análisis de Fourier puede describirlos convenientemente. Sin embargo, muchas series de tiempo tienen un comportamiento no estacionario y de rápida variación en el tiempo. En estudios sobre ciencias de la Tierra es común encontrar señales del tipo no estacionario por lo que su análisis espectral con Fourier tendrá algunas limitaciones al no detectar las variaciones locales de las periodicidades contenidas en la señal. La transformada de ondícula tiene varias ventajas sobre el análisis de Fourier; caracteriza eficazmente variaciones locales en señales no estacionarias y de rápida transitoriedad. La ocurrencia de una gran cantidad de fenómenos en la naturaleza se comporta de forma oscilatoria, eventos como los Huracanes de Categoría 5 (HC5) en el Atlántico y los GLE no son la excepción, la serie temporal de huracanes tiene intrínsecamente periodos característicos que describen cierta tendencia oscilatoria al igual que ocurre con los eventos de partículas relativistas, estos periodos se encuentran ligados por procesos físicos que aun no son identificados claramente.

Por medio del análisis espectral de series de datos de Rayos Cósmicos Galácticos se ha mostrado que los EPS medidos a nivel del suelo mantienen una tendencia cuasi-armónica representada por periodicidades intrínsecas a la ocurrencia de los GLE. Este hecho se opone a la completa aleatoriedad de su ocurrencia y en consecuencia, al ignorar la compleja física involucrada y utilizando solo las periodicidades mencionadas, desarrollamos una metodología basada en el

análisis espectral con ondículas y de Fourier y con una aplicación de lógica difusa para el pronóstico de la fecha de ocurrencia de GLE con varios meses e incluso años de anticipación.

De la misma forma, mostramos que la metodología se puede aplicar al pronóstico de fenómenos de naturaleza similar, con el análisis espectral con ondículas y Fourier y utilizando lógica difusa pretendemos caracterizar la región temporal donde puede ocurrir la formación de huracanes de categoría 5 en Atlántico, con esto nos referimos a la definición de un lapso temporal sobre el cual las condiciones para la formación de HC5 en el Atlántico es favorable. En éste trabajo nos limitamos a ubicar la región de probabilidad para la ocurrencia del primer HC5 del Atlántico para el nuevo ciclo de huracanes denominado grupo 8.

1. NOCIONES DE FÍSICA SOLAR

El Sol es una estrella de tamaño, edad, temperatura y brillo promedio. Debido a su cercanía, es la única estrella en la cual podemos medir propiedades internas como la densidad, la rotación o la temperatura. Siendo la estrella más cercana a la Tierra, su estudio ha ayudado a entender algunos de los procesos que se observan en otras estrellas en el universo. El Sol tiene una estructura en capas esféricas cuyos límites no han sido bien establecidos. Sin embargo, diferencias entre las propiedades físicas de las distintas capas permiten describir y señalar cada una de ellas.

La actividad solar regula los efectos en el clima interplanetario. El campo magnético solar, el viento solar y las eyecciones de masa en la corona propagándose en el medio interplanetario son fenómenos que nos ayudan a estudiar el Sol y entender en poco de su compleja física (Hansmeier, 2006).

1.1. EL INTERIOR DEL SOL

Los procesos que ocurren en el Sol han sido estudiados con dificultad durante muchos años. Recientemente, gracias al desarrollo de tecnologías tales como la Heliosismología, y a nuevos métodos de observación astrofísica, algunos fenómenos relacionados al Sol se han descubierto. Esto ha permitido plantear nuevos modelos que ayudan a entender sólo en forma parcial su comportamiento. La estructura en capas esféricas del Sol explica gran parte de los fenómenos observados en él y en el medio interplanetario (Vita-Finzi, 2008). Se sabe desde el siglo pasado que el Sol está formado por un núcleo, la zona radiativa, la zona convectiva, la fotosfera, la cromósfera y la corona.

El núcleo del Sol se encuentra a temperaturas de alrededor de 15×10^6 [K] y a presiones del orden 3×10^{11} atmosferas. Su tamaño es de $\frac{1}{4}$ del radio del centro del Sol a la fotosfera y está formado por núcleos de átomos, principalmente neutrones, moviéndose a velocidades muy altas. El núcleo es la fuente de la energía solar, la producción de energía se explica por el fenómeno de fusión nuclear; este proceso consiste en el choque de dos protones con energía mayor que la repulsión eléctrica entre ellos, teniendo como resultado la formación de elementos más pesados y la generación de rayos gama que interactúan con los átomos cuando avanzan hacia el exterior del Sol y se convierten, en su gran mayoría, en fotones de menor energía. Sólo una mínima parte de la energía térmica producida en el núcleo logra escapar, si la energía total del núcleo fuera visible, el Sol sería 10^{13} veces más brillante que lo que podemos ver.

La zona radiativa se encuentra entre el núcleo y la zona convectiva. Esta capa está compuesta por gases altamente ionizados debido a la pérdida de electrones. Su temperatura es cercana a 7×10^6 [K] en la base. Sobre la zona radiativa se encuentra la zona convectiva (Figura 1.1), en esta zona el calor es transmitido por convección. La profundidad de esta capa del sol es de aproximadamente 150,000 [Km] ó $\frac{7}{10}$ el radio solar. La evidencia de la existencia de la zona convectiva, son las

estructuras que se pueden ver en la superficie de la fotosfera y que son llamadas granulación (Figura 1.2).

La transición entre la zona radiativa y la zona convectiva es la tacoclina. Debido al movimiento diferencial del plasma con la profundidad y la latitud, se piensa que en la zona convectiva es donde se genera el campo magnético del Sol. La temperatura en la tacoclina es de 2×10^6 K y en la superficie de la zona convectiva de 6,000 K aproximadamente.

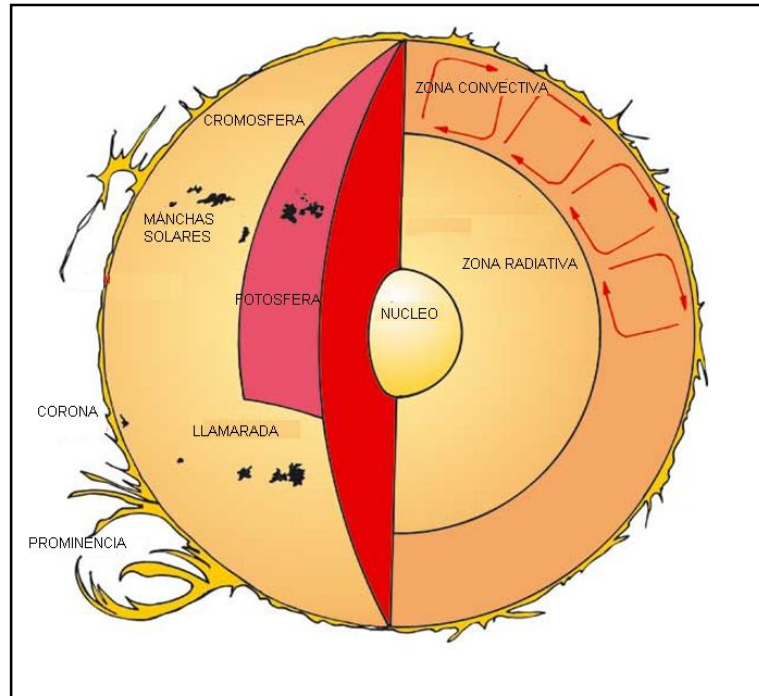


Figura 1.1 Estructura general del Sol.

1.2. LA ATMÓSFERA SOLAR

El sol es la única estrella cuya superficie es visible desde la tierra. La fotosfera, la cromosfera y la corona son las tres distintas regiones que componen la atmósfera solar. Varios fenómenos como las manchas solares, fulguraciones y prominencias ocurren en las capas más externas del sol, y están asociadas con el aumento o disminución de la actividad en regiones de la cromosfera solar. Los rayos cósmicos solares son producidos por las fulguraciones solares y su propagación en el medio interplanetario está regida por los campos magnéticos asociados a las manchas solares (campos magnéticos interplanetarios) que se extienden más allá de la atmósfera solar. Debido a que es en la atmósfera solar donde se producen los fenómenos que nos interesan, haremos una descripción más detallada sobre esta sección del Sol, basándonos en el texto de Sakurai (1974), Karttunen (2007) y Vita-Finzy (2008).

1.2.1. LA FOTÓSFERA

La fotosfera es la superficie exterior del Sol y la capa más baja de la atmósfera solar. Esta región se considera opaca pues los átomos de hidrógeno que la componen son muy eficientes absorbiendo la luz. Sin embargo, es la región del Sol de donde se emite la mayor cantidad de luz que llega a la Tierra. Las condiciones físicas de la fotosfera como, la temperatura, la densidad y la opacidad aumentan drásticamente con la profundidad. La fotosfera emite radiación en el espectro continuo, es decir, radiación electromagnética en todas las longitudes de onda, incluyendo ondas de radio, infrarrojo, luz visible, luz ultravioleta, rayos-X y rayos gamma, pero al mismo tiempo la radiación es absorbida y emitida constantemente, la opacidad se debe a esta atenuación de la energía. La frontera inferior de la fotosfera se estima en alrededor de 300 [Km] y su temperatura varía en el rango de 4,000 [K] en la zona profunda, a 44,000 [K] en las regiones más altas donde es transparente y se encuentra el límite con la cromósfera.

En la superficie de la fotosfera se observan estructuras granulares del tamaño entre 200 a 800 [Km] que tienen un tiempo de vida de promedio de 8 minutos. Estas estructuras señalan cambios horizontales y verticales de temperatura asociados a la zona convectiva en la región subfotosférica debido a cambios de presión y temperatura con la profundidad. En las regiones de mayor actividad solar y bajo la influencia de fuertes campos magnéticos la granulación es afectada. Estos gránulos o celdas tienden a agruparse en estructuras de mayor tamaño (~30,000 [Km]) que se conocen como supergranulación (Figura 1.2). En los límites de la supergranulación se observan las espículas y líneas de campo magnético.

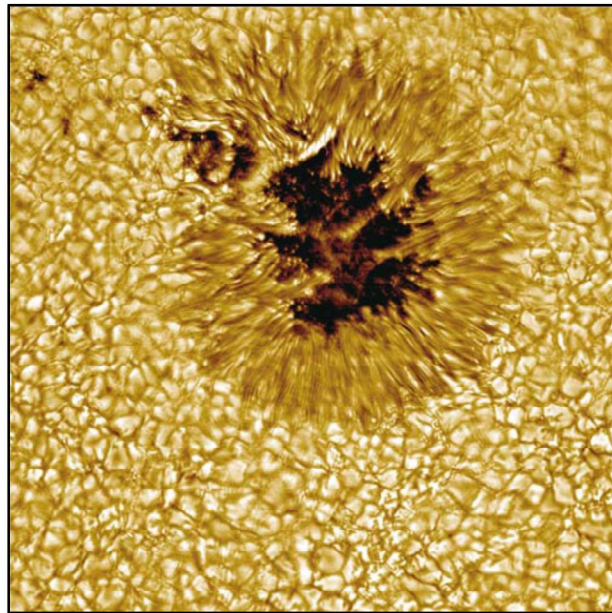


Figura 1.2 Manchas solares y granulación en la fotosfera. (Tomada de Vita-Finzi, 2008).

1.2.2. LA CROMÓSFERA

La capa que se encuentra sobre la fotosfera es la cromósfera, esta capa tiene mayor importancia, pues es donde ocurren las fulguraciones solares productoras de rayos cósmicos. En general, la cromósfera es transparente y no se puede observar bajo condiciones normales, se ha podido estudiar gracias a instrumentos especiales, o bajo condiciones específicas como un eclipse total de sol. La visibilidad en el espectro continuo ayuda a definir el límite entre la fotosfera y la cromosfera ya que esta última es transparente. El espesor estimado de la cromósfera es de alrededor de 5 [Km].

Estructuras como las espículas, manchas solares y las fulguraciones solares, que son indicativos de la actividad solar, aparecen en la cromósfera. Las espículas son estructuras como picos que aparecen en la zona superior de la cromósfera e indican la zona fría de esta región, se producen en los bordes de la supergranulación en la fotosfera y se asocian con jets de gas escapando. La variación de la temperatura en la cromósfera es compleja y aun no bien entendida, su temperatura más baja es en el límite con la fotosfera y varía alrededor de 6,000 [K], aumenta lentamente con la altura en la cromósfera baja (<4000 [Km]) e incrementa rápidamente en la cromósfera superior alcanzando incluso 10^6 [K] en el nivel coronal. En las espículas la temperatura varía con la altura desde 10,000 [K] a 3,000 [K] hasta 50,000 [K] en alturas de 4,000 [Km].

En la cromósfera ocurren también unas estructuras interesantes en forma de vórtice o estriación a las que se les llama fibrillas. Las fibrillas están relacionadas con los campos magnéticos y con la formación de fulguraciones solares (Sakurai, 1974). Estas estructuras aparecen en centros de actividad antes de la aparición de manchas solares.

1.2.3. LA CORONA

La corona es la capa más alta de la atmósfera solar, se extiende en el medio interplanetario, incluso más allá de la órbita de la Tierra y su límite no está bien definido, durante un eclipse total de Sol es posible observarla con instrumentos especiales, se ha visto que la corona se extiende a distancias mayores de varios radios solares. La temperatura de la corona baja se estima en 10^6 [K] o mayor. Esta región de la atmósfera solar está compuesta por un plasma de electrones y protones de muy baja densidad y que varía de una región a otra.

La forma de la corona está estrechamente relacionada con los ciclos de actividad solar. Cuando el Sol tiene un máximo de actividad, la corona está bien desarrollada y emite líneas de manera uniforme aunque no simétricas. En los mínimos de actividad solar la corona se concentra principalmente en el ecuador solar con una extensión importante. Estos cambios en la forma de la corona, parecen depender de los cambios temporales del campo magnético solar. La corona es una parte muy dinámica del Sol. Las observaciones muestran que la actividad en la corona y los eventos violentos aumentan en número conforme aumenta el número de manchas solares, y la actividad es mínima durante mínimo de manchas solares.

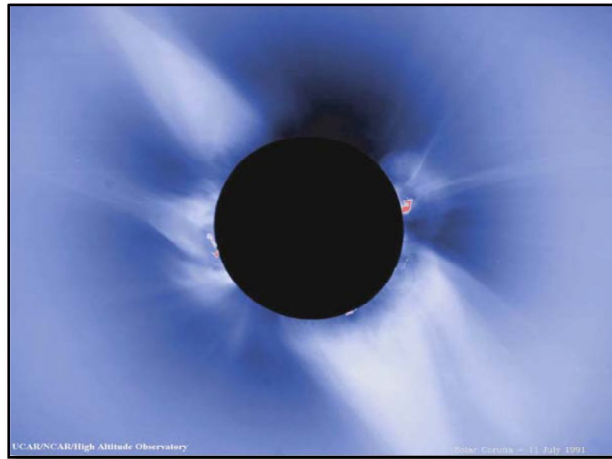


Figura 1.3 La corona observada durante un eclipse de sol (Tomada de NASA and UCAR/NCAR).

1.2.3.1. EL CAMPO MAGNÉTICO SOLAR Y LAS MANCHAS SOLARES

El origen y comportamiento del campo magnético solar se explica de forma similar al del campo geomagnético. La teoría de la dínamo en conjunto con la magnetohidrodinámica, establecen que un fluido en movimiento con simetría axial puede generar un campo magnético por acción dinamo, este enunciado se le conoce como el teorema de Cowling (Cowling, 1934). Sin embargo, el origen del campo magnético solar no es entendido completamente y es uno de los problemas más serios en hidromagnetismo.

La teoría de la dínamo describe el campo magnético solar. Este campo tiene origen debajo de la fotosfera en la zona de convección del hidrógeno y parece interactuar siempre con estructuras convectivas como la granulación y estar asociado íntimamente con la rotación diferencial del Sol. El Sol no rota como un cuerpo rígido, a diferencia de la Tierra, el material cercano al ecuador solar se desplaza más rápido que el material cercano a los polos, produciendo con este mecanismo que las líneas de campo magnético se alarguen en latitudes ecuatoriales y formen campos con formas toroidales y cuyas líneas de campo tienen direcciones opuestas en los dos hemisferios del Sol; en promedio pasan 5.5 años desde la configuración bipolar de los campos hasta alcanzar la configuración toroidal. Después de alcanzar el extremo, las líneas de campo magnético se reordenan perdiendo energía hasta alcanzar la posición bipolar en el nivel de energía mínima. Durante este proceso el número de manchas solares disminuye.

Observaciones continuas del campo magnético a lo largo del siglo pasado, permitieron a Babcock en 1958, descubrir la inversión del campo magnético solar, la cual tardó alrededor de 20 años. Puesto que este proceso no ocurre al mismo tiempo para las dos regiones polares, se infiere que el campo magnético tiene origen en capas poco profundas dentro del Sol por lo que sus efectos son más locales, que si fueran producidos en capas internas, además, la inversión del campo

magnético ocurre en los periodos de máxima actividad solar. El campo magnético solar se aproxima al producido por un dipolo, se comprime y se extiende en dirección radial desde el ecuador solar en dos hemisferios separados por una hoja neutra.

Asociado al campo magnético solar, un fenómeno interesante ocurre en la zona convectiva cuando la fuerza del material ascendente es mayor a la fuerza del campo magnético que se le opone, tubos de flujo del campo magnético toroidal son transportados a la superficie fotosférica. Estos tubos de flujo magnético constituyen las manchas solares bipolares. El diámetro de las manchas solares es de cerca de 10,000 [Km] pero los más grandes pueden medir más de 20,000 [Km]. La intensidad del campo magnético en las manchas solares es del orden de 3000 [G] ó 0.3 [T]. El desplazamiento de las manchas solares parece ser estocástico pero, al igual que en el desplazamiento de los vórtices o fibrillas, un componente de rotación se ha observado, el efecto Coriolis. La fuerza de Coriolis es la que experimentan los objetos que se desplazan en la superficie de un cuerpo en rotación, produce rotación en el sentido de las manecillas del reloj en el hemisferio sur y en sentido contrario en el hemisferio norte. Este fenómeno se observa también en los ciclones tropicales en la Tierra.

Se ha observado que las fulguraciones solares productoras de rayos cósmicos solares ocurren en grupos de manchas solares con polaridad inversa. Las líneas de campo magnético asociados a las manchas solares, que se extienden mas allá de la cromosfera hasta llegar a la corona, pueden extenderse hasta el medio interplanetario por acción del viento solar.

El campo magnético y las manchas solares cambian rápidamente con el tiempo mostrando variaciones incluso de un día a otro. Actualmente, se sabe que el Sol tiene ciclos de actividad principal; de 11 y 22 años. Estos ciclos están relacionados con los ciclos de variación en el número de manchas solares y el origen y desarrollo del campo magnético del Sol. La característica que se ha observado por años es la variabilidad de 11 años en el número de manchas solares, en donde el numero incrementa de casi cero hasta un valor alto de alrededor de 100 en un periodo de ~4 a 5 años y después regresa a casi cero en los 6 a 7 años subsecuentes. Es por esta característica que el número de manchas solares sea considerado como índice para medir la actividad solar. El campo magnético polar y el campo en las manchas solares invierten su polaridad de un ciclo de 11 años a otro. Es decir, exhiben una periodicidad de 22 años.

Los procesos físicos responsables de los ciclos de 11 y 22 años de actividad solar, así como sus cambios seculares, no son aún bien entendidos, pero se cree que se debe a la acción de la dínamo solar. En la física solar el ciclo de 22 años (ciclo de Hale) es dominante, pero el ciclo de 11 años (ciclo de Schwabe) es una característica dominante en fenómenos geofísicos. El campo magnético solar tiene influencia importante en las partículas de los rayos cósmicos con energías menores a 20 [GeV].

1.2.3.2. FULGURACIONES SOLARES

Las llamaradas o fulguraciones solares son fenómenos energéticos que ocurren en la cromósfera donde el flujo magnético es muy alto caracterizado por la aparición de grupos de manchas solares. Las fulguraciones tienen efectos en todo el espectro electromagnético, lo que indica distintos niveles de energía en la aceleración de partículas menores a 500 MeV; ultravioleta, gamma, rayos X y ondas de radio, y en raras ocasiones partículas de alta energía (mayor a 1 [GeV]). La energía promedio entregada durante una fulguración es del orden de 10^{32} [ergs] en un periodo promedio de media hora; la potencia de una fulguración está relacionada con la altura del sitio donde se produce, en niveles bajos de la cromósfera la fulguración será más energética e impulsiva, esto se explica por el debilitamiento del campo magnético con la altura.

Estas estructuras pueden describirse en tres etapas: fases precursora, explosiva y principal (Sakurai, 1974 y Svestska, 1976). La fase precursora consiste en la formación rápida de zonas brillantes cercanas a las manchas solares e indica el inicio de la formación de una fulguración. La fase explosiva es la parte del fenómeno que incluye mayor energía y ocurre la aceleración de partículas con alta energía. Esta fase se caracteriza por la formación de filamentos en la región neutra de las líneas de campo magnético que unen el dipolo. En esta fase también se forman las ondas hidromagnéticas de choque, que son expulsadas por la corona solar y pueden alcanzar velocidades superiores a 2,000 [Km/s], que en ocasiones son capaces de reaccelerar las partículas aceleradas en la fulguración. Asociado con fulguraciones de larga duración, ocurren las eyecciones de masa en la corona (EMC), detrás de las ondas de choque viaja la nube de plasma caliente de aproximadamente 10^6 [g] con alta energía, del orden de KeV a MeV, que es arrojado por la corona a través de las líneas abiertas de campo magnético. Las EMC son los fenómenos con más energía en el sistema solar y causan la modulación en cortos periodos de los rayos cósmicos. Finalmente, al periodo de expansión de la onda de choque se le llama fase principal.

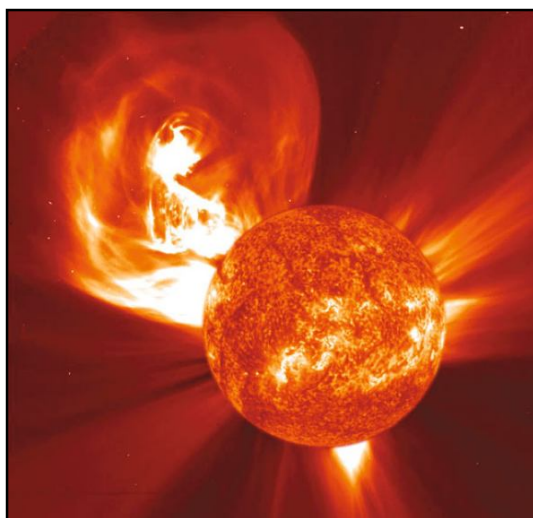


Figura 1.4 Eyección de masa en la corona observada el 4 de enero de 2002. (Tomada de Beer et al., 2012).

1.2.3.3. VIENTO SOLAR

La expulsión continua en la atmosfera superior del sol de partículas de relativamente baja energía cargadas eléctricamente se conoce como viento solar. El sol pierde más de 10^6 toneladas de material cada segundo que fluyen a lo largo de las líneas abiertas de campo magnético que atraviesan la corona y que tienen una velocidad promedio de 400 [Km/s] a 1 UA. Esta pérdida y flujo de masa saliendo del Sol fue sugerida por las tormentas magnéticas en la Tierra y la cola de los cometas.

Algunas observaciones señalan que en la cola de los cometas está formado en parte por gas ionizado, si el Sol emite ráfagas continuas de plasma, estas al chocar con las partículas neutras del cometa las excitarán produciendo un cambio energético que genera la cola de plasma. El movimiento de las partículas ionizadas está regido por el campo magnético, la cola de plasma de los cometas se alinea con el campo magnético interplanetario (CMI) de la región. La variación de las características del viento solar como velocidad, densidad y dirección indican el comportamiento del campo magnético interplanetario, que es el campo magnético producido por el Sol y, al igual que la expulsión de partículas ionizadas, sale desde el Sol en dirección radial y que se extiende en el medio interplanetario. Sin embargo, como resultado de la rotación del Sol el campo magnético interplanetario tiene un comportamiento en forma de espiral conocido como la espiral de Parker (Figura 1.4), de igual forma, el viento solar viaja de esta forma ya que el plasma se encuentra a las líneas de campo magnético. Las partículas energéticas aceleradas en el Sol siguen las líneas orbitando alrededor de ellas. Cerca de la órbita de la Tierra la espiral de Parker forma un ángulo cercano a 45° respecto a la línea de observación del Sol.

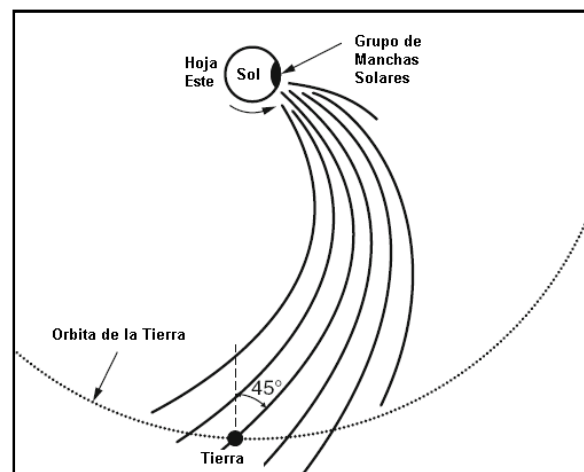


Figura 1.5 Espiral de Parker del campo magnético. (Tomada de Beer et al., 2012).

El viento solar y el campo magnético se expanden hasta el punto en que su presión es igual a la correspondiente a los campos del medio interestelar y el viento estelar circundante. A esta zona fronteriza se le conoce como la heliopausa y es donde el plasma solar se mueve lentamente.

1.2.3.4. HELIOSFERA

La región del espacio donde el plasma y el campo magnético proveniente del sol dominan se conoce como heliosfera. La forma y el límite de esta región no están bien definidos pero se estima que llega más allá de 100 UA.

La heliosfera suele dividirse en dos regiones. La heliosfera interna que se extiende desde el Sol hasta ~1.5 UA incluyendo la órbita de Marte. La heliosfera externa inicia a partir de esta distancia, abarca Júpiter y termina donde se estima que el flujo del viento solar pasa de supersónico a subsónico o decae a cero por acción de presión interestelar debida a gases y a campos magnéticos locales. Las diferencias entre las dos regiones son principalmente los procesos de propagación. En la heliosfera externa, el proceso de propagación del viento solar es difusión mientras en la heliosfera interna está regido (congelado) por el campo magnético interplanetario controlado por la actividad solar.

El viento solar y el campo magnético reducen la intensidad de los rayos cósmicos en la heliosfera. Este fenómeno se conoce como modulación. Cuando una partícula entra a la heliosfera y comienza a viajar hacia el sol, el campo magnético se hace más fuerte por lo que la partícula comenzará a viajar con una trayectoria en espiral. Las turbulencias y las ondas de choque en el viento solar causadas por la EMC resultan en distorsiones del campo magnético lo que causará un desvío aleatorio de la trayectoria de los rayos cósmicos. El número de irregularidades en el campo magnético interplanetario aumenta rápidamente durante el máximo de manchas solares y la intensidad de los rayos cósmicos disminuye en la Tierra. Cuando la actividad solar disminuye después del máximo de actividad solar, la intensidad de los rayos cósmicos aumenta a un valor máximo durante el mínimo de manchas solares.

1.3. RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos son partículas ionizadas (mayoritariamente protones) de origen galáctico (y presumiblemente extragaláctico) y que bombardean la atmósfera terrestre provocando diversos efectos dentro de ella, dichos efectos también repercuten en el hombre y en la tecnología. Por esta razón, históricamente el estudio de los rayos cósmicos ha ganado importancia y más recientemente, con el inicio de la era espacial y constante refinamiento de la instrumentación, las posibilidades de continuar con la investigación sobre los rayos cósmicos han aumentado. Los rayos cósmicos fueron descubiertos en 1912 por Víctor Hess mediante un vuelo en globo a más de 5,000 [m] de altura cerca de Berlín, donde notó un incremento en el nivel de ionización en la atmósfera a la que él llamó radiación de ultra-alta energía y señaló que tenía origen aparente en el cosmos (Beer et al., 2012).

El registro de los rayos cósmicos inició desde los años 20's, pero debido a la falta de certeza en la instrumentación y a los efectos atmosféricos, la validez de las primeras mediciones está en duda (Miroshnichenko, 2001), fue hasta 1936 cuando comenzó el registro continuo con instrumentos en la superficie de la Tierra. Durante más de setenta y cinco años de mediciones se ha observado que los niveles de radiación de los rayos cósmicos de ~ 3 [GeV] cambia en más de 20% en escalas de tiempo de aproximadamente 10 años. Los principales instrumentos que han registrado las variaciones de los rayos cósmicos son las cámaras de ionización, los monitores de neutrones y de muones (mesones- μ), así como los detectores de rayos cósmicos de baja energía que se encuentran en los satélites desde 1968. Con el uso de estos instrumentos se ha determinado que la intensidad de los rayos cósmicos no es constante y está bajo el control de la actividad solar. Los monitores de neutrones miden la componente de neutrones que se encuentra en la radiación de cósmica. El primer monitor de neutrones que operó continuamente fue instalado en Climax, Colorado, EUA, en 1951 y tiene un registro continuo hasta 2006.

El 28 de febrero de 1942, un incremento anómalo en la señal de rayos cósmicos fue observado en el monitor de mesones- μ . Este fue el primer registro de partículas solares de muy alta energía capaces de llegar a nivel de la tierra, producidos por una fulguración solar y que corresponde a partículas con energía > 500 MeV. Posteriormente, el 7 de marzo de ese año, nuevamente la misma región activa del sol emitió rayos cósmicos solares, el 25 de julio de 1946 y el 19 de noviembre de 1949 se observaron también eventos de partículas solares. Con estos eventos empezó una etapa importante en la investigación sobre los rayos cósmicos solares que incluían sus procesos de aceleración y su flujo en espacio interplanetario.

Más del 80% de las partículas contenidas en los rayos cósmicos son protones, cerca de 12% son partículas alfa (núcleos de Helio) y el resto incluye electrones, rayos gamma y neutrinos (Sakurai, 1974). Las partículas eléctricamente cargadas interactúan con los campos magnéticos interplanetarios y con el campo magnético terrestre, gracias a los rayos cósmicos solares se pueden investigar procesos como la aceleración de partículas en la atmósfera solar y su propagación en el medio interplanetario, además, determinar la composición química de esta radiación que es relevante para entender su origen, así como la estructura y evolución de la atmósfera solar y del campo magnético interplanetario.

Los rayos cósmicos tienen tres componentes se diferencian principalmente por su origen y evolución en el espacio interestelar (Sakurai, 1974):

- Rayos Cósmicos Galácticos (RCG)
- Rayos Cósmicos Solares (RCS)
- Rayos Cósmicos Anómalos (RCA)

Los rayos cósmicos que llegan a la atmósfera terrestre con energías superiores a 3 [GeV] vienen principalmente del nuestra galaxia. A energías menores son producidos ocasionalmente en llamaradas solares y el flujo de baja energía (menor a 50 [MeV]) o RCA son acelerados en la heliosfera.

1.3.1. RAYOS CÓSMICOS GALÁCTICOS

La principal teoría sobre el origen de los RCG explica que son partículas aceleradas en atmósferas de diversos objetos estelares que poseen intensos campos magnéticos, o incluso por los campos magnéticos interestelares y sobre todo en ondas explosivas de supernovas. Las ondas de gas ionizado producidas en la explosión de una supernova pueden viajar por más de 10^3 años bajo la influencia de campos magnéticos de origen estelar, estas ondas de plasma pueden acelerar iones y electrones. Cuando las partículas adquieren suficiente energía, que depende de la fuerza del campo magnético de la región, pueden escapar y convertirse en rayos cósmicos (Sakurai, 1974) con energías superiores a 1 [Gev]. Un problema de esta explicación es que se han observado RCG con energías más altas que la producida en la explosión de una supernova. Algunas teorías atribuyen el origen de las partículas de energía mayor a 10^{18} eV a fuentes extragalácticas probablemente en núcleos de galaxias muy activas, en incluso, por su contenido de partículas exóticas y su distribución isotrópica, algunas teorías suponen que son partículas que provienen desde la gran explosión en el comienzo del universo.

Los RCG tienen origen fuera del sistema solar y pueden clasificarse en dos grupos: Las partículas aceleradas en fuentes astrofísicas, como supernovas, quásares, pulsares etc., y las que son sintetizadas por estrellas constituyen el grupo primario e incluye protones, electrones y átomos de Helio, Carbono, Oxígeno y otros elementos pesados como Hierro (proceso que se denomina nucleosíntesis). Las partículas producidas a partir de las primarias por interacción con el gas espacial (atmosferas de los objetos fuentes) conforman el grupo secundario e incluye elementos como Litio, Berilio, Boro, etc.

La trayectoria de las partículas que viajan por el espacio se modifica al interactuar con los campos magnéticos interestelares, y el viento solar dentro de la heliosfera; al acercarse a la Tierra, el campo geomagnético también altera su dirección, por esta razón es difícil investigar su origen preciso en la galaxia. Los RCG bombardean la magnetósfera terrestre isotrópicamente a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y poseen energías cercanas a 10^{21} [eV], viajan millones de años antes de chocar con la Tierra. Las partículas < 433 MeV no entran a la atmósfera terrestre por acción del campo geomagnético, sin embargo, en las regiones polares magnéticas donde el campo es prácticamente nulo pueden entrar más fácilmente que en el ecuador.

Cómo ya hemos mencionado, los ciclos de actividad solar modulan la actividad de los rayos cósmicos, el viento solar y las líneas de campo magnético que transportan modifican el flujo de los rayos cósmicos. Se ha observado que durante el mínimo de actividad solar, los rayos cósmicos tienen un máximo y en los máximos de actividad solar ocurre un mínimo del flujo de rayos cósmicos (Figura 1.6). En 1991 ocurrió un mínimo histórico desde que inició el registro de los rayos cósmicos y coincidió con el máximo del ciclo 22 de actividad solar.

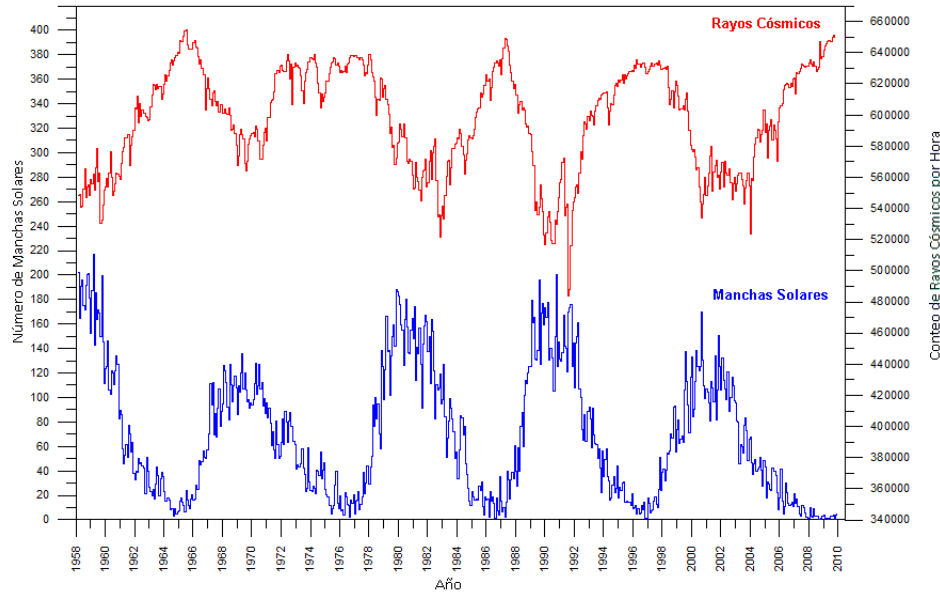


Figura 1.6 Correlación entre el número de manchas solares (NOAA National Geophysical Data Center) y la intensidad de rayos cósmicos (Monitor de Neutrones Kiel, Alemania). (Tomada de Humlum, O. 2013. <http://www.climate4you.com/Sun.htm> update October 2013).

1.3.2. RAYOS CÓSMICOS SOLARES

Una porción mínima y esporádica de los rayos cósmicos son partículas provenientes del sol, estas partículas componen los rayos cósmicos solares (RCS), y son generadas frecuentemente (aunque no sistemáticamente) durante los máximos de actividad solar en procesos como fulguraciones solares o eyecciones de masa en la corona (EMC) que se asocian a las fulguraciones. La composición química de los RCS varía de una fulguración a otra y en general tienen baja energía comparada con la de los rayos cósmicos. Debido a su origen, los RCS incluyen protones, electrones y otros iones pesados. La radiación que emiten incluye el espectro visible, ondas de radio, óptico, infrarrojo, ultra violeta, rayos-x y rayos gama de alta energía. Durante una fulguración, se aceleran partículas dentro de regímenes no relativistas y relativistas, su proporción varía de una fulguración a otra. Las partículas relativistas viajan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz y tardan entre 8 y 15 minutos en llegar a la Tierra, el resto tarda entre 80 y 90 minutos en llegar al tope de la magnetosfera; esto se debe a su interacción con el CMI que desvía su trayectoria de una línea recta.

Los eventos de partículas solares (ESP por sus siglas en inglés) se definen como la ocurrencia de eventos de partículas, generalmente protones, en el espacio interplanetario y en la Tierra. El flujo es el número de protones con energía mayor a un límite definido (e.g. 10 [MeV]) detectados en un sensor y puede expresarse en [pfu] (unidad de flujo de protones por sus siglas en inglés). En algunos catálogos, por comodidad, los ESP han sido definidos como incrementos en el flujo de partículas con energía superior a 10 [MeV] o intensidades, I_p , superiores a 1 [pfu]. La ocurrencia de

estos eventos es difícil de pronosticar y de describir. Sin embargo, el promedio de ocurrencia de los EPS con energía mayor a 433 [MeV] es de uno por año y dos en promedio con energía mayor a 100 [MeV]. Se ha determinado que el sol produce constantemente partículas con energía mayor a 1 [MeV].

La lista de EPS relativistas contiene hasta la actualidad 71 eventos (Tabla 3.1, Miroshnichenko y Pérez-Peraza, 2005) que han presentado incrementos en el flujo medido en la Tierra con energía superior a 433 [MeV] (GLEs por sus siglas en inglés). Estos eventos han sido registrados en la Red Mundial de Monitores de Neutrones desde 1942, a lo largo de los ciclos solares del 17 al 24. El 23 de febrero de 1956 ocurrió la fulguración más importante productora de partículas relativistas que se haya registrado, presentó un incremento máximo de 4554%. Durante los ciclos de actividad solar 17 a 19 ocurrieron los eventos más importantes por su contenido energético, en los ciclos 20 y 21, no ocurrieron eventos de mayor interés (Miroshnichenko, 2003). Durante el ciclo 22 de actividad solar, el 29 de septiembre de 1989, ocurrió el que hasta ahora es el segundo EPS más importante y presentó incrementos de 372%. Durante este evento se observaron efectos importantes, por ejemplo, se reportó la degradación en un 5% de los paneles solares del satélite Magallanes, además de pérdida de comunicación e interferencia entre naves espaciales y satélites (Panel de HF y Clima Espacial, Protección Civil España; <http://www.ipellejero.es/hf/>).

Uno de los principales problemas para determinar un evento de partículas relativistas solares es que no hay común acuerdo para definirlos. La NOAA los define como el incremento arriba de 10 [pfu] de tres puntos consecutivos en la señal de rayos cósmicos con promedios cada 5 minutos en un detector con sensibilidad de 10 [MeV]. Otro problema es la instrumentación, pues existen diferentes sensores que están colocados en diferentes altitudes y en diferentes latitudes, lo que define diferentes límites de rigidez para cada estación (ver Sección 1.4) y el proceso de normalización de los datos se torna bastante complejo. Además el registro de un evento en una estación específica depende de la anisotropía del evento, ya que las grandes intensidades se limitan a un cono estrecho en dirección al espacio, y con ello, de la posición de la estación al momento que las partículas llegan e interactúan con el campo geomagnético considerando que contienen energía suficiente para ser detectadas. Bajo estas circunstancias, el valor de 10 [MeV] o 1 [pfu] es aceptado por la red de monitores. Los estudios a partir de los RC, así como de la fuente que los produce o su alteración en el medio interplanetario se realizan, en general, calculando su espectro de energía o se hace por medio de su perfil temporal.

1.3.3. RAYOS CÓSMICOS ANÓMALOS

Cuando el gas eléctricamente neutro se aproxima al Sol e interactúa con las partículas del viento solar, se ioniza y comienzan a interactuar con el campo magnético ganando energía hasta que son arrojados a la heliósfera interna. Estas partículas forman los rayos cósmicos anómalos (RCA) y tienen origen en el medio interplanetario. Los RCA no se asocian a fenómenos violentos como son los EPS, ya que viajan a bajas velocidades y con baja energía, menor a 50 [MeV]. Debido a su origen, los RCA presentan composición química diferente a la de los RCG o RCS, esta es la manera

en que se identifican. Los elementos que los conforman son principalmente He, C, O, N y otros átomos con alta capacidad de ionización como S y Si. De la misma forma, al interactuar los gases con los planetas, meteoritos y otros cuerpos pueden producir otros elementos.

1.4. EFECTOS Y PELIGRO DE LOS RAYOS CÓSMICOS

La investigación sobre rayos cósmicos ha tomado tres líneas diferentes, todas ellas en cierta forma enfocadas a la predicción de los fenómenos energéticos: La heliofísica estudia fenómenos solares energéticos como las fulguraciones y las EMC así como sus procesos relacionados. La física interplanetaria estudia los procesos de propagación de las partículas en el medio interplanetario incluyendo en comportamiento del campo magnético. Finalmente, la geofísica se encarga de los procesos de interacción de los rayos cósmicos con la magnetósfera y la atmósfera terrestre y los procesos asociados (Miroshnichenko, 2003). Los datos que se usan en las investigaciones son obtenidos de distintas técnicas dependiendo del fenómeno observado; EMC, hoyos coronales, neutrones energéticos, rayos gama, etc. En cierta forma, la investigación sobre rayos cósmicos tiene también una componente importante sobre el riesgo y los efectos que producen.

Los efectos de los rayos cósmicos en la Tierra y el medio interplanetario han sido estudiados desde los inicios de la era espacial. De hecho, en los primeros vuelos espaciales se detectaron cinturones de radiación en la magnetósfera. Dichos cinturones son dos regiones extrañas en el campo geomagnético que tienen un inusual incremento en el número de partículas ionizadas y se encuentran entre zonas con bajo número de partículas de este tipo. La primera de ellas se encuentra a 2.5 radios terrestres y se caracteriza por contener protones con energía incluso superior a 600 [MeV], la segunda se encuentra a aproximadamente 10 radios terrestres y su composición es más variada.

El campo magnético de la Tierra actúa como un escudo protector contra la radiación espacial. En términos físicos, el nivel de protección se define por el límite de rigidez geomagnético, que indica el umbral de energía de las partículas que pueden atravesarlo. La rigidez caracteriza el movimiento de una partícula en un campo magnético B , en este sentido indica el efecto de protección del campo geomagnético, la rigidez magnética es el momento de la partícula por unidad de carga:

$$R = \frac{cp}{Ze} \quad (1.1)$$

donde R es la rigidez, p es el momento de la partícula, c la velocidad de la luz, Z la carga atómica, e la carga del electrón. Definiendo la girofrecuencia, ω (o frecuencia de Larmor) y el radio ρ :

$$\omega = \frac{ZeB}{mc}; \quad \rho = \frac{v}{\omega}; \quad R = \rho B \quad (1.2)$$

En donde m y v son la masa y la velocidad de la partícula respectivamente. Este límite no tiene una altura o un valor específico, es variable y difícil de estimar debido a los cambios temporales del campo magnético terrestre. Sin embargo, se ha estimado la rigidez del campo geomagnético de aproximadamente 16 [GV] en el ecuador decreciendo hasta casi 0 [GV] en los polos terrestres.

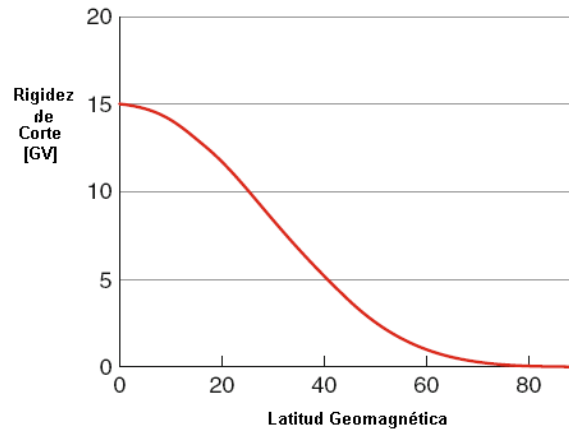


Figura 1.7 Rigidez vertical de corte para la componente dipolar del campo geomagnético. La máxima rigidez se observa a latitud 0. (Tomada de Beer et al., 2012).

El campo geomagnético es aproximadamente 10^4 veces más fuerte que el campo magnético interplanetario y puede desviar rayos cósmicos con energías menores a 20 MeV, a este fenómeno se le conoce como modulación geomagnética.

El estudio de la radiación producida por los rayos cósmicos tiene particular importancia en la geofísica por los efectos que pueden provocar. La influencia de los ciclos de actividad solar en la atmósfera baja no se ha descrito con exactitud. Sin embargo, las partículas de origen solar tienen importancia para explicar la variabilidad de algunos fenómenos atmosféricos, ya que partículas como los electrones relativistas pueden alcanzar niveles profundos en la atmósfera. Se sabe que la atmósfera y el campo geomagnético remueven las partículas que llegan a la Tierra dejando bajos niveles de radiación en las capas inferiores.

Por la interacción de los rayos cósmicos en procesos como la ionización, la atmósfera sufre principalmente de cambios en su conductividad asociado con las partículas ionizadas que la alcanzan, esto procesos generan también cambios en la composición química y dinámica de la estratósfera y la tropósfera, por ejemplo, la abundancia del ozono en la estratósfera puede disminuir en un 10% debido a reacciones químicas que lo involucran, entre ellas se incluyen también a los elementos más abundantes como el nitrógeno y el carbono, por lo que es común observar un incremento en la producción de óxidos de nitrógeno (NO_x) o del isotopo cosmogénico ^{14}C durante un evento de partículas energéticas. Debido a que las partículas con bajos niveles de

energía son más abundantes y tienen un efecto importante en las regiones polares, los gases que resultan de la interacción entre la atmósfera con los rayos cósmicos se depositan en el hielo polar o forman parte de los anillos de crecimiento de los troncos de los árboles creando un registro histórico de la actividad solar que es útil para estudios geofísicos (Zolotova, 2007 y Beer, 2012). En la ionósfera, es común observar ionización adicional a causa de los protones solares, se asume que la ionósfera tiene un potencial uniforme con respecto a la superficie de la Tierra y protege a capas inferiores de pequeñas variaciones de radiación, cuando el viento solar genera perturbaciones intensas, las condiciones de la ionósfera se ven modificadas por varios días y la intensidad del campo eléctrico varía con ellas, una consecuencia de estas variaciones es la electrificación de aerosoles.

A nivel espacial, los rayos cósmicos tienen efectos importantes como la pérdida de algunos satélites y daños en los sistemas de control y posicionamiento, daño permanente en los paneles solares e intenso ruido en los datos de imágenes. Cuando un evento de partículas energéticas ocurre, hay un incremento de la radiación en la atmósfera terrestre, teniendo como efecto el calentamiento y expansión de esta. Los satélites en órbita baja quedan cubiertos dentro de la atmósfera aumentando la fricción con las partículas de los gases atmosféricos y alterando sus órbitas, esto puede provocar su caída. Además, los satélites y naves espaciales que se encuentran en órbitas altas están protegidos por la magnetósfera en condiciones normales pero durante eventos de gran energía la magnetósfera se comprime dejándolos desprotegidos por lo que la radiación solar los afecta directamente produciendo anomalías en los sistemas electrónicos y de comunicación causado por la corrosión de partículas energéticas.

Los efectos de la radiación han sido discutidos también a nivel biológico (Miroshnichenko, 2003), principalmente por las consecuencias que tiene en los astronautas, pues durante la exposición a la radiación en algunas misiones han dicho ver luces semejantes a chispas o luces similares al flash de las cámaras fotográficas, lo cual se traduce en anomalías en el cerebro y la retina por la exposición a altos niveles de radiación. En general, los efectos de la radiación cósmica no son bien conocidos. Las tripulaciones de aviones comerciales que sobrevuelan regiones polares, las personas que viven en latitudes elevadas y en lugares altos son las que reciben mayor radiación, por ejemplo, en vuelos de gran altura, que permanecen más de 70 horas por mes en el aire reciben 2 [mSv] de radiación, que es el límite máximo recomendado para una mujer embarazada, la radiación que reciben equivale a aproximadamente 10 radiografías en el torso (NOAA, <http://www.swpc.noaa.gov/>).

Los efectos de los EPS con alta energía en latitudes altas son principalmente daños a sistemas electrónicos. Con el avance en la tecnología y el uso de materiales conductores, corrientes eléctricas y campos electromagnéticos, los efectos del Sol se han convertido en un problema visible, por ejemplo, la inducción de voltaje en las líneas telefónicas y en los cables de conducción eléctrica puede conducir a pérdidas temporales de las líneas de teléfono o apagones, incluso las tuberías de gas o aceite pueden sufrir de corrosión durante las tormentas magnéticas debido a la buena conductividad de ellas por inducirse una diferencia de potencial. En las regiones polares es

común que no se puedan establecer comunicaciones de alta frecuencia y que haya errores en los sistemas de posicionamiento que hagan extremadamente difícil la navegación.

En general, una vez cada ciclo de actividad solar (AS) ocurre un evento cuyo perfil temporal es más largo de lo común y son conocidos como eventos extremadamente largos. Una de sus características es que el flujo de partículas que se presenta en estos eventos es comparable con el flujo de partículas en el resto de los eventos del grupo y son resultado de la combinación de mecanismos en el Sol y el espacio interplanetario. El nivel de radiación que producen es alto y por ello también son considerados como riesgosos.

1.5. OCURRENCIA DE LOS EPS RELATIVISTAS

Las fulguraciones solares afectan de forma importante la magnetósfera terrestre. Después de la ocurrencia de una fulguración solar, en un periodo de uno o dos días, es común que inicien las tormentas geomagnéticas acompañadas de partículas ionizadas en las regiones polares (auroras) y una disminución de los rayos cósmicos galácticos. La ocurrencia de las fulguraciones solares está estrechamente relacionada con el número de manchas solares, en consecuencia las fulguraciones siguen el comportamiento del ciclo de once años de actividad solar, de igual forma la disminución de los rayos cósmicos (disminución de Forbush) se entiende considerando el comportamiento del viento solar en el ciclo de once años.

Una componente importante en el estudio de los rayos cósmicos y su distribución temporal surgió a partir de las observaciones continuas de la variación de la intensidad de los rayos cósmicos en periodos mayores a 11 años (Miroshnichenko et al. 2008). Con ello, los periodos de ocurrencia de los eventos de partículas relativistas solares observados en la superficie de la Tierra (GLE por sus siglas en inglés) se han estudiado con la finalidad de predecir futuros eventos con anticipación suficiente para emitir alertas sobre su ocurrencia.

Los GLE tienen comportamiento casi-regular y han ocurrido en promedio 1 por año. Sin embargo, entre julio de 1989 y junio de 1991, este promedio fue rebasado ya que fueron registrados 13 eventos en un periodo menor a dos años durante la fase ascendente del ciclo de 11 años de actividad solar, en tanto que en el período 2006-2012 no hubo ningún GLE. Este hecho se opone a un comportamiento completamente aleatorio en la ocurrencia de los eventos, por lo que su ocurrencia individual podría depender a fluctuaciones en otras características del Sol aun no descubiertas (Pérez-Peraza, 2011).

Mediante comparaciones entre la serie temporal del número de manchas solares y la serie de GLE registrados, se ha observado que los eventos de partículas relativistas ocurren principalmente durante el incremento y el descenso del número de manchas solares, además se observa que los GLE no ocurren con frecuencia durante el mínimo de manchas solares, es decir, en el mínimo de actividad solar (Sakurai, 1974). En general, los RC tienen un valle durante el máximo de AS, este es un comportamiento característico en el ciclo de 11 años (Figura 1.6). Otra propiedad importante

es que ningún GLE se ha observado durante el pico máximo de manchas solares; durante la inversión del campo magnético solar no se han observado eventos con flujo promedio superior a 10 [MeV], aunque sí ocurren eventos de partículas de menor intensidad relacionados con disturbios en el campo magnético interplanetario, esto indica que no ocurren GLE asociados a fulguraciones intensas durante la inversión del campo magnético solar, este fenómeno se conoce como el Intervalo de Gnevyshev por el primer científico que lo estudió.

En términos de flujo, la ocurrencia de los eventos de partículas solares (EPS) relativistas tampoco se correlaciona de manera aparente con los parámetros de actividad solar. Mediante el análisis espectral del pico máximo de flujo de los EPS y el espectro de potencia del flujo, se han encontrado variaciones cuasi-periódicas. Las periodicidades más importantes son los de 5, 8 y 14 meses, 2, 3 y 11 años (Figura 1.8) que además tienen correlación en frecuencia y fase con la actividad solar (Pérez-Peraza et al., 2011).

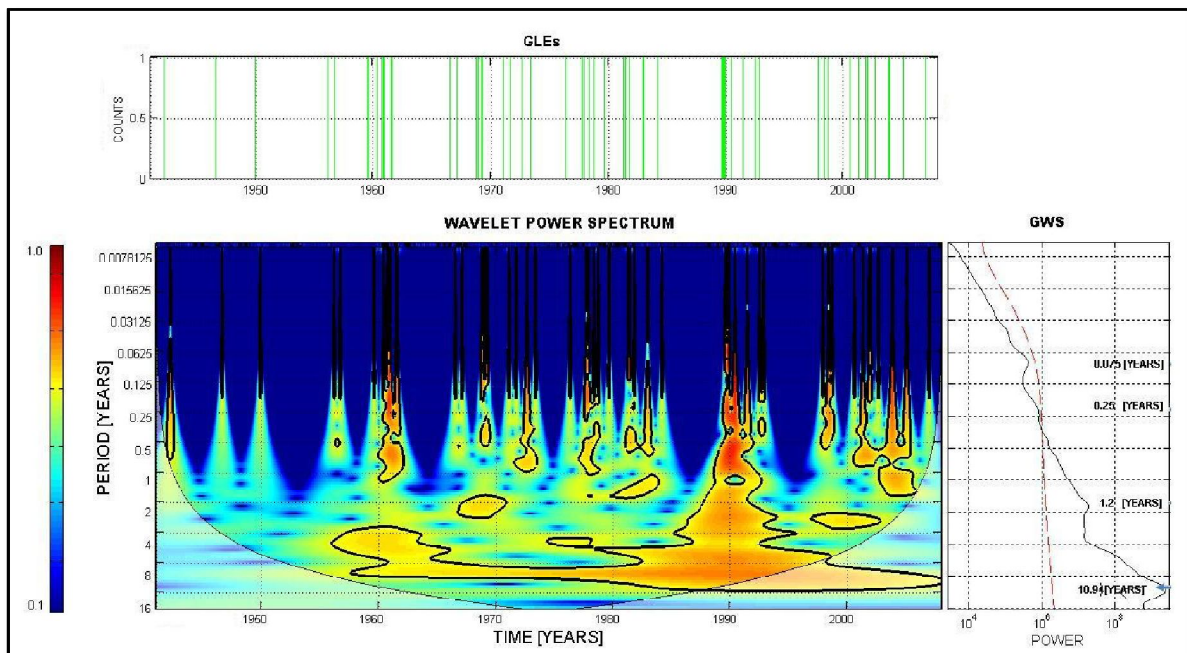


Figura 1.8 Espectro de potencia de la ocurrencia de GLE desde 1942. En el panel de la derecha se observa la periodicidad de 11 años como el pico de mayor energía (Tomada de Pérez-Peraza, 2011).

Diversos estudios de señales asociadas a la actividad solar han encontrado cuasi-periodicidades dominantes de término medio (meses a años) que están en fase con el ciclo de 11 años de actividad solar. Las observaciones del campo magnético solar y el viento solar en observatorios espaciales han mostrado que estas periodicidades aparecen también durante en el flujo abierto del campo magnético solar a distintas latitudes. La periodicidad de 1.6 años es la que aparece en distintas series analizadas con una fuerte tendencia a aparecer durante la fase descendente de la

actividad solar. Esta periodicidad parece ser fundamental en el comportamiento del Sol de manera similar a la periodicidad de 11 años. La periodicidad de un año aparece principalmente en los flujos de campo magnético de altas latitudes y es poco significativa en bajas, en cambio la periodicidad de 1.3 años es significativa en la serie de rayos cósmicos.

Recientes investigaciones en la estructura fina de los rayos cósmicos galácticos han determinado periodicidades de término corto (días a meses), intrínsecas a la ocurrencia de EPS. Periodos de 2.5, 5-8, 11, 27 y 60 días aparecen también en la actividad solar (Zapotitla, 2011). Sin embargo, la periodicidad de 27 días se asocia al paso de una región particular del sol a través del disco solar. Periodicidades de término medio adicionales a las antes mencionadas también aparecen en la serie de RCG y que describen el comportamiento de la actividad solar, éstas incluyen periodos de 0.3, 0.5, 0.7, 3.5 y 7 años. Previos a un evento de partículas solares con incrementos a nivel de suelo, (GLE, Ground Level Enhancements) registrado en la serie de rayos cósmicos, muestran que existen periodicidades de término ultra-corto (minutos a horas) que permiten clasificar los eventos de acuerdo a su incremento en intensidad. La aparición de estas periodicidades se opone a una completa aleatoriedad en la ocurrencia de los EPS con energía relativista.

La comparación entre la serie del número de manchas solares y la intensidad de los rayos cósmicos muestra que la intensidad de los rayos cósmicos es mayor durante el mínimo solar y decrece a un mínimo valor antes de un máximo de manchas, este fenómeno es la modulación del periodo de 11 años de actividad solar que como consecuencia cambia la intensidad del campo magnético interplanetario y el grado de turbulencia del viento solar. El ciclo de 22 años también se observa en la serie de rayos cósmicos en la forma del pico coincidente con el mínimo solar. Por ejemplo, en el pico es más agudo que en los máximos. Esta característica es una consecuencia de la inversión del campo magnético del Sol cerca del máximo de manchas solares cada once años por lo que tiene un ciclo de 22 años.

La certeza en la predicción de los EPS no ha mejorado con los avances en la física. Los modelos de predicción estadísticos, como el de Bengin (1985) o Smart y Shea (1979), se basan principalmente en la distribución temporal del flujo de partículas durante un evento. Bengin et al. (1985) presentó un método probabilista para predecir el flujo de partículas observado en la Tierra con base en la combinación de la teoría y de múltiples observaciones de las características de las fulguraciones productoras de partículas energéticas. Con esas observaciones se intentó estimar la cantidad de partículas que escaparan del Sol, se propagaran en el medio interplanetario y predecir el flujo de partículas observado. Sin embargo, la observación de las características de la fulguración es en tiempo real, y no permite pronosticar con demasiada anticipación. Además, no predicen GLE particularmente, predicen el flujo de partículas y los rangos de energía que tendrán y que serán observados en la Tierra después de una fulguración, con ello calculan si es un evento GLE o sólo un EPS con menor energía.

Otros métodos también han intentado correlacionar el flujo de partículas con las características de las fulguraciones productoras con la finalidad de obtener mayor información sobre los procesos de formación. Otros tipos de alerta ante un EPS consisten en la observación e identificación de las

fulguraciones solares o de la perturbación de parámetros en el Sol en tiempo real, que indiquen la ocurrencia próxima de un evento, o con sus características estimar los flujos de partículas ionizadas (Huston, 1990). Estos sistemas utilizan información precursora como la intensidad de la fulguración así como la duración del subsecuente evento de partículas en diferentes posiciones del sistema solar y con ello se puede estimar el flujo de partículas resultante en la Tierra (Feynman, 1997), (Turner, 1998).

La fuerza aérea de Estados Unidos implemento un sistema de alerta, llamado PROTONS (Smart and Shea, 1979), (Miroshnichenko et al., 1986), (Heckman, 1992). PROTONS es un modelo empírico que permite construir perfiles de intensidad-tiempo para diferentes rangos de energía de protones y trabaja en dos secciones operacionales. La primera sección estima el número de partículas que son producidas en una fulguración. Para esto utiliza las variaciones de la relación correlativa entre los rayos X suaves (1-8 Å) y el flujo de protones observado en la Tierra. La segunda sección de PROTONS es una aproximación de la propagación de las partículas energéticas desde la fuente, a través de la corona y en el medio interplanetario hasta la Tierra. Para estimar la propagación PROTONS se basa en el modelo anisótropo de difusión. Este modelo permite estimar el perfil temporal de un EPS observado en la Tierra y la intensidad máxima del flujo de partículas considerando la posición de la fulguración y las condiciones del medio interplanetario. Sin embargo, estos sistemas tampoco son específicos para GLE, son para EPS y buscan predecir el flujo de partículas con observaciones en tiempo real, no fechas específicas de ocurrencia de los eventos.

Para la predicción de los eventos de partículas se han propuesto incluso modelos probabilísticos en los que definen la probabilidad de excedencia de flujo de protones sobre cierto nivel de energía durante determinado periodo de tiempo. Para el cálculo de la probabilidad se consideran como parámetros el número de eventos observados en un periodo de tiempo. Es decir, se supone que la ocurrencia de partículas relativistas es un proceso de Poisson. Este modelo fue propuesto por King en 1974 y no fue muy bien aceptado ya que consideraba un número pequeño de eventos que estadísticamente limita su certeza.

Las partículas energéticas solares claramente están ligadas con procesos de aceleración en el sol o en regiones cercanas a él. Independientemente de cuál sea proceso que las origine, se ha observado correlación entre los fenómenos solares como las fulguraciones y las eyecciones de masa en la corona con la producción de estas partículas. Por ello, los sistemas de alerta, en general necesitan información de los fenómenos solares para la predicción de los EPS. Sin embargo, los modelos de predicción propuestos no cumplen con los requerimientos de certeza, por ejemplo en el flujo esperado o la distribución temporal de las partículas (Bengin, 1985., Heckman, 1992). Además, los modelos más precisos como PROTONS, sólo brindan información en tiempo real, obtenido de observaciones en tiempo real, por ejemplo de las características de las EMC, que no siempre están disponibles y permiten predicciones a lo más con horas de anticipación.

Dorman et al. (2003,2006) presentó un método de pronóstico y alerta de flujo de partículas energéticas producidas en una fulguración. Propone que utilizando los monitores de neutrones y

telescopios de muones en la tierra es posible monitorear y pronosticar FEP (Partículas Energéticas de una Fulguración por sus siglas en inglés). Su método de pronóstico utiliza partículas de alta energía (desde algunos GeV/núcleo). Las partículas con más alta energía llegan desde el sol más rápido que las partículas con menos energía y que causan daños más severos en el espacio y en la atmósfera. El flujo de las partículas con mayor energía es muy pequeño y por ello causan mínimos daños a las personas y a los dispositivos electrónicos, sin embargo, por el flujo tan pequeño su medición en satélites es muy complicada y que no se tiene la suficiente precisión, en cambio las estaciones de monitor de neutrones, cámaras de ionización y telescopios de muones en tierra son mucho más grandes y la medición es más precisa.

En términos generales, el pronóstico de GLE se basa en observaciones en tiempo real del flujo de partículas en una estación. Se calcula el promedio y la desviación estándar de las mediciones en periodos de 120 a 60 minutos previos y con ellos se calcula un umbral de alerta mediante la ecuación

$$I = M + n\sigma \quad (1.3)$$

Donde M es el promedio de las mediciones en los minutos previos, σ es la desviación estándar y n es un factor estadístico que depende de la estación. Cuando una medición excede el valor de I se activa una prealerta y si cinco mediciones continuas lo exceden la estación entra en modo de alerta.

El método propuesto por Dorman (2003) ha sido adaptado por el NMDB (Base de Datos de Monitores de Neutrones por sus siglas en inglés) y está en funcionamiento actualmente. Mavromichalaki et al. (2006 y 2009) describe el desarrollo e implementación del sistema que busca aumentos en la intensidad registrados en los monitores de neutrones en tiempo real y activa una alarma si se detecta un GLE con base de un enfoque descrito en Dorman et al. (2003). La finalidad de su estudio es la predicción en tiempo real de GLE, para ello utiliza los datos en tiempo real de los monitores de neutrones miembros del proyecto NMDB. La estación de rayos cósmicos de Atenas tiene un sistema de recopilación de datos y adquisición en tiempo real que se creó en colaboración con el grupo de los rayos cósmicos de IZMIRAN. Este sistema recibe datos en tiempo real de cerca de 15 estaciones de rayos cósmicos a través de internet. Las mediciones de todas las estaciones se procesan de forma automática de manera que sea útil para los fines de predicción.

Para su estudio, Mavromichalaki et al. (2009) utiliza como ejemplo el evento del 13 de diciembre de 2006 con datos del Athens Neutron Monitor Data Precessing (ANMODAP), y presenta la evaluación del sistema con nueve eventos previos (GLE60 a GLE69) registrados entre 2001 y 2006 utilizando datos de las estaciones Cape Schmidt, Fort Smith, Inuvik, Kiel, Lomnicky Stit, McMurdo, Moscow, Norilsk, Newark, Oulu, Thule, Nain y Inuvik. El sistema produjo alarmas para ocho de los nueve eventos. El evento GLE68 del 17 de enero de 2005 no se consideró para el análisis ya que sólo se observó un incremento de 2% en South Pole por lo que se clasificó como No-GLE.

Otro método de alerta fue propuesto por Chilingarian et al. (2004). Su método consiste en la medición de los tiempos de arribo y energía de los primeros iones detectados en espectrómetros satelitales para determinar una distribución espacio-temporal de los iones acelerados en una fulguración o en las ondas de choque, y con esta información extrapolar para obtener el comportamiento de las partículas relativistas con energía suficiente para penetrar la atmósfera terrestre y estimar la producción de iones secundarios por su interacción con los núcleos en la atmósfera. La medición de los primeros iones durante un GLE y estimando la correlación de las diferentes especies de rayos cósmicos secundarios, que son detectados también en los monitores de neutrones, con el flujo de partículas, permite alertar sobre el arribo de flujos mayores de partículas solares. La desventaja de esta propuesta es que los iones detectados para el sistema de alerta deben tener energías superiores a la rigidez de corte de las estaciones de MN (usualmente >50 [MeV]) y para detectar un GLE se necesitan tasas de medición de 1-5 minutos.

En sus resultados, Chilingarian et al. (2004) compara los tiempos de arribo de los iones detectados por los MN durante 4 eventos de 2001 y encuentra que estos iones llegan entre 10 y 30 minutos antes que los protones de >50 [MeV] observados en el GOES Integral Proton Flux y que son causantes de los daños más severos en los satélites, vehículos espaciales y telecomunicaciones. De forma similar a lo que se describe en el sistema de alerta del NMDB descrito en Mavromichalaki et al. (2009), la detección temprana de los GLE con sus sistemas, sirve como señales preventivas para la detección de incrementos en el flujo de partículas con menor energía producidas en el EPS y que serán observados minutos después.

La Universidad de Delaware ofrece datos en tiempo real de la intensidad de los rayos cósmicos de varios monitores de neutrones en tierra y con resolución de 1 min (Instituto de Investigación Bartol en la Universidad de Delaware, <http://neutronm.bartol.udel.edu/spaceweather>). Adicionalmente ofrece un sistema de alerta de GLE que se dispara cuando se observan incrementos mayores al 4% en por lo menos cuatro de ocho estaciones de MN (FortSmith, Inuvik, McMurdo, Nain, Newark, Peawanuck, SouthPole y Thule).

2. CICLONES TROPICALES

Los ciclones tropicales son de los fenómenos atmosféricos que más peligro representan a la población por el daño que causan al impactar en tierra. Un ciclón tropical es un sistema atmosférico cuyo viento se desplaza a velocidades superiores a 60 [Km/h] en dirección ciclónica y que acarrean cantidades enormes de humedad. En términos generales, un ciclón tropical se origina en regiones tropicales del mar y se desplaza sobre la superficie en forma de espiral rotando en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur (efecto coriolis).

El Centro Nacional de Huracanes de E.U.A. define tres categorías de ciclones de origen tropical en función de la velocidad del viento. Cuando estos fenómenos presentan velocidades del viento menores a 18 [Km/s] suelen llamarse depresiones tropicales y el término tormenta tropical se reserva para cuando la velocidad del viento alcanza entre 18 y 32 [Km/h], y si es mayor a 33 [Km/h] son ciclones tropicales, aunque se les conoce con distintos nombres según la región donde ocurren. En el océano Atlántico y el Pacífico noreste son conocidos como huracanes, en el Pacífico oeste se les llama tifones, en el Pacífico sur Willy-Willy, en Filipinas baguios y en el océano Índico como ciclones (Terry, 2007).

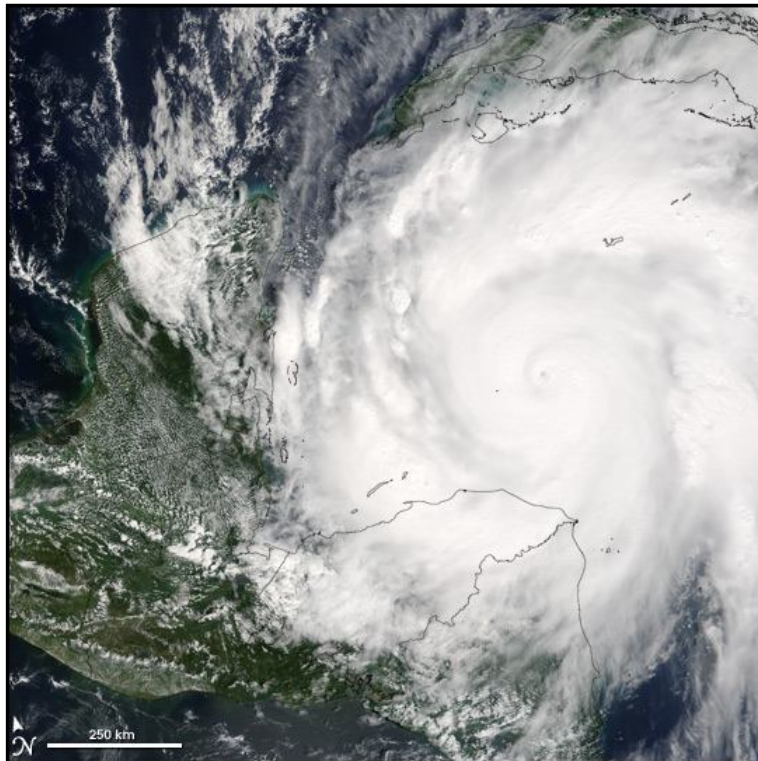


Figura 2.1 Huracan Wilma (2005) antes de impactar en la península de Yucatan (Nasa Earth Observatory, october 19, 2005).

2.1. FORMACIÓN Y DESARROLLO

Los ciclones tropicales se pueden formar en diversas regiones y en épocas diferentes del año. En los lugares donde se forman los ciclones tropicales deben existir las condiciones básicas de calor, humedad, baja cizalladura vertical del viento y baja presión. Estas condiciones limitan su existencia a latitudes entre 5° y 30° en ambos hemisferios, y a zonas y temporadas en que la temperatura del mar es superior a 26 °C.

Una tormenta necesita aire tropical para su supervivencia y bajos contrastes de temperatura. La cizalladura vertical del viento se refiere a los cambios de velocidad horizontal del viento en dos niveles de la atmosfera, la relación entre esta condición con la aparición de huracanes aun no es bien entendida, aunque se piensa que una baja cizalladura del viento permite la formación de corrientes verticales internas en una tormenta.

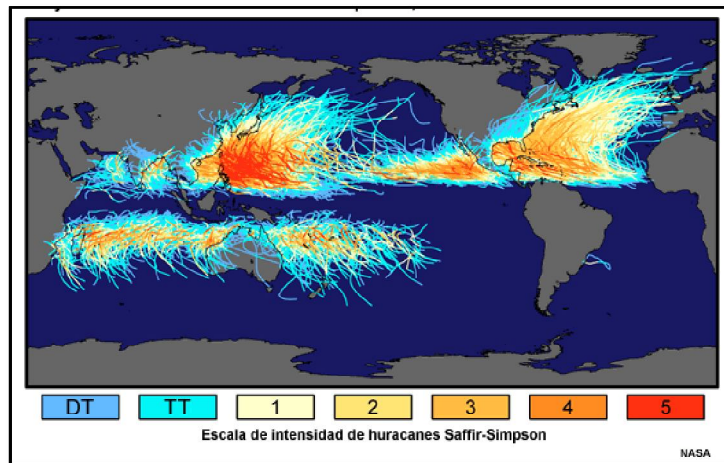


Figura 2.2 Distribución mundial de las trayectorias de ciclones tropicales observadas entre 1851-2006 acorde a la disponibilidad de datos (Tomada de Laing, 2011).

La temporada de ciclones tropicales se define por la aparición de las condiciones ciclogénicas propicias en diferentes regiones de los océanos, las zonas de inestabilidad que favorecen la convección son más comunes cuando la temperatura superficial del mar (TSM) es más caliente durante los meses de verano y otoño; oficialmente en el Atlántico y el Pacífico central es del 1 de junio al 30 de noviembre, en el Pacífico oriental del 15 de mayo al 30 de noviembre y en el Pacífico noroeste los ciclones pueden ocurrir, en general, a lo largo de todo el año.

En la zona del Pacífico y Atlántico sur, cerca de las costas occidentales de Sudamérica, no se originan ciclones tropicales. Esto ocurre porque en esta zona el agua se mantiene lo suficientemente fría todo el año como para permitir la formación de tormentas tropicales. Las corrientes oceánicas de Humboldt que se originan en el océano Antártico y se desplazan hacia el

norte por el océano Pacífico mantienen el agua de la superficie fría alterando las condiciones de ciclogénesis.

Las etapas de desarrollo de un ciclón tropical son tres: formación, madurez y decaimiento. Dependiendo de la región de formación y de su trayectoria, la duración promedio de un ciclón tropical es desde 24 horas hasta tres semanas y el tiempo promedio es de 10 días (Laing, 2011) en el Atlántico Norte.

2.1.1. ETAPA DE FORMACIÓN

En las zonas donde ocurren las características de alta temperatura que rebasen los 26 °C y exista alguna perturbación en la atmosfera baja o alta que se traduzca en baja presión, se forman celdas convectivas por la diferencia de presión entre el centro de la depresión con respecto a los alrededores donde la presión es relativamente alta. Esta diferencia de presión desplazará aire hacia el centro con alta velocidad. En el centro, la alta temperatura proveerá al viento humedad por evaporación.

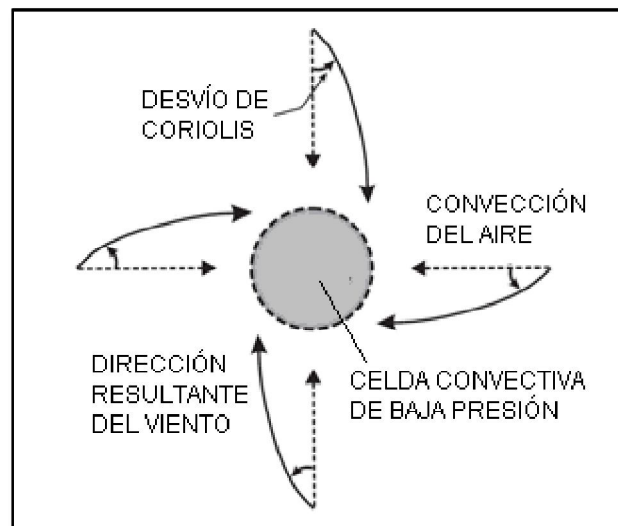


Figura 2.3 Efecto Coriolis en la dirección del movimiento del aire por convección y su patrón en espiral (Modificada de Terry, 2007).

El aire cálido saturado de vapor de agua llega a alturas de aproximadamente 15 Km, en esta zona de la atmosfera el vapor se condensa formando nubes y gotas de agua, además se desprende un gran cantidad de energía en forma de calor y la presión disminuye. Con la disminución súbita de la temperatura con la altura se facilita el proceso de convección del aire, que aunado con el efecto Coriolis, asociado con la rotación de la Tierra, causa que la trayectoria del viento se desvíe

produciendo movimiento en espiral alrededor de un vórtice en el centro de baja presión. La fuerza de Coriolis (Figura 2.3) tiene efecto a latitudes de mínimo 4 ó 5 grados.

En el Atlántico Norte la mayoría de los huracanes surge en el oeste de África en latitudes superiores a 10°N a partir de ondas tropicales de las cuales menos el 50% no llegan a la categoría de huracán. Una onda tropical es una zona de baja presión cerca de la superficie con un flujo de aire del este que se desplaza a aproximadamente 20 [km/h]. Si la onda tropical encuentra las condiciones para desarrollarse como alta temperatura superficial del mar, se intensificará a tormenta tropical y eventualmente a ciclón tropical.

2.1.2. CICLÓN TROPICAL MADURO

La principal característica de un ciclón tropical en etapa madura es el patrón en espiral de nubes relampagueantes que giran en torno del ojo, estas nubes pueden cubrir aéreas con diámetros entre 500 y 700 [Km], generan las lluvias intensas y están separadas por zonas con lluvia ligera o sin lluvia. El área que cubren las nubes no es la misma que el área donde tienen influencia los vientos más intensos, esto se debe a que el viento es producto de las diferencias de presión en el sistema atmosférico mientras que las nubes son resultado del calor y humedad provenientes del mar y se pueden extender en áreas más extensas que la región donde la diferencia de presión alcanza su mínimo.

El ojo es el centro alrededor del cual rota el ciclón tropical (Figura 2.4), esta región es tranquila y libre de nubes, tiene un diámetro de entre 20 a 50 Km y es en esta zona donde se observan las presiones más bajas. En contraste, la pared del ojo es la región con los vientos y precipitaciones más intensos. La zona donde va pasando el ojo tiene un periodo de calma generalmente menor a una hora, este tiempo depende del tamaño del ojo y de la velocidad de la tormenta, en los siguientes minutos habiendo pasado el ojo, vuelven los vientos y lluvias más fuertes asociados al rápido ascenso de la humedad en nubes cumulonimbos. Esto puede tener consecuencias catastróficas para personas que no conocen la naturaleza de los ciclones pues mientras están en el ojo piensan que la tormenta ya pasó o que ya terminó olvidándose de las precauciones y en unos cuantos minutos inicia la parte más intensa nuevamente.

En la pared del ojo es donde ascienden los vientos más fuertes acarreando calor y vapor de agua hacia la parte alta del ciclón, cuando el viento alcanza el límite de la tropopausa por la disminución de la temperatura y de la presión se libera el calor y se forman las gotas de lluvia liberando energía en forma de calor que alimenta la circulación de la tormenta. El anticiclón es considerado parte importante de la estructura de una tormenta ciclónica ya que en este proceso se libera gran cantidad de energía y también permite que continúe la circulación del viento desde la base (Figura 2.4). Las nubes tienden a desplazarse horizontalmente del centro hacia afuera formando los patrones de dispersión o estructuras divergentes que se conocen como anticiclón. En nubes que giran alrededor del ojo, los vientos pueden alcanzar velocidades desde 60 hasta 370 [Km/hr]. Las

altas velocidades son producidas por el gradiente de temperatura, que a su vez causa un gradiente de presión entre el centro caliente del ciclón y las áreas circundantes.

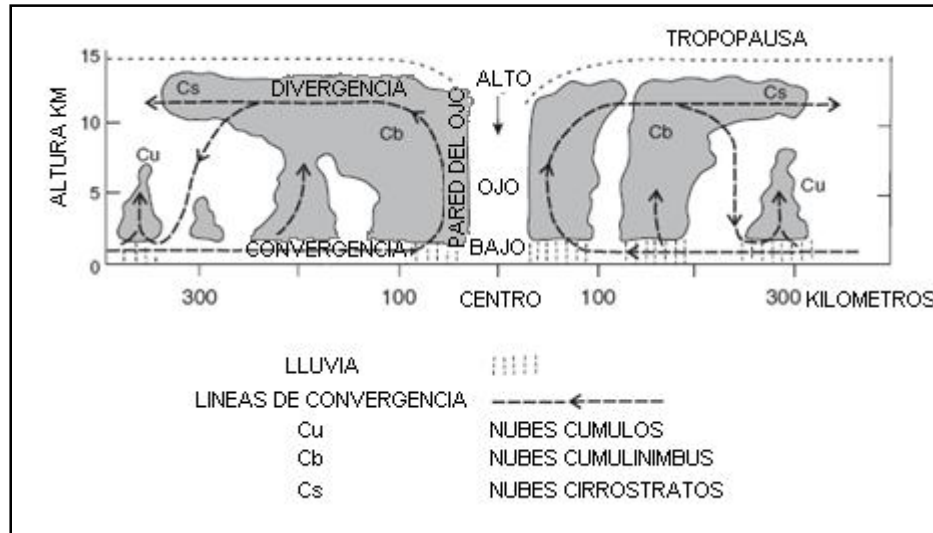


Figura 2.4 Sección transversal de un ciclón tropical donde se observan la estructura de las nubes y las líneas de flujo del viento (Modificada de Terry, 2007).

El movimiento de una tormenta sobre la superficie del océano se debe principalmente a una corriente de aire de mayor tamaño que se llama corriente conductora. Debido al tamaño de los ciclones y la energía que transportan, es difícil definir la corriente conductora (Jiménez et al., 2007) y por ende, estimar su trayectoria. Los ciclones tropicales de gran tamaño pueden modificar las condiciones del flujo del aire a su alrededor y con ello afectar considerablemente su movimiento. Sin embargo se ha observado un comportamiento regular en las trayectorias de las tormentas tropicales principalmente cuando se observan en la misma época del año (Elsner, 1999); en latitudes bajas viajan hacia el oeste empujados normalmente por los vientos alisios y en latitudes altas viajan al noreste siguiendo una trayectoria parabólica.

2.1.3. DISIPACIÓN

La energía de un ciclón tropical proviene principalmente del calor y la humedad oceánica. Comúnmente, al entrar en aguas frías o a tierra firme, el ciclón perderá energía disipándose rápidamente. Las causas de la disipación de un ciclón tropical no son entendidas en su totalidad. Sin embargo, se sabe que si alguna de las condiciones que permiten la existencia de la tormenta se agota, indudablemente el ciclón perderá energía y se desvanecerá. El decaimiento de un ciclón depende principalmente de dos razones; la fricción en tierra y la falta de calor-humedad.

Cuando un ciclón tropical toca a tierra, los vientos que transporta tendrán más obstáculos, como el relieve, las vegetación, construcciones, etc., esto aumenta la fricción impidiendo que el viento se desplace con facilidad como ocurre sobre la superficie del mar, la velocidad del viento disminuye, el ciclón pierde energía y se disipa. Si el ciclón comienza a desplazarse por tierra firme es común que se disipe. Otra explicación de este hecho es que la energía y humedad que la tormenta adquiere del suelo no se compara con las grandes cantidades que encuentra en el océano, entonces al no tener suficiente calor y humedad comienza a desvanecerse. Esto no siempre ocurre, algunas tormentas tropicales logran pasar sobre islas de tamaño y altura considerables sin perder energía.

Algunos ciclones se disipan en el mar sin haber tocado tierra, esto se debe principalmente a que, como se ha observado, las tormentas tropicales por lo general tienen trayectorias hacia los polos, donde el agua es fría, en estos lugares no se cumplen las condiciones físicas que requiere la tormenta para continuar, por ejemplo podría encontrar en su trayectoria una zona donde la velocidad del viento es muy alta en niveles altos. Algunas tormentas fuertes después de pasar las latitudes tropicales pueden transformarse en tormentas extratropicales y sobrevivir incluso en aguas frías.

2.2. CLASIFICACIÓN DE CICLONES TROPICALES

La velocidad del viento es el parámetro principal para clasificar los ciclones tropicales en función de su intensidad. La velocidad del viento se relaciona con la fuerza del ciclón y se calcula mediante un promedio de observaciones conocido como velocidad de viento máximo sostenido (VMS). El VMS consiste en promedios de mediciones de la velocidad del viento de un ciclón sobre el suelo y en un área plana durante 10 minutos.

Una clasificación de la fuerza del viento es la escala de Beaufort, que contiene 12 categorías para vientos con velocidades a partir de 0 [Km/s]. La máxima categoría en la escala de Beaufort corresponde a vientos con velocidades superiores a 118 [Km/s] (escala completa en Jiménez et al. 2007). En la actualidad esta categoría se ha extendido por la escala Saffir-Simpson que incluye 5 categorías de huracanes.

La clasificación general de los ciclones tropicales en función de su VMS consiste en tres categorías:

- Depresión tropical: VMS menor a 63 [Km/h].
- Tormenta Tropical: VMS entre 63 y 118 [Km/h].
- Huracán: VMS mayor a [118 Km/h].

La escala Saffir-Simpson tiene como objetivo clasificar los huracanes que se forman en el Pacífico Noroeste y en el Atlántico en función de la velocidad del viento y la presión central mínima con la finalidad de establecer información del potencial destructivo y los daños esperados. Cada categoría se define con un valor de velocidad máximo. Las depresiones tropicales se diferencian y catalogan asignándoles un número, pero a partir de la categoría de tormenta tropical se les asigna

un nombre de una lista ordenada alfabéticamente, que se repite cada seis años. Cuando una tormenta o huracán produce daños devastadores, su nombre se elimina de la lista.

2.2.1. ESCALA DE HURACANES SAFFIR-SIMPSON

En 1969, la Organización de Naciones Unidas solicitó la evaluación de los daños generados por el paso de los huracanes en un determinado tipo de viviendas. A partir de ello, el ingeniero norteamericano Herber Saffir y el entonces director del Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, Robert Simpson, desarrollaron una escala de medición para calificar los daños potenciales que puede provocar un huracán, considerando la presión mínima, los vientos y la marea durante su paso.

La escala de huracanes Saffir-Simpson es una clasificación del 1 al 5 de la intensidad de un huracán basada en la velocidad del viento. Esta escala es una estimación de los daños potenciales que un huracán puede causar en el área costera si impacta directamente. Los huracanes y tifones de categoría 3 o más son considerados huracanes mayores o intensos debido al potencial de pérdida de vidas y daños materiales. Las tormentas con categoría 1 y 2 también son peligrosas y requieren medidas preventivas. El término "Súper Tifón" es utilizado al oeste del Pacífico del Norte para describir ciclones tropicales con vientos de más de 250 [Km/h].

- a) Categoría 1: el daño ocasionado por estos huracanes es mínimo. Los vientos alcanzan velocidades que van desde los 119 a los 153 [Km/h], mientras que las marejadas no superan los 1.5 [m]. La presión es superior a 980 [mbar]. Entre los trastornos más visibles está la caída de algunos arbustos y otros árboles de escaso tamaño, así como el desprendimiento de algunas estructuras que no fueron bien aseguradas.
- b) Categoría 2: provoca daños moderados. Los vientos van desde los 154 a los 177 [Km/h], y las marejadas pueden, fácilmente, llegar hasta los 2.4 [m]. Derriba algunos árboles, daña letreros y avisos publicitarios y destruye, en forma parcial, techos, puertas y ventanas. Es posible, además, que las carreteras, caminos y edificaciones cercanas a la costa se inunden, por la subida de las aguas.
- c) Categoría 3: los vientos, entre 178 y 209 [Km/h], y las marejadas, que superan los 3.5 [m], ocasionan daños extensos. Árboles de varios metros de altura y con raíces bastante firmes, se elevan por los aires, mientras las casas rodantes son, fácilmente, removidas de sus lugares habituales. Además, las grandes construcciones de la franja costera sufren un gran deterioro por el aumento del nivel de las aguas y también por la cantidad de escombros arrastrados, que chocan contra ellas. Si se detecta un huracán de estas características, es probable que se proceda a evacuar a la gente que vive en los sectores más cercanos al mar, trasladándola a sectores interiores.

- d) Categoría 4: daños extremos. Los vientos van desde 210 hasta 250 [Km/h], y las marejadas superan los 5 [m] en su avance a tierra firme. Se produce el colapso total de los techos; algunas paredes se desploman y los terrenos bajos se inundan. El agua de la costa avanza con facilidad unos diez kilómetros hacia el interior, lo que provoca la urgente evacuación de la población.
- e) Categoría 5: los huracanes de este rango son considerados devastadores. Los vientos alcanzan velocidades superiores a 250 [Km/h], y las marejadas superan los 5 [m] de la categoría anterior, la presión puede descender de 920 [mbar]. En las zonas azotadas por huracanes pertenecientes a esta categoría, se produce casi un colapso total de las edificaciones, la vegetación e, incluso, las rutas de evacuación.

En 2010 el NHC de Estados Unidos eliminó la presión y la marejada como característica para estimar la intensidad de una tormenta, dejando así la escala únicamente en términos de los daños producidos donde la velocidad del viento es máxima. Esto debido a que los daños producidos por un ciclón tropical varían de un lugar a otro, por ejemplo, dependiendo del punto de observación de la zona de máxima velocidad del viento, del grado de exposición del lugar, la vegetación o la susceptibilidad a inundaciones, estándares de construcción, etc.

2.3. IMPACTOS SOCIALES Y AMBIENTALES

Los huracanes son los sistemas atmosféricos que más peligro representan para la población. Existen diversos fenómenos asociados a los huracanes y que producen muchos daños cuando impactan en tierra; la alta velocidad del viento, la precipitación intensa que a su vez puede producir inundaciones, los rayos y principalmente las marejadas ciclónicas presentan un alto riesgo en las zonas costeras, causando desastres aun mayores debido al aumento de la población en estas regiones.

Un huracán de gran intensidad que toca tierra puede producir impacto de dos tipos; directo e indirecto (Jiménez et al., 2007). Directamente los efectos que producen los ciclones tropicales son la erosión costera, y la destrucción por el viento y la marea de tormenta. Indirectamente algunos de los efectos en la población son las enfermedades por la contaminación a causa de la destrucción, estrés y problemas económicos por la destrucción, daño a cultivos, barcos y a la pesca, incluso el aumento en el precio del petróleo debido al peligro que representa en una plataforma petrolera que se encuentre en su trayectoria.

Históricamente se ha observado que la marea de tormenta es la principal causa de la destrucción asociado a un ciclón tropical. Sin embargo, la marea y los fuertes vientos se concentran en una zona relativamente pequeña a toda la extensión del ciclón. Las lluvias intensas, en cambio, cubren un área mucho mayor, debido a las bandas de nubosidad, afectando cientos de kilómetros desde el centro del ciclón. Las posibilidades de inundación aumentan si el ciclón tropical, en cualquiera

de sus etapas, desde depresión hasta huracán, se desplaza lentamente en tierra causando que una lluvia intensa permanezca mucho tiempo sobre una zona. Además, si hay un antecedente de lluvias en la región costera donde el ciclón impacta, la saturación del suelo aumenta el potencial de inundación. Algunas condiciones orográficas, así como las condiciones climáticas regionales, que se reflejan en altos niveles de humedad, pueden causar la intensificación de las lluvias. Si esto ocurre en suelo de uso urbano habrá muy posiblemente inundaciones, o si se trata de laderas sin vegetación, pueden ocurrir deslizamientos.

El viento representa una amenaza importante durante un huracán. Durante un huracán de categoría uno el viento alcanza velocidades desde 118 [Km/h] incrementando incluso a más 250 [Km/h] en un huracán de categoría cinco. Edificaciones débiles, árboles, postes y camiones pueden ser derribados por la fuerza del viento y cualquier objeto suelto arrastrado por el viento a estas velocidades representa peligro y causar daños severos. El viento más intenso ocurre cerca del centro del huracán y en uno de sus cuadrantes, pero decae rápidamente cuando el ciclón tropical toca tierra. El viento también es el causante del oleaje, la fricción en la superficie del mar y el viento cuando este se desplaza causan las olas. Durante un ciclón tropical la velocidad del viento es muy grande, además hay un descenso de presión en el centro de la tormenta, estos dos factores causan que un aumento en el nivel medio del mar que se conoce como marea de tormenta y puede causar inundaciones en zonas bajas cerca de la costa.

Cuando el viento va de tierra hacia el mar hay un descenso en el nivel medio del mar, pero la marea de tormenta es más intensa cuando los vientos se dirigen hacia tierra, siendo mayor el incremento cuando la marea es alta a causa de las variaciones astronómicas causadas por la Luna y el Sol. El alto oleaje puede llegar varios kilómetros costa adentro arrastrando sedimentos y estructuras hechas por el hombre. El mayor daño causado por la marea de tormenta es por las inundaciones y por el impacto de las olas, que pueden alcanzar alturas mayores a 6 [m] durante un huracán de categoría cinco.

El Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés) en E.U.A. ha implementado un programa de alerta ante la amenaza de un huracán basado en el monitoreo en tiempo real de las características de la tormenta, como la velocidad del viento o los cambios en la presión atmosférica, y en la posterior estimación del comportamiento en horas subsecuentes. La primera fase del programa se observan las condiciones de la tormenta en un área determinada y se trata de estimar la evolución en periodos de 36 a 48 horas, esto con la finalidad de emitir una alerta de emergencia para evacuar si es necesario. La siguiente fase se refiere a la emergencia, donde se estiman las condiciones en periodos menores a 24 horas cuando el daño es inminente. Ante la ocurrencia de un huracán, la principal característica que se estima es la trayectoria, pues generalmente hay mucha incertidumbre de la dirección que tomará.

Uno de los principales problemas en el pronóstico de un huracán es que todas las condiciones necesarias para su desarrollo son muy comunes y se pueden encontrar en distintas regiones de los océanos, pero cuando en una zona se encuentran juntos, también es común que alguna condición falte, por lo que es difícil establecer la alerta con anticipación. La mayoría de los sistemas de alerta

implementados requieren de información estadística en conjunto con observaciones en tiempo real. Por ejemplo, para la predicción del número e intensidad de los ciclones tropicales en una temporada se estiman las condiciones de la Oscilación del Sur de El Niño (ENOS por sus siglas en inglés), de la Oscilación Cuasi-Bienal (OQB) y de la presión atmosférica en el Caribe. La Universidad de Colorado (CSU) en Estados Unidos implemento este sistema de pronóstico con la finalidad de estimar los el número de tormentas tropicales y los días de tormenta. Para el Atlántico las condiciones que se esperan son la fase caliente del ENSO y vientos del oeste en el caso de la OQB, junto con una disminución de la presión.

2.3.1. HURACANES EN EL GOLFO DE MÉXICO Y EN EL PACÍFICO MEXICANO

Un análisis de las trayectorias de los ciclones tropicales muestra que no hay zona costera de México que esté libre de la amenaza de las tormentas tropicales, que en muchos casos llegan a la intensidad de huracán. En el Golfo de México y en el Pacífico, el litoral del país es vulnerable a los efectos de las tormentas tropicales, aunque su comportamiento en ambos litorales es algo diferente.

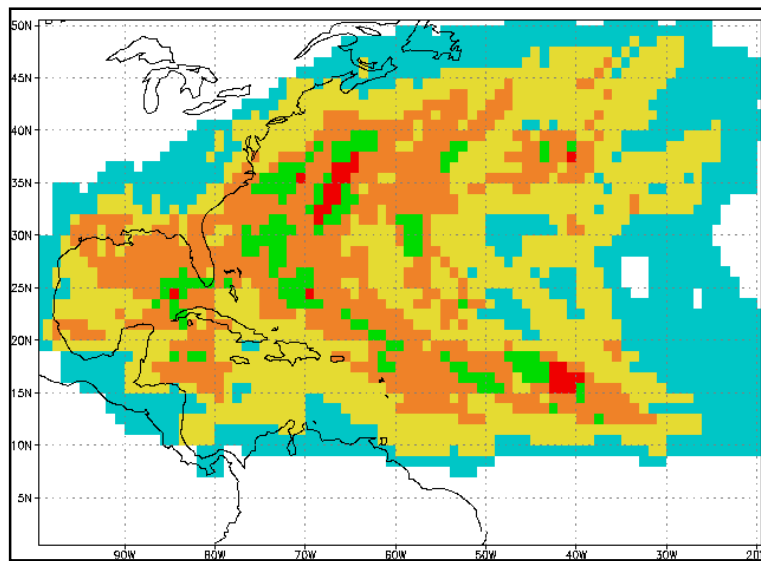


Figura 2.5 Número máximo de tormentas tropicales y huracanes que afectan una área durante una temporada en el Atlántico. El color azul indica 1 tormenta, amarillo 2, anaranjado 3 tormentas o huracanes, verde 4 y rojo 5 tormentas. Analisis de 1944 a 1997 en areas de 165 Km. (Creada por Todd Kimberlain y tomada de NOAA-AOML, 2013: <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/tcfaq/G14.html>).

La forma cerrada del Golfo condiciona la corta duración y baja frecuencia de los ciclones, ya que las tormentas se encuentran en poco tiempo con tierra y se disipan. La Península de Yucatán es el

área más afectada por los ciclones pues generalmente tienen trayectoria directa desde su lugar de origen, en el Atlántico Oriental, hacia esta península y frecuentemente se desplazan hacia el noroeste impactando directamente sobre el territorio de Estados Unidos. En las dos últimas décadas se ha incrementado la frecuencia e intensidad de los huracanes en esta región; se deben destacar el Gilberto en 1988 que causó la muerte de decenas de personas, el Mitch en 1998 y Katrina y Emily en 2005 y Dean en 2007. La Figura 2.5 muestra el número máximo de tormentas tropicales y huracanes que afectan un área determinada en el Atlántico. En esta figura se puede observar que en el Atlántico norte la zona de mayor impacto se encuentra en el Golfo de México, entre las penínsulas de Florida y Yucatán, y también frente a la costa este de E.U.A. En las costas Mexicanas del Golfo de México también que hay una incidencia importante de Tormentas tropicales y ciclones que afectan a todos los estados costeros y que se encuentran en la Península de Yucatán, siendo esta la más afectada México.

Las trayectorias de los huracanes en el Pacífico mexicano generalmente permanecen en el mar, siguiendo recorridos más o menos paralelos a las costas en dirección noroeste. Un reducido porcentaje de los huracanes que se forman en el Pacífico Oriental gira para entrar a tierra, donde causan enormes destrozos, como ocurrió en el Puerto de Manzanillo en octubre de 1959 en el que murieron más de mil personas, y el Tara del 10 de noviembre 1961, que entró al oeste de Acapulco causando inundaciones severas; la población de Nuxco fue materialmente sepultada por la avalancha de material de acarreo y se produjeron daños viales en las cercanías. Paulina en 1997 causó 228 muertes y pérdidas por más de \$448 millones de dólares (Jiménez et al., 2007) en las costas de Oaxaca y Guerrero.

En el Pacífico, la ocurrencia de huracanes esta inversamente correlacionada con la actividad en el Atlántico. En promedio ocurren 13 ciclones por temporada (Tabla 2.1), aunque se han observado menos de seis en temporadas débiles hasta 24 en temporadas intensas. Esta correlación podría señalar a que no coinciden temporadas intensas en los dos océanos.

2.4. PATRONES TEMPORALES DE LOS CICLONES TROPICALES EN EL ATLÁNTICO

El clima de la Tierra tiene cambios en varias escalas de tiempo. La contribución del Sol a dichos cambios está descrita por fenómenos como la variación de la órbita de la Tierra alrededor del Sol o con los cambios de irradiación solar y recientemente se ha atribuido a las actividades antropogénicas repercusión en el clima y aumento en el número e intensidad de los huracanes. La frecuencia de ciclones tropicales se refiere al número de eventos que ocurren en una temporada o en determinado intervalo de tiempo. La frecuencia de huracanes no es constante, tiene variaciones que se deben a fluctuaciones climáticas que pueden ser regionales y afectar de una temporada a otra o cambios globales a lo largo de décadas o siglos.

La alta temperatura superficial del mar (TSM) y los bajos valores de la cizalladura vertical del viento ($|Vz|$) son considerados como las principales condiciones para la formación de huracanes, algunos estudios consideran que también la oscilación multidecadal del Atlántico (OMA) tiene

influencia importante en su aparición. Recientemente se ha atribuido a la actividad antropogénica, mediante el cambio climático, el aumento en el número de huracanes intensos y destructivos aunque, no se ha encontrado una relación directa entre los dos fenómenos (Goldenberg et al., 2001). Una alta temperatura superficial en el mar mantiene el desarrollo de un ciclón tropical y por esta razón es de esperarse que un incremento en la temperatura promedio de los océanos sea la causa del incremento en el número de tormentas devastadoras. Este hecho no se ha podido demostrar debido a la poca confiabilidad de los datos históricos.

Las causas que controlan la frecuencia de ocurrencia de los ciclones tropicales no son bien entendidas en la actualidad. En promedio ocurren 80 ciclones por año en todo el planeta y están distribuidos de manera casi particular en distintas regiones, por ejemplo, en el Atlántico ocurren en promedio 8.8 ciclones por año, esto representa 11.1% del total de ciclones que ocurren anualmente, de los cuales aproximadamente el 50% alcanza la categoría de huracán y en promedio dos huracanes por año alcanzan la categoría de intensos. Los huracanes de categoría cinco son los más devastadores pero menos comunes ocurriendo en promedio uno cada tres años y representan menos de 5% de los Huracanes en el Atlántico.

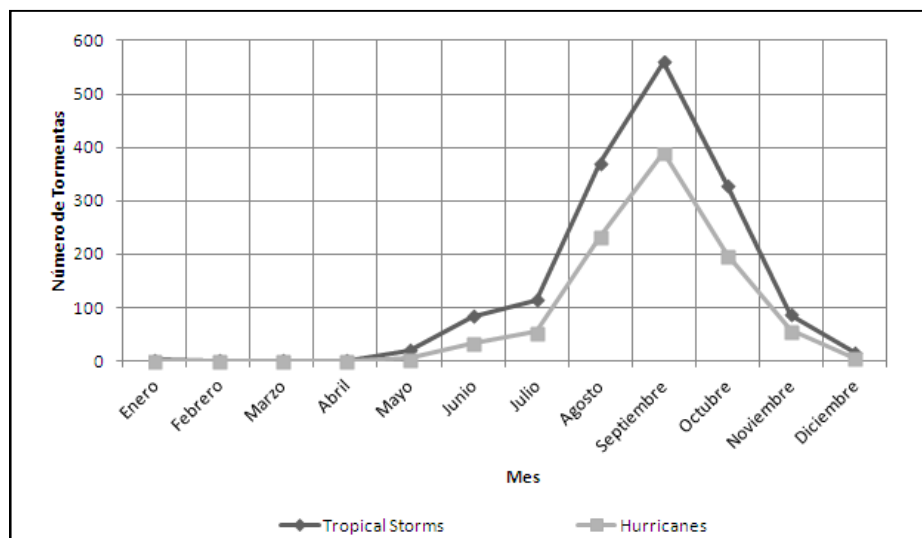


Figura 2.6 Distribución por mes de las tormentas tropicales y de las que alcanzaron grado de huracán en el periodo de 1851 a 2011, el mes de septiembre es el más intenso en cuanto a número de ciclones tropicales (Datos de NOAA: AOML, 2013).

El océano Atlántico incluye los mares entre en América y Europa y África, incluyendo el mar Caribe y el Golfo de México, y la zona donde surgen las tormentas tropicales se conoce como Región Principal de Desarrollo, esta región se encuentra al oeste de África en la zona tropical del Atlántico Norte y el Mar Caribe, entre 10° y 20° de latitud norte. La Figura 2.6, muestra la distribución mensual de las tormentas tropicales y de aquellos que se convirtieron en huracanes en el periodo

de 1851 a 2011. En el Atlántico, los huracanes más intensos aparecen entre agosto y octubre teniendo un pico máximo en septiembre y un mínimo en abril.

Usando algunos precursores como TSM en el Atlántico y $|Vz|$ en algunos estudios, ha permitido reconstruir la serie de huracanes más intensos (categoría ≥ 3) desde 1730 aunque los datos confiables sobre la categoría de los huracanes son a partir de 1924. Se ha encontrado que periodos de mayor intensidad ocurrieron en 1756-1774, 1780-1785, 1801-1812, 1840-1850, 1873-1890 y 1928-1933 (Figura 2.7). Estos periodos no se comparan con el periodo 1995-2005 que tuvo notablemente mayor actividad (Nyberg et al., 2007).

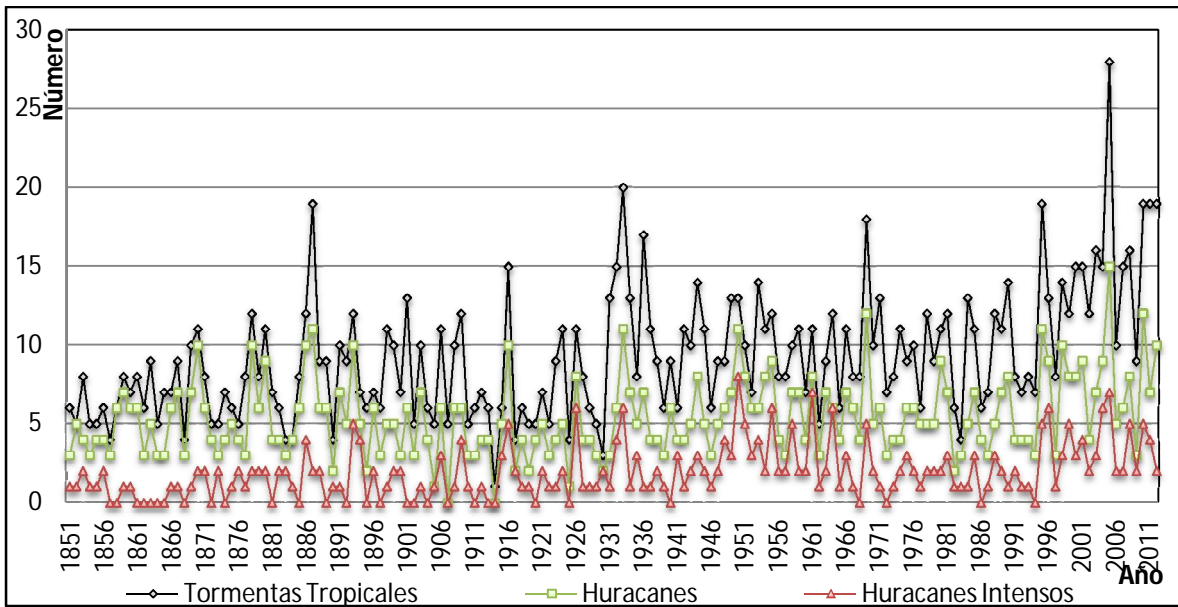


Figura 2.7 Conteo anual de tormentas tropicales, huracanes y huracanes mayores en el Atlántico norte en el periodo de 1851 a 2012 (Datos de NOAA: AOML, 2013).

Mediante análisis espectrales en diferentes series de tiempo relacionadas con la actividad ciclónica se han obtenido periodicidades intrínsecas de ~8-11 y ~20-30 años. Los mínimos en los índices del OMA se han correlacionado con las ocurrencias mínimas de huracanes intensos en los periodos 1820-1830, 1910-1920 y 1970-1990.

La asociación entre huracanes en indicadores de anomalías climáticas se ha realizado en distintos estudios con el interés de pronosticar el peligro. En el Atlántico, la frecuencia anual de huracanes está descrita por las Oscilaciones Cuasi-Bienal, multidecadal y cuasi-decadal (Elsner 1999), todas estas variaciones tienen relación directa con la ocurrencia de Huracanes de origen tropical.

| Región Ciclónica | Frecuencia | Porcentaje |
|-------------------------|-------------------|-------------------|
| Hemisferio Norte | | |
| Atlántico | 8.8 | 11.1 |
| Pacífico Noreste | 13.4 | 16.9 |
| Pacífico Noroeste | 26.3 | 33.2 |
| Índico Norte | 6.4 | 8.1 |
| Total | 54.6 | 69 |
| Hemisferio Sur | | |
| Norte de Australia | 10.3 | 13 |
| Pacífico Suroeste | 5.9 | 7.5 |
| Índico Sur | 8.4 | 10.6 |
| Total | 24.5 | 31 |
| Total Global | 79.1 | 100 |

Tabla 2.1 Promedio anual de ciclones de acuerdo a cada región de 1958 a 1988 (Adaptada de Terry, 2007).

En el Pacífico, la variabilidad anual del número de ciclones depende de las fluctuaciones no temporales en la relación océano-atmósfera. La Oscilación Cuasi-Bienal (QBO) es una alternancia de los vientos zonales en la estratósfera tropical entre las fases del este (positiva) y del oeste (negativa), con periodos de aproximadamente 2.5 años. En la serie de huracanes aparece también la periodicidad de 2.5 años coincidente con la de QBO, siendo más intensa la temporada de huracanes que ocurre durante los vientos del oeste. En promedio ocurren 7 huracanes intensos durante la fase negativa y 4 durante la fase positiva.

La periodicidad de 4-6 años está ligeramente relacionada con la oscilación de El Niño. El Niño es el calentamiento anormal en el Pacífico ecuatorial, frente a las costas de Perú, seguido normalmente de un periodo de enfriamiento también anormal (La Niña), que se repiten aproximadamente en periodos de 4-6 años. Aunque estas variaciones no son estrictamente un comportamiento periódico, se ha implicado con una disminución del número de huracanes en el Atlántico (Gray, 1993). Fenómenos como la Oscilación de El Niño tienen influencia en la trayectoria y ocurrencia de ciclones tropicales, aumentando su aparición en aproximadamente 28% cuando la temperatura del Pacífico este disminuye (Terry, 2007). Así mismo, la influencia del fenómeno del Niño es bien aceptada en la frecuencia de los huracanes en el Atlántico.

La teoría que relaciona el fenómeno de El Niño con la ocurrencia de huracanes en el Atlántico o más específicamente en el Caribe, señala que la frecuencia de los huracanes en el Atlántico Norte disminuye cuando la temperatura en el Pacífico aumenta (Elsner, 1990). El Niño produce un incremento en la convección sobre el Pacífico lo que a su vez produce vientos fuertes del este creando una alta cizalladura vertical del viento en el Atlántico y Mar Caribe disminuyendo la posibilidad de que aparezcan zonas anómalas para la formación e intensificación de huracanes en estas regiones. Por ejemplo, durante El Niño en 1997, sólo tres huracanes se formaron en el Atlántico y en 2002 cuatro, comparado con el promedio anual de ocho. La Niña tiene el efecto contrario, disminuye la cizalladura del viento en el Atlántico favoreciendo la aparición y desarrollo

de huracanes. En diversos métodos de alerta por huracanes o predicción de la temporada de huracanes se ha intentado incluir información sobre el fenómeno del niño. Sin embargo, predecir las condiciones de El Niño es complicado y depende del periodo de tiempo en que es calculado, siendo más certeras las predicciones que se realizan entre junio y diciembre.

Las oscilaciones de baja frecuencia (Periodos de 7-10 años) pueden ser explicados con variaciones en la TSM (Elsner et al., 1999), la cual tiene variaciones en la escala de aproximadamente diez años.

2.5. MODELOS DE PRONÓSTICO DE HURACANES EN EL ATLÁNTICO

En conjunto, el conocimiento de estas variaciones ha sido de utilidad para la estimación y pronóstico de la actividad ciclónica en el Atlántico. Los modelos de pronóstico diario surgen ante la necesidad de emitir una alerta temprana sobre las condiciones y posible evolución de un ciclón tropical. Para ello, se realizan observaciones en tiempo real a distancia y con satélites (NOAA, <http://www.nhc.noaa.gov/>). Los pronósticos estacionales intentan estimar la actividad de ciclones tropicales (Elsner, 1999), es decir, el número de tormentas por temporada, así como los días de tormenta. Estos modelos estadísticos consideran observaciones de las características que influyen en la formación de un ciclón tropical, como la oscilación de El Niño o la Oscilación Multidecadal del Atlántico, que en su conjunto permiten estimar estadísticamente la temporada de ciclones aplicando modelos bayesianos. O usándolos como predictores y considerando que las tormentas tropicales siguen una distribución de Poisson.

El primer modelo de predicción de la actividad de huracanes en el Atlántico Norte fue propuesto por Gray (Gray, 1984). Quién realizó un estudio estadístico sobre la relación entre indicadores de la actividad climática, como la oscilación cuasi-bienal (QBO), El Niño (ENOS) y la anomalía superficial de presión (SLPA), con la actividad de huracanes, basándose en las correlaciones que se encontraron con los análisis de Shapiro (1982). Por ejemplo, la disminución en el número de huracanes observado durante la fase del este de la QBO o la correlación negativa entre la SLPA durante los meses de agosto a octubre con la actividad ciclónica. Su modelo permite calcular el número de huracanes por temporada con la ecuación

$$NH = 6 + QBO_1 + QBO_2 + EN + SLPA \quad (2.1)$$

Donde NH es el número de huracanes por temporada, QBO_1 es un factor de corrección por la dirección del viento de 30 [mb] cerca de 10 °N, este factor vale 1 si el viento es del oeste, -1 si es del este ó 0 (cero) si cambia de fase. QBO_2 es el factor de corrección por los vientos zonales u de 30 [mb] en la temporada. Este factor vale 1 si $\frac{\partial u}{\partial t} > 0$ ó -1 si $\frac{\partial u}{\partial t} < 0$ y 0 (cero) si $\frac{\partial u}{\partial t}$ cambia de signo. EN es el factor por el fenómeno de El Niño, se restan 2 si es moderado, 4 si es intenso o si no es año Niño vale cero. $SLPA$ es el factor por la anomalía superficial de presión y vale +1 ó +2 si

la anomalía es <-0.4 ó <-0.8 [mb] respectivamente y si la anomalía es <0.4 ó <0.8 [mb] vale -1 ó -2 . $SLPA = 0$ si la anomalía se observa entre -0.4 y 4 . El modelo de Gray permitió obtener una correlación de 0.77 entre el número de huracanes observado y el predicho y 0.88 en la correlación entre el número de huracanes más tormentas tropicales, utilizando 33 años de datos entre 1950 y 1983.

Modificaciones posteriores se han realizado al modelo de Gray para incluir nuevos descubrimientos y correlaciones entre índices de actividad atmosférica y el número de huracanes por temporada, número de huracanes intensos o número de huracanes más tormentas tropicales (Gray et al., 1992 y 1994), utilizando como precursores la fase del QBO, la fuerza del ENOS, los vientos zonales de 200 [mb], la intensidad de la SLPA en el Caribe y la precipitación en regiones occidentales de África antes del inicio de la temporada de huracanes en el Atlántico. Este modelo se sigue utilizando y actualizando para el pronóstico realizado por el grupo de la Universidad de Colorado (CSU) con diferentes periodos de anticipación que van desde el inicio de la temporada hasta 6 meses de anticipación del inicio de la temporada.

Elsner y Schmertmann (1993) utilizaron la regresión lineal con un modelo de Poisson para estimar el número de huracanes tropicales por temporada H_T y el número de huracanes mayores MH como

$$H_T = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i x_i \quad (2.2)$$

Donde β son los coeficientes de los predictores obtenidos en la regresión lineal y x_1 , x_2 y x_3 son los predictores. En su modelo utiliza como predictores la QBO de los vientos a 30 [mb], la precipitación en la región de Sahel en los meses de agosto y septiembre y la lluvia en Guinea entre agosto y noviembre. Para estimar el número de huracanes mayores o intensos se asume que el número de huracanes por temporada sigue una distribución de Poisson,

$$MH = \exp\left(\gamma_0 + \sum_{i=1}^4 \gamma_i x_i\right) \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3) las variables son las mismas que en la ecuación (2.2) salvo x_4 que la QBO de los vientos a 50 [mb]. Los modelos propuestos por Elsner le permitieron obtener correlaciones de 0.61 y 0.84 entre los números de huracanes pronosticados y los observados para huracanes tropicales y huracanes mayores respectivamente.

Wang et al. (2009) presentó también un modelo de predicción con base en las relaciones empíricas entre la variabilidad del número de huracanes por temporada y la anomalía de temperatura superficial del mar (SST) y la cizalladura vertical del viento $|Vz|$ en la región principal de desarrollo de huracanes en el Atlántico ($20-88^\circ W$ y $10-20^\circ N$). Utilizando datos de 1981 a 2006 obtuvo correlaciones de 0.66 y -0.69 entre la variabilidad del número de huracanes y la SST y $|Vz|$ respectivamente. Su modelo asume que las características atmosféricas pretemporada, SST y $|Vz|$,

permiten estimar el número de huracanes debido a que estas características han sido identificadas como controladores primarios en la variación del número de huracanes (Gray, 1984a). Para ello realiza regresiones lineales simples y múltiples para uno o varios predictores y la variación del número de huracanes. Los coeficientes de la regresión son después utilizados en la ecuación de regresión para el número de huracanes más el promedio de término largo del número de huracanes por temporada, que se define como el promedio del número de huracanes en los 26 años analizados. El desempeño de los pronósticos realizados se evaluó con el método de verificación cruzado, obteniendo correlaciones de 0.6 para pronósticos con 3 meses de anticipación y 0.9 con cero meses de anticipación a la temporada.

Los modelos utilizados para el pronóstico de huracanes, principalmente permiten estimar el número de huracanes por temporada con base en relaciones estadísticas de diferentes indicadores de actividad atmosférica. Los modelos se han modificado para pronosticar incluso el número de días de tormenta por año, el número de tormentas tropicales más huracanes o sólo el número de huracanes mayores (categoría 3 o mayor en SSE) (Gray et al., 1993), (Elsner y Schmertmann, 1993). Además, estos modelos permiten estimar la actividad ciclónica con las condiciones pretemporada y de forma dinámica con tiempos de anticipación superiores a 6 meses (Wang et al., 2009), lo que indica la fuerte relación entre los diversos indicadores de actividad atmosférica que tienen variaciones oscilatorias con la ocurrencia de huracanes (Pérez-Peraza et al., 2008).

3. PROCEDIMIENTO PARA PRONÓSTICO DE GLE

Los Eventos de Protones Solares Relativistas (EPS) asociados a las fulguraciones solares se han asumido de naturaleza aleatoria por la dificultad de predecir la fecha exacta de su ocurrencia. A pesar de que su ocurrencia tiene una tendencia modulada por el ciclo de once años de actividad solar (Miroshnichenko, 2001) observado por ejemplo en índices como el número de manchas solares (Pérez-Peraza, 2009b), no hay una relación que establecer con anticipación cuando habrá un evento de esta naturaleza.

Debido a los efectos que producen en los satélites, vehículos espaciales y en dispositivos de telecomunicaciones, así como el riesgo que representan a nivel bioquímico para las personas que habitan en latitudes polares o tripulaciones de vuelos a gran altura, y para astronautas en viajes espaciales, el pronóstico de estos eventos se vuelve muy importante, principalmente para generar una alerta y planear acciones que permitan reducir el impacto de la radiación. Sin embargo, la compleja física involucrada en la producción y transporte de partículas relativistas solares, y a que los modelos teóricos del Sol permiten entender sólo parcialmente su evolución, la predicción de estos eventos es muy complicada, y por ello, pocos intentos se han realizado en cuanto al pronóstico de su ocurrencia, generalmente limitándose a las alertas en tiempo real sobre el flujo de partículas esperado después de una fulguración (Feynman, 1997) y tienen además poca certeza en su pronóstico.

El monitoreo en tiempo real de las condiciones del clima interplanetario apoyado con modelos teóricos del comportamiento de la actividad solar son propuestas que intentan predecir la ocurrencia de GLE, pero estos sistemas brindan información sólo algunos minutos u horas antes de su ocurrencia (Dorman, 2003). Actualmente existen proyectos de alcance internacional cuyo objetivo es la investigación del clima espacial por medio de los RCG y también el pronóstico de los GLE, por ejemplo el NMDB-Project (Base de Datos de los Monitores de Neutrones por sus siglas en inglés), en el que participan países de la Unión Europea, Rusia, EUA y Canadá entre otros, tiene la finalidad de crear una base datos con las mediciones de los rayos cósmicos que pueda consultarse en tiempo real. El NMDB-Project cuenta con un sistema de predicción de GLE con base en observaciones en tiempo real del flujo de partículas en los monitores de neutrones de la red mundial (Mavromichalaki et al., 2006 y 2009) y su propósito es emitir la alerta ante la ocurrencia de GLE.

En virtud de que los trabajos mencionados previamente de Pérez-Peraza et al. (2009,2012), relativo a la sincronización de oscilaciones comunes entre las diferentes capas de la atmosfera solar se propuso un método de predicción basado en cierto tipo de alertas en tiempo real, totalmente diferente a los otros métodos de alertas; sin embargo, como la estación de Monitor de Neutrones Mexicana (en Ciudad Universitaria) del Instituto de Geofísica solo ha detectado unos pocos GLE del universo de 70, desde 1942 (debido a su baja latitud con una rigidez muy elevada) se abandonó esa línea de investigación que ya existe con otras metodologías (ej. Mavromichalaki

et al., 2006), pues de lo contrario habría que establecer una colaboración con países de las altas latitudes, como la colaboración NMDB-Project en el que participan países de la Unión Europea, Rusia, EUA y Canadá, se optó por postergar esa línea de investigación, y atacar el problema de pronóstico no como alertas previas al GLE, sino con una metodología que permita pronósticos con de meses o años de anterioridad.

Como se ha explicado en la primera sección este capítulo, el comportamiento de los Rayos Cósmico Galácticos medidos cerca de la Tierra puede brindar información acerca del medio circundante y también del comportamiento de la actividad solar. Esto se ha analizado con la correlación de las periodicidades de mayor contenido energético en los rayos cósmicos y en índices de actividad solar que señalan, incluso, los procesos solares en niveles subfotosféricos (Perez-Peraza et al., 2009). Además, como es bien sabido, los rayos cósmicos están modulados fuertemente por la actividad solar y la evidencia más importante es el comportamiento inverso en el ciclo de 11 años (Figura 1.6).

En este capítulo presentamos la descripción detallada del procedimiento que proponemos para pronosticar la fecha de ocurrencia de los EPS que producen incrementos en el conteo de partículas medidas a nivel de suelo (GLE por sus siglas en inglés) considerando para nuestro estudio el análisis espectral de Fourier y la transformada de ondícula, así como la adaptación e implementación de conceptos simples de Lógica Difusa (Anexo A) para la construcción de intervalos de posible ocurrencia de los eventos. Nombramos a nuestro procedimiento PAELD (Pronóstico con Análisis Espectral y Lógica Difusa). El análisis realizado y la propuesta del procedimiento de pronóstico tienen como base el comportamiento de las periodicidades con mayor contenido de energía en la serie de rayos cósmicos. Con el procedimiento que proponemos, pronosticamos intervalos de tiempo en los que podrían ocurrir GLE para el presente ciclo de actividad solar (ciclo 24), y proponemos también intervalos de tiempo donde podrían ocurrir eventos del siguiente ciclo de actividad solar, es decir, el ciclo 25.

3.1. DATOS DE RCG Y ANÁLISIS PREVIOS

Los GLE se observan como un incremento repentino en el conteo de partículas energéticas, observadas a nivel de suelo y que son medidas por la red de monitores de neutrones (MN), y eventualmente de mesones, de acuerdo a un promedio en determinado intervalo de tiempo, generalmente de cinco minutos, es decir, los GLE son un incremento en el flujo de los rayos cósmicos que alcanzan la Tierra y poseen energía suficiente como para atravesar la magnetósfera y ser detectados a nivel de suelo. La Figura 3.1 muestra, por ejemplo, el perfil temporal del GLE69 que ocurrió el 20 de enero de 2005 observado en diversas estaciones de la red de MN. La duración de un evento desde el incremento máximo observado hasta la estabilización de la señal depende de diversos factores, y es de apenas unas cuantas horas y a lo mucho de días en eventos de gran intensidad, su duración es muy corta respecto a una oscilación de los periodos con mayor contenido energético en la serie de los rayos cósmicos que analizamos en este estudio. En nuestro

análisis no estamos interesados en características tales como el incremento observado en el flujo de los rayos cósmicos, únicamente nos interesa su distribución temporal, por esta razón utilizamos la técnica de modulación con pulsos (MWP), de forma similar al procedimiento realizado en Pérez-Peraza et al., (2011), para crear la serie de tiempo de la ocurrencia de los GLE.

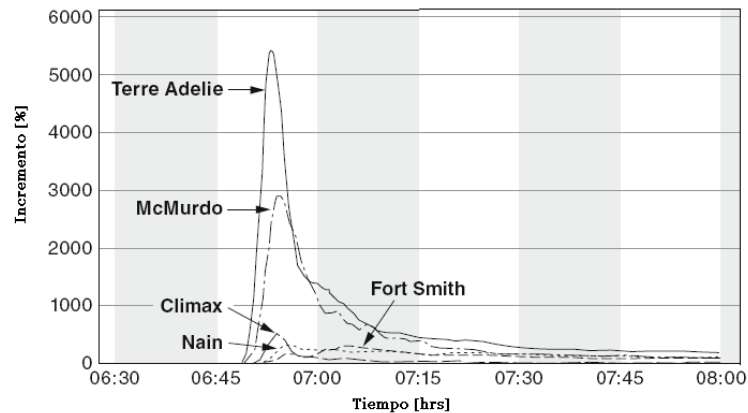


Figura 3.1 GLE del 20 de enero de 2005 observado en cinco estaciones; Climax en EUA, Terre Adélie y McMurdo en Antártica, Nain y Fort Smith en Canadá (Tomado de Beer et al., 2012).

Los datos sobre los eventos de partículas solares y de los rayos cósmicos galácticos (RCG) son proporcionados por la red mundial de monitores de neutrones (MN), cámaras de ionización, las estaciones de telescopio de muones y observaciones en satélites. Los datos de RCG observados en la tierra en el periodo 1942-1964 se limitan a valores por día (a veces incluso de horas en algunas estaciones) en un número reducido de estaciones por ejemplo Clímax en EUA es de las primeras estaciones en funcionamiento y tiene registro con valores diarios desde 1951. Sin embargo, la calidad de los datos en este periodo es dudosa debido a las técnicas utilizadas para su registro y por los parámetros que se consideraban para su corrección por factores atmosféricos, principalmente por la presión. Datos del conteo de partículas de los rayos cósmicos desde 1964 están disponibles con alta fiabilidad y con resolución mayor en diversas estaciones MN. Los datos que utilizamos para nuestro estudio abarcan el periodo entre marzo de 1964 y junio de 2013, medidos en la estación de Monitor de Neutrones de la universidad de Oulu, Finlandia (disponibles en <http://cosmicrays oulu.fi/>), ya que es una de las estaciones más fiables, con registro continuo y preciso de la red de monitores. La estación de MN de Oulu pertenece también al NMDB-Project.

| Grupo | Tipo de GLE | Evento | Fecha | Incremento % | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|----|
| 0 | Últimos | 1 | 28 Feb 1942 | 6 | | |
| | | 2 | 07 Mar 1942 | 6 | | |
| 1 | Primeros | 3 | 25 Jul 1946 | 16 | | |
| | Últimos | 4 | 19 Nov 1949 | 40 | | |
| 2 | Primeros | 5 | 29 Feb 1956 | 4554 | | |
| | Intermedios | 6 | 31 Ago 1956 | 3.3 | | |
| | | 7 | 17 Jul 1959 | 10 | | |
| | | 8 | 04 May 1960 | 290 | | |
| | | 9 | 03 Sep 1960 | 4.5 | | |
| | | 10 | 12 Nov 1960 | 135 | | |
| | | 11 | 15 Nov 1960 | 160 | | |
| | | 12 | 20 Nov 1960 | 6 | | |
| | | Últimos | 13 | 18 Jul 1961 | 23.5 | |
| | 14 | 20 Jul 1961 | 3 | | | |
| | 3 | Primeros | 15 | 07 Jul 1966 | 1 | |
| | | | 16 | 28 Ene 1967 | 17 | |
| 17 | | | 28 Ene 1967 | 17 | | |
| Intermedios | | 18 | 29 Sep 1968 | 3 | | |
| | | 19 | 18 Nov 1968 | 3 | | |
| | | 20 | 25 Feb 1969 | 1 | | |
| | | 21 | 30 Mar 1969 | 6 | | |
| | | 22 | 24 Ene 1970 | 16 | | |
| | | 23 | 01 Sep 1971 | 14 | | |
| | | 24 | 04 Ago 1972 | 10 | | |
| Últimos | 25 | 07 Ago 1972 | 5 | | | |
| 26 | 29 Abr 1973 | 4 | | | | |
| 4 | Primeros | 27 | 30 Abr 1976 | 4 | | |
| | Intermedios | 28 | 19 Sep 1977 | 3 | | |
| | | 29 | 24 Sep 1977 | 7 | | |
| | | 30 | 22 Nov 1977 | 13 | | |
| | | 31 | 07 May 1978 | 84 | | |
| | | 32 | 23 Sep 1978 | 7 | | |
| | | 33 | 21 Ago 1979 | 4 | | |
| | | 34 | 10 Abr 1981 | 1 | | |
| | | 35 | 10 May 1981 | 2 | | |
| | | 36 | 12 Oct 1981 | 11 | | |
| | 4 | Últimos | 37 | 26 Nov 1982 | 4 | |
| 38 | | | 07 Dic 1982 | 26 | | |
| 39 | | | 16 Feb 1984 | 15 | | |
| 5 | Primeros | 40 | 25 Jul 1989 | 2 | | |
| | Intermedios | 41 | 16 Ago 1989 | 12 | | |
| | | 42 | 29 Sep 1989 | 174 | | |
| | | 43 | 19 Oct 1989 | 37 | | |
| | | 44 | 22 Oct 1989 | 17 | | |
| | | 45 | 24 Oct 1989 | 94 | | |
| | | 46 | 15 Nov 1989 | 5 | | |
| | | 47 | 21 May 1990 | 13 | | |
| | | 48 | 24 May 1990 | 8 | | |
| | | 49 | 26 May 1990 | 6 | | |
| | | 50 | 28 May 1990 | 5 | | |
| | Últimos | 51 | 11 Jun 1991 | 7 | | |
| | | 52 | 15 Jun 1991 | 24 | | |
| | | 53 | 25 Jun 1992 | 5 | | |
| | | 54 | 02 Nov 1992 | 3 | | |
| | | 6 | Primeros | 55 | 06 Nov 1997 | 11 |
| | | | | 56 | 02 May 1998 | 7 |
| 57 | | | | 06 May 1998 | 4 | |
| 58 | 24 Ago 1998 | | | 3 | | |
| Intermedios | 59 | | 14 Jul 2000 | 30 | | |
| | 60 | | 15 Abr 2001 | 57 | | |
| | 61 | | 18 Abr 2001 | 15 | | |
| | 62 | | 04 Nov 2001 | 3 | | |
| | 63 | 26 Dic 2001 | 7 | | | |
| | 64 | 24 Ago 2002 | 5 | | | |
| | 65 | 28 Oct 2003 | 5 | | | |
| | 66 | 29 Oct 2003 | - | | | |
| | 67 | 02 Nov 2003 | 6 | | | |
| | 68 | 17 Ene 2005 | 3 | | | |
| | 69 | 20 Ene 2005 | 269 | | | |
| Últimos | 70 | 13 Dic 2006 | 92 | | | |
| 7 | Primeros | 71 | 17 May 2012 | 16 | | |

Tabla 3.1 Catálogo de GLE registrados en el periodo 1942 a 2012 (Modificada de Miroshnichenko y Pérez-Peraza, 2008).

Para este trabajo en particular, la resolución con valores diarios de RCG es suficiente. El estudio se concentra en escalas de tiempo mayores ya que el análisis incluye los eventos desde 1942 hasta el evento de 2012 y la serie de los RCG que utilizamos para nuestro análisis es de casi 50 años (1964-2012) de observaciones. El objetivo es pronosticar la ocurrencia de los GLE incluso con años de anticipación, por lo tanto estamos interesados en el comportamiento en escalas de tiempo desde unos cuantos días hasta decenas de años.

La fecha de ocurrencia de los GLE fue tomada del catálogo publicado por Miroshnichenko y Pérez-Peraza (2008), que incluye 70 eventos observados por la red mundial de detectores de neutrones desde el GLE01 del 23 de febrero de 1942 hasta el GLE70 observado el 13 de diciembre de 2006. La Tabla 3.1 contiene la lista completa de los eventos observados, adicionalmente se incluye una columna con incremento en el conteo de partículas observado durante el evento a pesar de que esta no sea una característica considerada para el pronóstico. En esta tabla agregamos el último

evento observado (GLE71) y que ocurrió el 17 de mayo de 2012 y que había sido predicho con relativa exactitud en Pérez-Peraza et al. (2011 y 2012).

La transformada de ondícula permite determinar las periodicidades de oscilación con mayor contenido energético, así como la evolución en el tiempo de series no estacionarias, como ocurre en el conteo de partículas de los RCG. Para determinar las periodicidades dominantes en la serie de rayos cósmicos aplicamos la técnica de la transformada discreta de ondícula utilizando el código de MATLAB de la transformada de ondícula y de coherencia desarrollado Grinsted et al., (2004), con algunas modificaciones realizadas por Investigadores en el Instituto de Geofísica, UNAM. El código original se encuentra libre al público y puede obtenerse en la dirección electrónica <http://noc.ac.uk/using-science/crosswavelet-wavelet-coherence>. Este código utiliza la ondícula madre de Morlet para obtener el espectro de potencia y calcula el nivel de significación estadística del espectro de global utilizando el método de Monte Carlo con respecto al ruido rojo de Fourier. El llamado Espectro Global (EG) es un promedio de los espectros de potencia en cada nivel de resolución; asume que la serie de tiempo tiene un espectro de potencia medio relativo con respecto a el ruido rojo, es decir, periodicidades con energía por encima de este espectro promedio (línea segmentada en el paneles de la derecha en la Figura 3.2) representan señales con niveles de confiabilidad superior a 95%. La importancia del EG es la distribución de la energía en diferentes niveles de resolución o frecuencias en la totalidad de la señal. Los valores de potencia y la amplitud del espectro global no son de interés en el estudio ya que PAELD está enfocado a la distribución temporal de la ocurrencia de los eventos y a los periodos que describen su ocurrencia, no al flujo de partículas observado durante cada GLE, por lo que en el espectro global nos interesa identificar cuáles son las periodicidades con mayor contenido energético.

Aplicando el análisis de ondículas a la serie de datos diarios de los RCG obtenemos su espectro de potencia de ondícula y el espectro global de energía. En la Figura 3.2, en el espectro de potencia, el color rojo representa las regiones con mayor potencia y en color azul las regiones con menor potencia. Por ejemplo, se observa que la periodicidad dominante (color rojo intenso) es la de 11 años y aparece durante toda la serie de los RC. La periodicidad 1.3 años es más intensa durante el mínimo de rayos cósmicos, y que corresponde al periodo de máxima actividad solar. En contraste, la periodicidad de 0.075 años parece estar presente también durante los máximos de rayos cósmicos o mínimos de actividad solar.

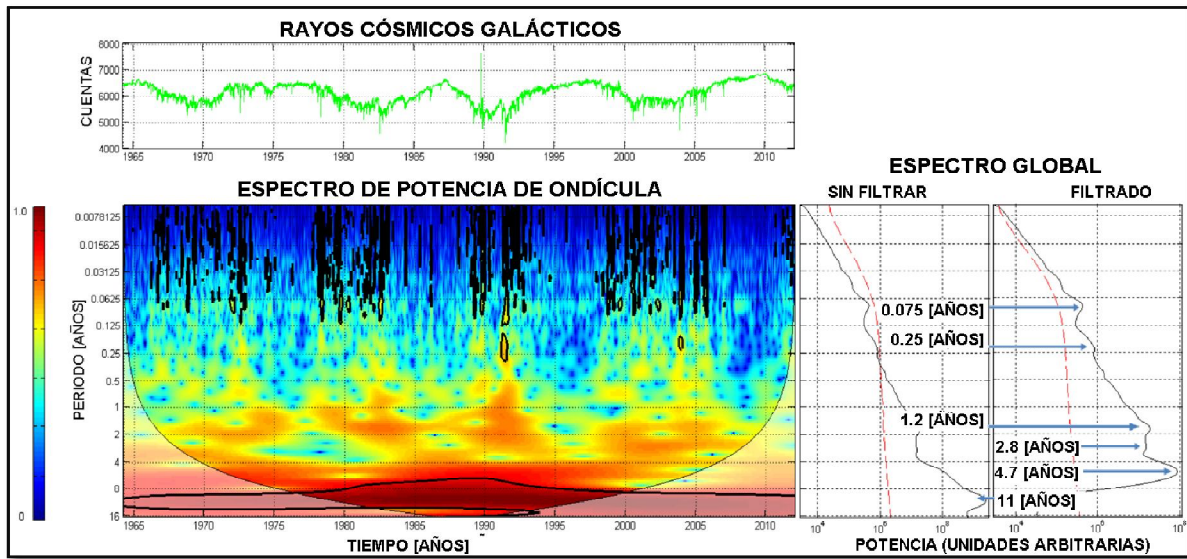


Figura 3.2 Análisis espectral: El panel superior es el flujo de RCG, panel central es el espectro de ondícula y paneles de la derecha es el espectro global de energía antes y después del filtrado.

A partir de estos espectros podemos identificar las periodicidades con mayor contenido de energía y que en este caso se encuentran en el rango de 0,0075 a 16 años (eje vertical del espectro de potencia). La resolución de las periodicidades en la transformada de ondícula depende de la tasa de muestreo y del tiempo total de observación de la señal, de forma similar a lo que se obtiene en la transformada de Fourier. La periodicidad de mayor energía es la de 11 años, tal como indica el espectro global sin filtrar en la Figura 3.2.

Comparando el espectro de ondícula en la Figura 3.2 con el espectro de los GLE en la Figura 1.8 observamos que las periodicidades presentes en la serie de los rayos cósmicos son similares a las periodicidades con mayor energía en la ocurrencia de los GLE. Las periodicidades más importantes en los GLE son los de 28 días, 4 y 8 meses, 1.2, 2.8, 4.7 y 11 años (Figura 1.8) que además tienen correlación en frecuencia y fase con la actividad solar (Pérez-Peraza et al., 2011).

Para identificar las altas frecuencias, aplicamos un filtro de Daubechies (Daubechies, 1992) y con ello suprimimos el efecto de la periodicidad de 11 años que tiene muy alto contenido de energía y oculta periodos más cortos que también son importantes en la actividad solar y por lo tanto en el comportamiento de los RCG. Después de filtrar encontramos las periodicidades que tienen alto contenido de energía y que están presentes en la señal de los rayos cósmicos son de 4.7, 2.8, 1.6, 0.25 y 0.075 años. Todas ellas con significancia superior a la del ruido rojo (espectro global filtrado en la Figura 3.2).

Pérez-Peraza et al. (2011 y 2012) analizaron las periodicidades con mayor contenido energético presentes en la distribución temporal de los GLE modulados como pulsos unitarios, y observaron

que algunos de estas periodicidades tienen un comportamiento característico durante la ocurrencia de un tipo de evento en específico, refiriéndonos a los primeros o últimos eventos dentro de un ciclo de actividad solar, además encontraron que estos comportamientos característicos se repiten en todos los grupos indicados en la Tabla 3.1. La Figura 3.3 muestra el comportamiento de algunas periodicidades energéticas durante la ocurrencia de los primeros eventos de los grupos que propone Pérez-Peraza et al. (2011 y 2012), llegando a la conclusión de que los eventos ocurren cuando determinados periodicidades cumplen ciertos criterios particulares, por ejemplo, la periodicidad de once años (línea azul) se encuentra en fase descendente, la periodicidad de 4.7 años en fase de valle o la periodicidad de 1.2 años en fase de cresta.

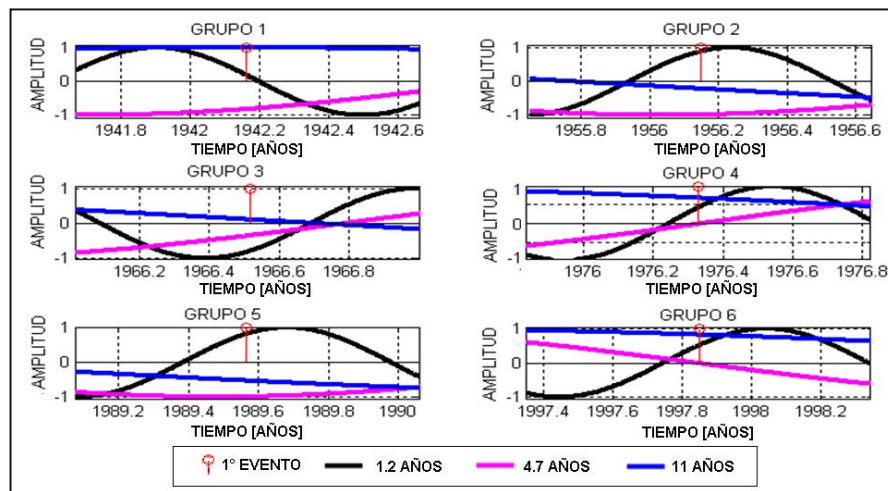


Figura 3.3 Comportamiento de las periodicidades durante la ocurrencia de los primeros eventos de cada grupo (Tomada de Pérez-Peraza et al., 2012)

Con estas observaciones empíricas se construyeron reglas de correspondencia entre el comportamiento de las periodicidades y la ocurrencia de los eventos de interés, en este caso (Figura 3.3), el primer evento de un grupo. Finalmente, asumiendo que el comportamiento de las periodicidades seleccionadas estudiadas en conjunto puede describir y delimitar la ocurrencia de los GLE, se extrapoló en el tiempo el comportamiento periódico oscilatorio, y se buscaron estas reglas de correspondencia. De esta forma se pronosticó que el primer evento del ciclo 24 de actividad solar ocurriría entre diciembre de 2011 y febrero de 2012. El GLE71 ocurrió en mayo de 2012, una fecha no muy lejana a la pronosticada y con una precisión relativamente buena dado que no había ocurrido ningún evento en un periodo de cerca de 6 años.

Continuando con este análisis, en Juárez et al. (2013), se realizó un estudio similar con la finalidad de encontrar reglas de correspondencia que permitieran señalar intervalos de tiempo donde

ocurran otros eventos, y con esto, señalar cuando ocurriría el segundo evento del ciclo 24 de actividad solar. En ese caso se intentó pronosticar incluso los eventos dentro de un grupo de acuerdo a los grupos propuestos por Pérez-Peraza et al. (2012). Sin embargo, los grupos analizados contienen diferente número de eventos y aunque se puede hablar de un segundo, tercero y cuarto evento en todos los grupos, no se puede hablar de un quinto, sexto,... etc., evento, ya que esta clasificación deja cuatro GLE en el grupo 1 y quince GLE en el grupo 5. Por esta dificultad el análisis se concentró en el pronóstico del primer evento del ciclo solar 25 y los últimos GLE de los ciclos 23 y 24, se obtuvieron resultados del pronóstico del segundo evento en el grupo 7 o ciclo 23 de actividad solar, intervalos de tiempo entre junio de 2013 y junio de 2014. En el análisis realizado se encontró que, la regla de correspondencia que describe la ocurrencia de los segundos eventos con base en el comportamiento de algunos de las periodicidades más energéticas en la serie de RC, conlleva a calcular muchos intervalos de posible ocurrencia para el segundo evento, y no se encontró un criterio adecuado para poder indicar cuál es el intervalo más probable, como durante el pronóstico del primer y últimos GLE.

En el caso del pronóstico de los primeros y últimos eventos de un grupo se encontró una relación estadística de los lapsos de tiempo entre la ocurrencia de estos eventos. El análisis estadístico por intervalos de confianza para la media y la varianza de los datos, en este caso, el tiempo transcurrido entre dos eventos, permitió calcular pesos estadísticos para señalar que intervalo es más probable. Por ejemplo, el inicio de un grupo se describió estadísticamente con los lapsos de tiempo entre el último evento de un grupo y el primer evento del grupo subsecuente o en el caso de los últimos eventos la relación estadística era con el lapso de tiempo entre últimos eventos de grupos subsecuentes. En este análisis se buscaron los valores del promedio y la desviación estándar que permitían obtener el máximo número de pronósticos acertados estudiando los eventos conocidos, en el pasado. De esta forma, en Juárez et al. (2012) se propone que el último evento de este ciclo de actividad solar ocurrirá entre junio de 2017 y enero de 2018 y que el primer evento del ciclo 25 de actividad solar ocurrirá entre octubre de 2022 y mayo de 2023. El método de pronóstico se evaluó estadísticamente encontrando que las predicciones tendrían 0.8 de certeza en el caso del primer evento del ciclo 25 de actividad solar y alrededor de 0.5 en el caso del último evento.

Considerando las propuestas antes mencionadas, en la siguiente sección presentamos la descripción del algoritmo de un nuevo procedimiento (PAELD), desarrollado tomando como ejemplo los pronósticos de los GLE próximos y que, a diferencia de procedimientos anteriores, utilizamos ahora algoritmos matemáticos para el estudio de las características de las periodicidades para el pronóstico y no se basamos el estudio en apreciaciones empíricas de la relación entre la ocurrencia de un evento y la fase de cierta periodicidad. En intentos previos intentamos atacar este mismo problema utilizando únicamente algoritmos matemáticos como las redes neuronales y descomposición en componentes principales, pero estos algoritmos no nos resultaron eficientes debido a que, aún utilizando iguales parámetros de entrada (como la serie de RCG, periodicidades con mayor energía, derivada temporal de la serie de RCG, etc.), las fechas pronosticadas cambiaban de una prueba a otra del algoritmo.

3.2. PROCEDIMIENTO PARA EL PRONÓSTICO DE GLE

En este nuevo análisis clasificamos los eventos a partir de 1942 en siete grupos (grupo 0 a grupo 6), más el grupo 7, que inició con el evento de 2012, modificando la clasificación original de Pérez-Peraza et al. (2012) y Juárez et al. (2013) ya que los eventos de 1942 (GLE01 y GLE02) eran considerados como los primeros eventos de un grupo, lo cual no es muy cierto pues al menos el GLE02 sabemos que es el último de un grupo. La Figura 3.3 muestra la clasificación de los eventos en grupos tomando como hipótesis la periodicidad dominante de 11 años en la serie de rayos cósmicos galácticos, observada con el análisis de Fourier y de ondícula, y que como es bien sabido, tiene correlación inversa al ciclo de actividad solar de 11 años observado en la serie del número de manchas solares. Adicionalmente, en la Tabla 3.1 mostramos los grupos y la subdivisión de eventos que consideramos como primeros, intermedios y últimos dentro de cada grupo.

Los eventos de 1942 los clasificamos como parte de un grupo 0 ya que no tenemos certeza de su posición dentro de un grupo completo y debido a la poca confiabilidad en la mediciones de los rayos cósmicos en esa época, es decir, no podemos afirmar si se trata de eventos al inicio del que nombramos aquí como grupo 1, o al final o dentro de un grupo previo, aunque podemos asumir que el evento GLE02 de 1942 es el último evento del ciclo 17 por la ubicación de su ocurrencia respecto al ciclo de actividad solar de 11 años observado en el número de manchas solares. A diferencia de los trabajos previos (Pérez-Peraza et al. 2012 y Juárez et al. 2013), donde consideramos el GLE01 y el GLE02 como parte del grupo 1, en este trabajo modificamos esa consideración debido a que el registro de la actividad solar mediante el conteo de manchas solares señala que el ciclo solar 17 terminó en 1944, por lo que los eventos GLE01 y GLE02, ambos registrados en 1942, forman parte de este ciclo, mientras que los eventos GLE03 y GLE04 (1946 y 1949 respectivamente) ocurrieron dentro del ciclo 18, el cual terminó en 1954. En 1956, ocurrió el evento más famoso por su gran intensidad de flujo, el número cinco (GLE05) de los que se tienen registrados, siendo este evento de partículas el primer evento del ciclo 19.

El agrupamiento de los eventos para nuestro análisis inicia considerando los dos eventos del grupo 0 (ciclo de actividad solar 17) como últimos eventos de un grupo y el GLE03 de 1946 como el primer evento del grupo 1 o primer evento del ciclo 18 de actividad solar.

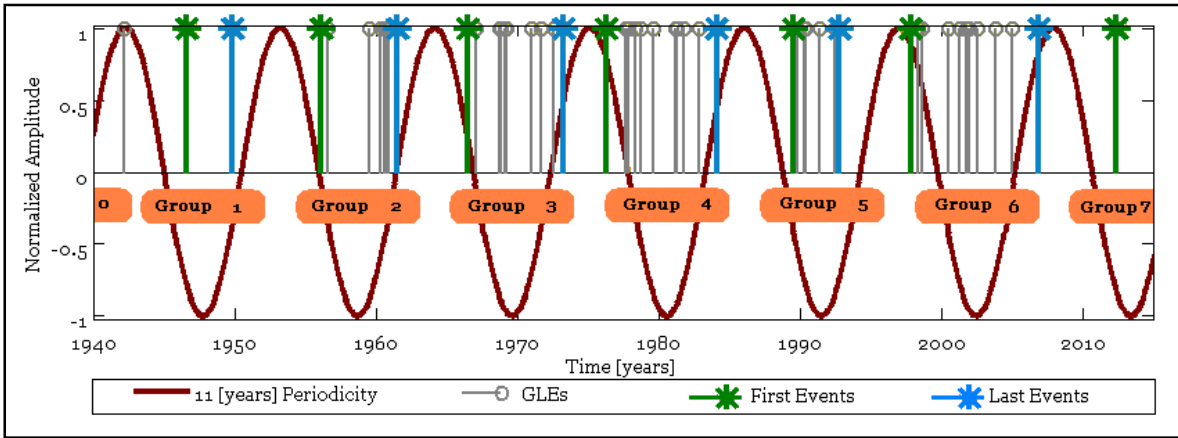


Figura 3.3 Clasificación de los eventos de 1942 a 2012 en 8 grupos de acuerdo con la periodicidad de 11 años.

Con la transformada de wavelet identificamos las periodicidades con mayor contenido de energía en la señal de rayos cósmicos (Figura 3.1). Posteriormente aplicamos la transformada discreta de Fourier a la señal de rayos cósmicos para obtener la amplitud y la fase de las distintas periodicidades que utilizamos en PAELD, sabemos que el espectro de Fourier es similar al espectro global de ondicula (Torrence y Compo, 1998), aunque las periodicidades con mayor amplitud no necesariamente coinciden. En la Figura 3.4 mostramos el espectro de amplitudes. Con la amplitud y la fase de los periodicidades dominantes podemos construir su comportamiento individual e incluso proyectarlo en el futuro asumiendo que la actividad solar observada en la modulación de los rayos cósmicos tendrá esta tendencia oscilatoria.

Las periodicidades dominantes que están presentes en los rayos cósmicos y que utilizamos en nuestro análisis son: 11, 4.7, 2.8, 1.6, 1.2, 0.4 y 0.25 años.

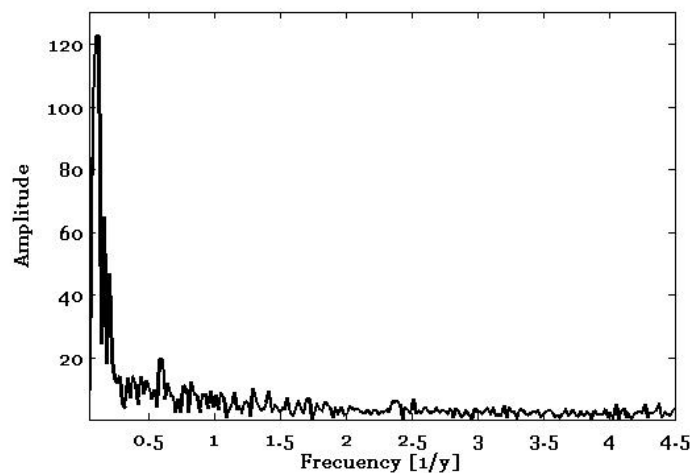


Figura 3.4 Espectro de amplitudes de Fourier de la serie de Rayos Cósmicos.

En Pérez-Peraza et al. (2011 y 2012) y Juárez et al. (2013) se estudiaron algunas de las periodicidades con mayor contenido de energía presentes en la serie de GLE y en los rayos cósmicos, y observamos que dichas periodicidades presentan un comportamiento similar durante la ocurrencia de algunos GLE similares (los primeros o últimos eventos de los diferentes grupos). Las periodicidades mencionadas se encontraban siempre cerca de su valor máximo (cresta) o valor mínimo (valle) cuando ocurría un evento (Figura 3.2). Con estas observaciones y extrapolando hacia adelante en el tiempo el comportamiento periódico, calculamos intervalos de tiempo donde se cumplen estas características u observaciones y por lo tanto inferimos que podría ocurrir un GLE. Sin embargo, el estudio del comportamiento de las periodicidades durante la ocurrencia de los eventos, en nuestro primer enfoque descrito previamente, se limitaba a apreciaciones empíricas y la información obtenida se limitaba únicamente a determinar si el evento ocurría dentro de la fase de cresta o la fase de valle de una cierta periodicidad. En este trabajo continuamos con las premisas de los trabajos previos en cuanto al comportamiento de las periodicidades para describir la ocurrencia de GLE, pero aquí, aplicando algunos de los conceptos de lógica difusa (Apéndice A), como se describen en Mendel (1995), calculamos los intervalos de tiempo en los que se cumplen con cierto grado, características similares del comportamiento de las periodicidades, es decir misma fase en todos los grupos para los eventos de un mismo tipo (primeros de cada grupo, últimos de cada grupo o intermedios) y no limitamos el estudio a la imposición de reglas empíricas, como anteriormente, seleccionando únicamente crestas o valles.

El procedimiento para calcular intervalos de tiempo consiste en crear funciones de pertenencia (Anexo A) para las periodicidades con mayor amplitud (mayor energía) en el espectro de potencia de ondícula de la serie de rayos cósmicos. Observamos que la amplitud de las periodicidades dominantes, así como su comportamiento (si es fase ascendente o descendente, o en la cresta o en el valle) durante la ocurrencia de determinado tipo de evento (primero, intermedio o último de grupo) cumple con características similares que permiten estimar los intervalos de tiempo en que ocurren los eventos (retroactivamente y pronósticos al futuro). Por ejemplo, los primeros eventos de todos los grupos se encuentran en la fase descendente de la periodicidad de once años de los rayos cósmicos, en tanto que los últimos eventos, ocurren en la fase ascendente de la misma periodicidad (Figuras 3.3 y 3.5). Para otra periodicidad, por ejemplo el de 4.7 años los primeros eventos ocurren principalmente durante la fase ascendente de un valle y los últimos en la fase descendente de la cresta (Figura 3.5). Reuniendo información del comportamiento de distintas periodicidades durante la ocurrencia de determinado tipo de GLEs en el pasado, y haciendo la proyección a futuro del comportamiento de oscilatorio de las periodicidades, inferimos que es posible pronosticar la ocurrencia de los eventos.

Las funciones de pertenencia generalmente son construidas o propuestas bajo el criterio de expertos en el área de estudio o alternativamente pueden ser calculadas con algoritmos matemáticos de análisis de datos que se utilizan principalmente en sistemas de control (Chuen, 1990). En nuestro estudio, la función de pertenencia es la curva que describe en qué grado un elemento del conjunto de amplitudes de una cierta periodicidad durante la ocurrencia de los 71 GLE pertenece, por similitud, a un subconjunto conformado por las amplitudes de esa periodicidad

durante la ocurrencia de determinado tipo de evento (primeros, últimos o intermedios). El concepto de difuso aparece del hecho de que una función de pertenencia puede describir diferentes GLE en mayor o menor grado.

En nuestro análisis, la función de pertenencia fue construida con el producto de las ecuaciones de dos campanas gaussianas normalizadas como se expresa en la ecuación (3.1), cuya media y desviación estándar corresponden al promedio y desviación estándar que se obtienen con los datos de las amplitudes de la periodicidad y de su derivada durante la ocurrencia de los eventos de estudio.

$$\mu_A = \frac{1}{\alpha_A \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\beta_A)^2}{2\beta_A^2}} \times \frac{1}{\alpha_{dA} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\beta_{dA})^2}{2\beta_{dA}^2}} \quad (3.1)$$

En la ecuación (3.1), μ_A representa la función de pertenencia de la periodicidad A que puede ser el 11, 4.7, 1.6,... años, α_A y β_A , representan desviación estándar y el promedio de los datos de amplitudes de la periodicidad respectivamente, α_{dA} y β_{dA} son calculados tomando como datos las amplitudes de la derivada de la periodicidad, en ambos casos, el promedio y la desviación estándar se calculan con los datos de las amplitudes de la periodicidad al tiempo de la ocurrencia de los eventos de interés en el pasado. Finalmente, t es la variable que representa la distribución de las amplitudes de la periodicidad. La ecuación (3.1) corresponde a la ecuación (A.1) en el Anexo A. De esta forma, aunque la propuesta de la función de pertenencia es un tanto arbitraria al seleccionar la ecuación de una campana gaussiana y no otra función, suponemos que nuestros datos se pueden aproximar con una campana gaussiana, como se realizó en Juárez et al., (2013), y la función de pertenencia tiene relación con la estadística de los datos que consideramos y no se construye únicamente bajo criterios empíricos. El uso de las amplitudes de la derivada de la periodicidad tiene como finalidad que las funciones de pertenencia distingan si el dato de las amplitudes de la periodicidad se encuentra en la fase ascendente o descendente.

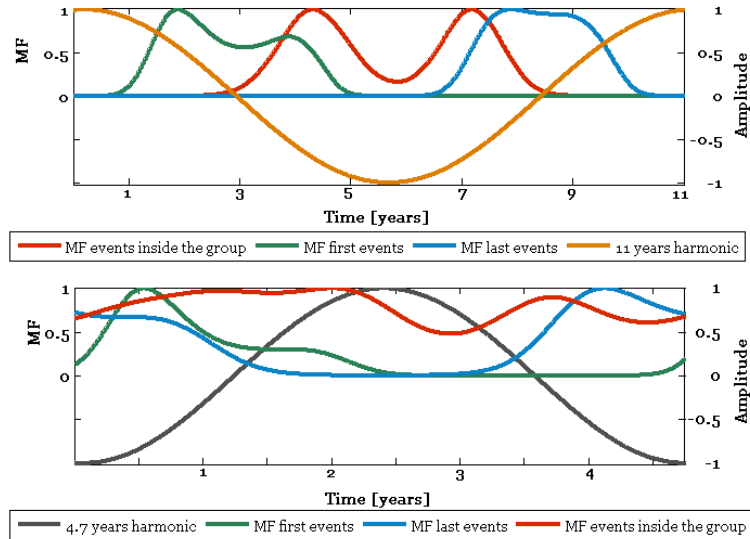


Figura 3.5 Funciones de pertenencia calculadas para los primeros, intermedios y últimos eventos respecto a la periodicidad de 11 años (arriba) y respecto a la periodicidad de 4.7 años (abajo).

La Figura 3.5 muestra la función de pertenencia construida para los tres tipos de GLE que consideramos (primeros, intermedios y últimos) respecto a la periodicidades de 11 años (panel superior) y de 4.7 años (panel inferior) de los rayos cósmicos. En el panel superior, en color anaranjado esta un periodo completo de la periodicidad de once años con su amplitud normalizada. En ambos gráficos de la Figura 3.5 las funciones de pertenencia para los primeros, intermedios y últimos eventos son la línea verde, roja y azul respectivamente. Por definición, las funciones de pertenencia tienen amplitud máxima unitaria, donde el valor de 1 indica la máxima pertenencia y 0 que no existe pertenencia (Mendel, 1995). En nuestro objetivo de pronóstico, la amplitud de la función de pertenencia es calculada con base en el comportamiento prospectivo (el comportamiento periódico en el futuro) de la amplitud de cierta periodicidad. Conjuntando la información de las funciones de pertenencia calculadas para todas las periodicidades analizadas, nos conduce a delimitar intervalos de tiempo probables para la ocurrencia de cierto tipo de evento.

Haciendo una analogía, con los trabajos previos (Pérez-Peraza et al. 2012 y Juárez et al. 2013), el comportamiento de la periodicidad se selecciona bajo una lógica determinística para la ocurrencia de un cierto tipo de eventos y con base en criterios empíricos, es decir, la función de selección de paso unitario señala que los eventos ocurren solamente en crestas o valles de una cierta periodicidad, y que a diferencia de la lógica difusa, no permite estimar grados de cumplimiento de las condiciones impuestas. Una ventaja de este nuevo análisis es que utilizamos la información de todas las periodicidades energéticas observadas con la transformada ondícula en la serie de rayos cósmicos, para crear funciones de pertenencia e incluirlos como información para el pronóstico, en tanto que, en el estudio previo seleccionamos solo las periodicidades que cumplían con el

requerimiento de estar en fase de cresta o fase de valle durante determinado evento y eran dos o tres periodicidades para cada tipo de evento.

Se observa en la Figura 3.5, que la función de pertenencia de los primeros eventos es significativa (alcanza su valor máximo) durante la fase descendente de la cresta de la periodicidad de 11 años de los rayos cósmicos, cuando la amplitud normalizada de la periodicidad es aproximadamente +0.6 en la fase descendente, esto indica que los primeros eventos ocurren sistemáticamente en todos los grupos alrededor de este valor de amplitud de la periodicidad, y que además, es durante la tendencia descendente. Siguiendo el mismo procedimiento construimos funciones de pertenencia para las demás periodicidades consideradas, para cada tipo de eventos. Encontramos que las formas de las funciones de pertenencia de los diferentes tipos de eventos y de una misma periodicidad son muy distintas, diferenciándose entre ellas por la amplitud de la periodicidad donde se encuentran los valores máximos de pertenencia, es decir difieren del valor 0.6 en el caso de los primeros eventos con respecto a la periodicidad de 11 años, a -0.2 en la fase ascendente en el caso de los últimos eventos. Los eventos intermedios ocurren siempre en la fase de valle de la periodicidad de 11 años y su función de pertenencia tiene valor máximo cuando la amplitud de la periodicidad es -0.6. Para la periodicidad de 4.7 años la amplitud durante los primeros eventos parece ocurrir principalmente en la fase ascendente y no descendente como en la de 11 años. Todo esto implica que no podemos generalizar el comportamiento de las periodicidades durante un tipo de eventos, el comportamiento es particular para cada periodicidad en cada tipo de eventos.

Una vez construidas las funciones de pertenencia para cada periodicidad, el siguiente paso consiste en calcular la intersección (ecuación A.5 del Anexo A) de todas ellas, realizando el producto,

$$\Pi = \mu_{A \cap B \cap C \dots} = \mu_A \times \mu_B \times \mu_C \times \dots \quad (4.2)$$

Dónde $\mu_{A \cap B \cap C \dots}$ denota función de intersección y $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$ las funciones de pertenencia de cada uno de las periodicidades y de determinado tipo de eventos.

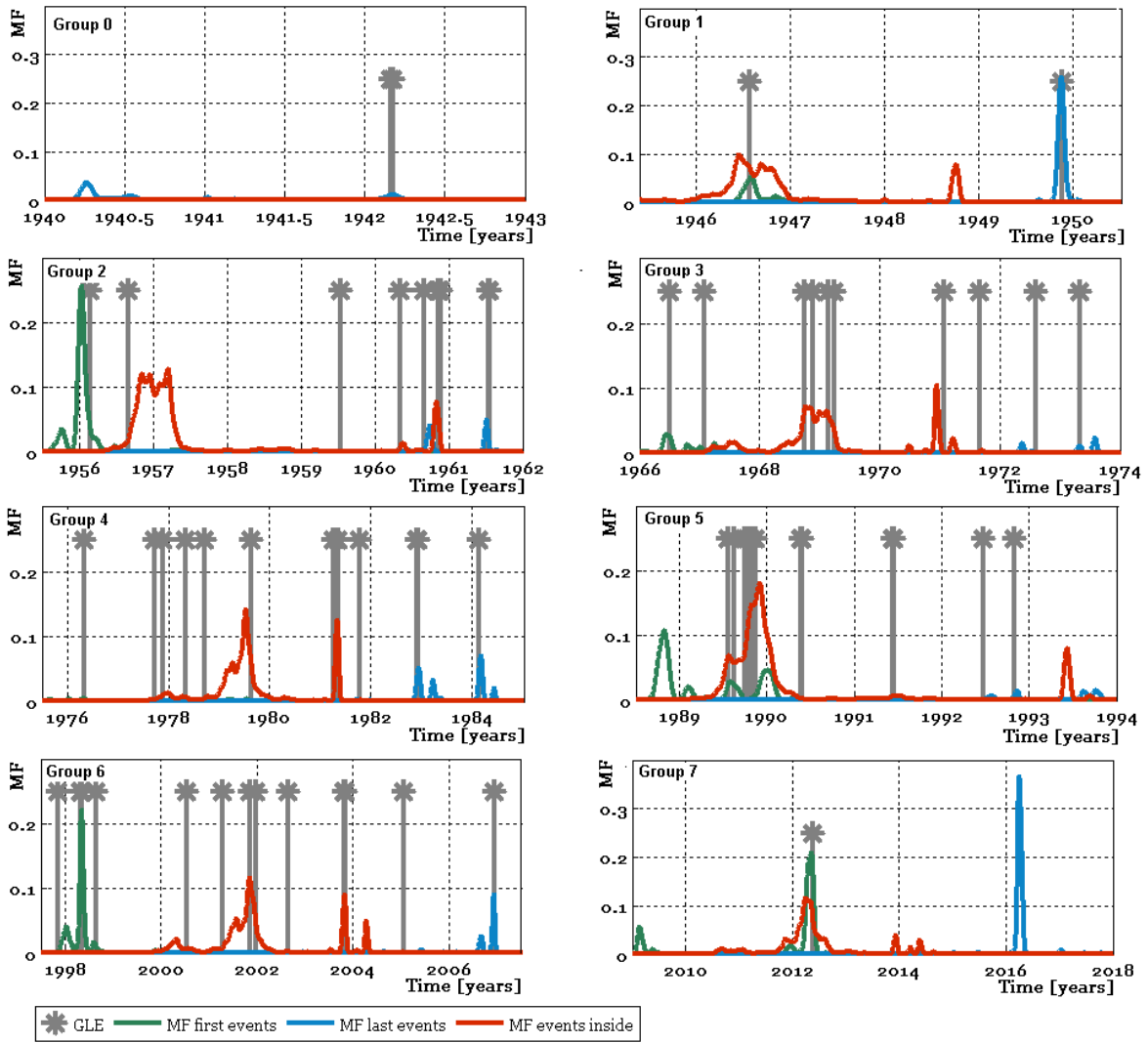


Figura 3.6 Reconstrucción y pronóstico de las funciones de pertenencia calculadas para los diferentes tipos de GLEs en los 8 grupos (Grupo 0 a Grupo 7).

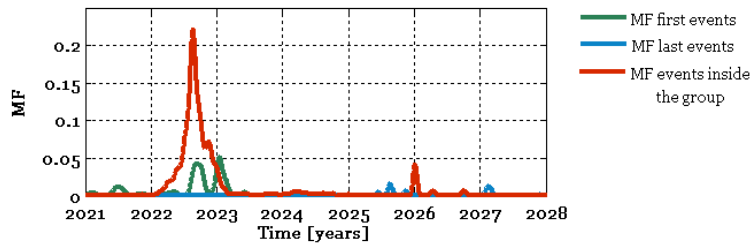


Figura 3.7 Funciones de pertenencia calculadas para el pronóstico de intervalos donde podrían ocurrir GLEs durante el Grupo 8.

El producto de las funciones de pertenencia de todas las periodicidades permite obtener una función en el tiempo Π cuya amplitud señala donde se cumplen las condiciones para la ocurrencia de los GLE en función de la conjunción de todas las periodicidades. En la Figura 3.6 mostramos la reconstrucción de intervalos de ocurrencia para los primeros, intermedios y últimos eventos de los grupos a partir de 1942 y cuyas fechas permiten calcular las amplitudes de las periodicidades que constituyen los datos para construir las funciones de pertenencia. Mostramos los posibles regiones donde, según el comportamiento cuasi-periódico, indica que pueden ocurrir eventos en el actual grupo siete y el grado de pertenencia calculado. Los picos en las líneas azules, rojas y verdes en los paneles del grupo 0 al 7 indican las regiones reconstruidas donde han ocurrido los eventos: verde-primeros, rojo-intermedios y azul-últimos eventos. El panel del grupo 7 en la Figura 3.6 y la Figura 3.7 muestran los pronósticos para los grupos 7 y 8 respectivamente. Debido a la resolución baja y a que hay eventos en fechas muy cercanas no se pueden ver todos los picos de pertenencia, pues se enmascaran por los de mayor pertenencia, lo que se traduce en mayor posibilidad de ocurrencia.

Las amplitudes de las funciones de pertenencia $\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots$ permiten estimar cuales son los intervalos en donde, según la amplitud de las periodicidades, un evento puede ocurrir, es decir, cuando la función de pertenencia tiene un máximo local indica que la amplitud la periodicidad cumple en alto grado (estadísticamente) como característica para que ocurra un GLE, por ejemplo donde las pertenencias corresponde a una amplitud normalizada de 0.6 en la periodicidad de 11 años y -0.2 en el de 4.7 años. Por ello, las amplitudes más grandes de la función Π , que se obtiene de la intersección de las funciones de pertenencia de todas las periodicidades, indicarán que la configuración de las periodicidades señala en mayor o menor grado la ocurrencia de un evento, así el pico máximo de amplitud de la función Π indicará donde la configuración es la más óptima.

Con los datos existentes se ha inferido que no han ocurrido eventos durante el máximo preciso de actividad solar y que corresponde al mínimo de rayos cósmicos (Miroshnichenko, 2001). El pronóstico de la ocurrencia de GLE (intermedios) dentro de un grupo (Tabla 3.1) se realizó considerando como característica común entre ellos su posición alrededor del mínimo de los rayos cósmicos o cercanos al máximo de actividad solar. Posteriormente calculamos la función de pertenencia con todas las periodicidades seleccionadas de forma similar a los primeros y últimos eventos. La línea roja en la Figura 3.5 muestra la función de pertenencia calculada con todos los eventos intermedios respecto a las periodicidades de 11 y de 4.7 años en los rayos cósmicos. Como se observa, esta función de pertenencia indica que los GLEs ocurren cuando la amplitud de la periodicidad de 11 años de los rayos cósmicos es alrededor del valor de -0.6 (tiene amplitud negativa), es decir, cuando se encuentra en fase de valle. Y para la de 4.7 años principalmente durante la fase ascendente cuando la amplitud de la periodicidad está entre 0-0.95.

La Figura 3.6, muestra las funciones de pertenencia construidas para los eventos en los ciclos de actividad solar previos. Es importante mencionar que, bajo las suposiciones realizadas, es posible que en todos los intervalos pronosticados por las funciones de pertenencia no ocurran eventos, por ejemplo en el grupo 1 donde no ocurrieron intermedios o que ocurran incluso más de 10

eventos intermedios como sucedió durante el grupo 6 en un lapso de 3 años (1989-1991). Sin embargo, de acuerdo a la opinión de diversos autores, se espera que este ciclo de actividad sea menos intenso (Pesnell, 2011), por lo que esperamos que el número de eventos que ocurran sea pequeño y como vemos en el panel del grupo 7 en la Figura 3.6, la función de pertenencia para los eventos intermedios construida con la proyección del comportamiento de las periodicidades a futuro tiene apenas unos picos de amplitud pequeños comparados, por ejemplo, con el pico alrededor del evento de 2012.

La función de pertenencia Π calculada para reconstruir y pronosticar GLE con base en la amplitud de todas las periodicidades seleccionadas es una función continua en el tiempo debido a que es la intersección de campanas gaussianas que tienden a cero únicamente en el infinito (comportamiento asintótico), es decir, $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} \mu = 0$, además, sabemos que la amplitud máxima de las periodicidades está acotada en un intervalo, por estas razones las funciones de pertenencia de cada periodicidad y la función de pertenencia resultante de su intersección no toma, en ningún caso, el valor de cero pero sí muy cercano. Debido a esta propiedad, no podemos señalar intervalos cerrados de tiempo donde la pertenencia sea diferente de cero (la campana gaussiana vale cero únicamente en $\pm\infty$), entonces para calcular intervalos de tiempo definidos (como se muestra en las Tablas 3.2-3.6), proponemos un límite inferior de la amplitud de la función de pertenencia Π . Este límite es la amplitud mínima de la función de Π con la que se reconstruye un evento conocido, es decir, seleccionamos el valor mínimo de las amplitudes de la función de pertenencia en las fechas de ocurrencia de los eventos conocidos. Las tablas muestran los intervalos que calculamos según este criterio.

Señalamos también que los intervalos pronosticados para los tipos de eventos diferentes pueden estar traslapados. Como explicamos antes, una observación puede estar descrita por dos funciones de pertenencia diferentes en diferente grado, es decir, podemos esperar que un intervalo construido con las funciones de pertenencia de los primeros eventos también este construido por las funciones de pertenencia de los eventos intermedios, esto ocurre por el comportamiento en conjunto de las periodicidades y por lo tanto, sus funciones de pertenencia, que además, pueden ser muy amplias dependiendo de la distribución de las amplitudes utilizadas para su cálculo. Esto se observa más claramente en la construcción de los intervalos con la función de pertenencia de los primeros eventos y de los intermedios en el panel del grupo 5 de la Figura 4.6.

3.2.1. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

Con la finalidad de verificar el desempeño de PAELD implementamos un método de validación. El método consiste en asumir los eventos de un grupo "x" como desconocidos y con los eventos de los grupos restantes realizarnos el pronóstico de los eventos del mencionado grupo "x", por ejemplo, asumimos los primeros eventos del grupo 1 de GLE como desconocidos, y con los primeros eventos de los grupos 2 al 7 realizamos el pronóstico de los primeros eventos del grupo

1. Posteriormente se hace lo mismo para los demás grupos, es decir, asumimos como desconocidos los eventos de un grupo “n” y con los eventos de los grupos restantes realizamos el pronóstico. Con este método de validación podemos asegurar que los pronósticos de un grupo son independientes de las observaciones dentro de ese mismo grupo, es decir, el pronóstico se realiza con características observadas en otros ciclos de actividad solar, además podemos hacer un análisis de la certeza de nuestras predicciones comparándolas con eventos observados.

Para hacer la estimación del desempeño de PAELD, durante la validación de los primero eventos, contamos cuantos posibles intervalos se obtienen en el pronóstico de cada grupo y los comparamos con el número de GLE que fueron observados realmente, en el caso ideal esperamos que el número de intervalos estimados sea igual al número de eventos observados. Adicionalmente contamos el número de eventos pronosticados exitosamente, es decir, el número de eventos que efectivamente ocurrieron dentro de los intervalos calculados.

La Figura 4.8 es una gráfica de dispersión con los resultados de la validación de los pronósticos de cada tipo de eventos (primeros, intermedios y últimos). En el eje Y mostramos el cociente entre el número de pronósticos exitosos o aciertos y el número de eventos observados por grupo, en el eje X está el cociente entre el número de aciertos y el número de intervalos calculados por grupo. Como ya mencionamos previamente, en una situación ideal esperaríamos que el cociente entre el número de aciertos y el número de intervalos calculados sea igual a uno, es decir, que pronosticamos un evento por intervalo, y que así ocurra efectivamente, probando la certeza del método y no calcular eventos ficticios, de la misma manera, esperaríamos que el cociente entre el número de aciertos y el número de eventos observados sea igual a uno, lo que indicaría un desempeño perfecto en cuanto al pronóstico. Bajo esta discusión, los puntos en la dispersión deben estar cercanos a uno.

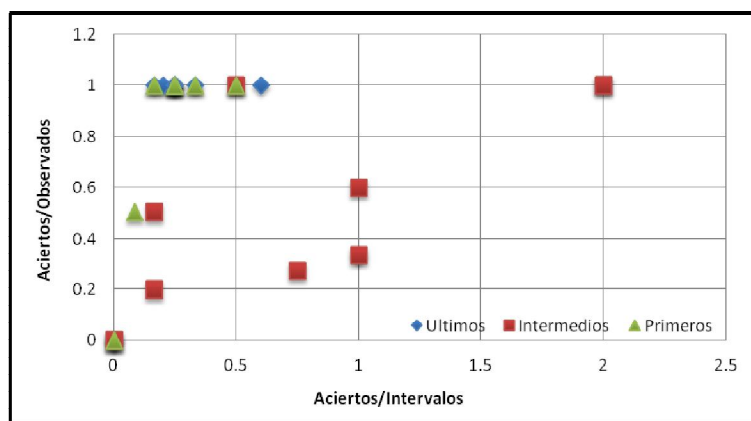


Figura 3.8 Resultados de la validación del procedimiento PAELD para el pronóstico de los diferentes tipos de GLE.

Observamos en la Figura 3.8 que la mayoría de los puntos correspondientes a los primeros y últimos eventos valen uno en el eje de aciertos/observados, lo que indica que PAELD tiene buena certeza en cuanto al pronóstico de este tipo de eventos, sin embargo, en el eje aciertos/intervalos tiene un desempeño menor, lo que indica que el método normalmente calcula un número mayor de intervalos que el número de eventos que se observan. En cuanto a los eventos intermedios el desempeño es regular en cuanto a predicciones acertadas (aciertos/observados) y tiene buen desempeño entre el número de intervalos calculados y el número de aciertos.

3.2.2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En la sección anterior presentamos la implementación del procedimiento PAELD para el pronóstico de eventos de naturaleza cuasi-estocástica tomando como ejemplo el análisis de los GLE. Claramente nuestra hipótesis es que la naturaleza de los GLE no es completamente aleatoria, y que su ocurrencia esta modulada por la actividad solar. De hecho se demostró en Pérez-Peraza et al., (2009), en un estudio de las periodicidades de las diferentes capas de la atmosfera solar, que existe una sincronización entre ellas, lo que conduce a pensar que los procesos involucrados en los fenómenos que ocurren en la atmósfera solar no son de naturaleza totalmente estocástica, sino que están regidos por patrones de cierta afinidad.

Además, consideramos la serie de los rayos cósmicos observados en la tierra para nuestro estudio debido a que su comportamiento tiene dos características importantes; la primera es que la modulación de los rayos cósmicos en el medio interplanetario está fuertemente controlada por la actividad solar, y la segunda, es que las partículas aceleradas en el sol, y que poseen energía suficiente para viajar y atravesar la atmósfera terrestre, se observan claramente como un incremento en el conteo de partículas energéticas respecto a las mediciones promedio de los rayos cósmicos en las estaciones en tierra y por ello nombrados GLE (Ground Level Enhancements en inglés).

Las condiciones mencionadas anteriormente nos permiten inferir que, si la ocurrencia de los GLE se puede describir por las oscilaciones de actividad solar, y si la actividad solar modula los rayos cósmicos observados en la tierra, entonces al pronosticar la ocurrencia de los GLE utilizando las periodicidades de los rayos cósmicos, de cierta forma estamos incluyendo en nuestro pronóstico la actividad solar, y por ello la función de pertenencia Π , calculada con todas las periodicidades, puede contener información del comportamiento de la actividad solar, señalando periodos de tiempo donde la actividad solar sea más intensa o por lo menos, tenga un comportamiento característico en la producción de partículas energéticas relacionadas con los GLE.

En las Tablas 4.2 a 4.7 mostramos los resultados de nuestros pronósticos para los GLE en el presente ciclo de actividad solar y en el siguiente. Como ya mencionamos antes es posible que en los intervalos que proponemos no ocurran GLE pero posiblemente apuntes a un incremento en la actividad solar. Así mismo, es posible que en un mismo intervalo ocurra más de un evento.

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2008-08-20 | 2008-09-21 |
| 2 | 2008-11-04 | 2009-09-16 |
| 3 | 2011-11-06 | 2011-12-29 |
| 4 | 2012-02-01 | 2012-07-09 |
| 5 | 2012-07-25 | 2012-09-18 |

Tabla 3.2 Intervalos calculados para los primeros eventos del grupo 7

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2021-08-13 | 2021-10-14 |
| 2 | 2021-10-25 | 2021-12-25 |
| 3 | 2022-02-13 | 2022-04-14 |
| 4 | 2022-08-08 | 2022-10-03 |
| 5 | 2022-11-11 | 2023-04-14 |
| 6 | 2023-04-29 | 2023-07-06 |

Tabla 3.5 Intervalos calculados para los primeros eventos del grupo 8.

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2010-05-30 | 2013-08-18 |
| 2 | 2013-11-08 | 2014-01-08 |
| 3 | 2014-02-14 | 2014-07-02 |
| 4 | 2014-08-07 | 2014-09-25 |

Tabla 3.3 Intervalos calculados para los eventos intermedios del grupo 7

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2021-09-24 | 2024-10-28 |
| 2 | 2025-12-04 | 2026-02-05 |
| 3 | 2026-03-18 | 2026-05-11 |
| 4 | 2026-09-09 | 2026-10-26 |

Tabla 3.6 Intervalos calculados para los eventos intermedios del grupo 8

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2015-04-23 | 2015-07-31 |
| 2 | 2015-05-03 | 2015-08-13 |
| 3 | 2015-09-23 | 2015-11-18 |
| 4 | 2015-12-30 | 2016-05-29 |
| 5 | 2016-12-08 | 2017-05-03 |
| 6 | 2017-05-30 | 2017-07-26 |

Tabla 3.4 Intervalos calculados para los últimos eventos del grupo 7

| INTERVAL | LIMITS | |
|----------|------------|------------|
| | START | END |
| 1 | 2025-07-17 | 2025-09-27 |
| 2 | 2025-10-18 | 2025-12-20 |
| 3 | 2026-09-06 | 2026-09-13 |
| 4 | 2026-10-21 | 2026-12-03 |
| 5 | 2027-01-01 | 2027-03-31 |
| 6 | 2027-10-25 | 2027-12-21 |

Tabla 3.7 Intervalos calculados para los últimos eventos del grupo 8.

En la Tablas 3.2, mostramos los resultados que obtenemos de pronosticar un evento conocido y reciente, el GLE del 17 de mayo de 2012 con ello calibramos y probamos nuestro procedimiento. Vemos que, con PAELD, calculamos intervalos para su ocurrencia desde agosto de 2008 hasta septiembre de 2012. Sin embargo, observando el panel del grupo 7 en la Figura 3.6 vemos que la función de pertenencia calculada para este grupo, los primeros eventos tiene un pico de mayor tamaño en los primeros meses de 2012. Finalmente el intervalo quedó delimitado entre febrero y julio de 2012. Para los eventos intermedios del grupo 7 calculamos intervalos entre junio de 2010 y septiembre de 2014. El pico máximo de pertenencia de estos eventos en el grupo 7 coincidió aproximadamente con el pico máximo de los primeros eventos antes de agosto de 2013 (Intervalo 1 en la Tabla 3.3 y línea roja en los gráficos del grupo 7 en la Figura 3.6). Adicionalmente, el segundo pico de amplitud de la función de pertenencia para los eventos intermedios señala un intervalo entre el 08 de noviembre de 2013 y el 08 de enero de 2014. Este intervalo es también de interés para nosotros ya que en este periodo de tiempo hubo actividad solar intensa e incluso se emitieron alertas en el Centro de Predicción de Clima Espacial (SWPC por sus siglas en inglés) del NOAA (http://www.swpc.noaa.gov/alerts/archive/archive_01Jan2014.html), ya que se esperaban flujos de protones con energía mayor a 10 [MeV] o mayor a 10 pfu. El 6 de enero de 2014, se observó un flujo de partículas en algunas estaciones en de monitor de neutrones y aun se discute si este evento será clasificado como el GLE72 en el NMDB. Este evento efectivamente ocurrió dentro de uno de nuestros intervalos pronosticados.

Los intervalos de tiempo que pronosticamos para los últimos eventos del grupo 7 se encuentran entre abril de 2015 y julio de 2017, pero esperamos que los últimos eventos ocurran en el intervalo de 30 de diciembre de 2015 a 29 de junio de 2016, ya que este intervalo es el que tiene el pico de mayor amplitud de la función de pertenencia calculada para pronosticar los últimos eventos de un grupo.

Con la proyección del comportamiento de las periodicidades en el futuro intentamos pronosticar también la ocurrencia de GLE para el ciclo 25 de actividad solar, o el que nombramos aquí grupo 8. Esperamos que el inicio del grupo ocurra entre agosto de 2021 y julio de 2023. Los intervalos con mayor pertenencia para los primeros eventos ocurren entre noviembre de 2022 y julio de 2023 (Figura 3.7), por lo que esperamos que el primer evento del grupo ocho ocurra en alguno de estos intervalos. El intervalo pronosticado para los eventos intermedios con mayor pertenencia lo calculamos entre noviembre de 2022 y octubre de 2024, es decir abarcando incluso los intervalos propuestos para la ocurrencia de los primeros eventos, por lo que esperamos que este lapso de tiempo sea intenso, así como el intervalo entre diciembre de 2025 y febrero de 2026. El último evento de este ciclo lo esperamos en el lapso de enero a abril de 2027.

En ausencia de una teoría física para predecir, con una precisión conveniente, la producción de partículas relativistas en el Sol con efectos a nivel del suelo (GLE), algunos sistemas de alerta en tiempo real se ha propuesto por diversos autores y agencias mundiales, pero no existen hasta ahora sistemas que permitan pronósticar los eventos con incluso años de anticipación. Los sistemas de alerta en tiempo real buscan proporcionar información dentro de los minutos u horas anteriores a la aparición de GLE con base en observaciones en tiempo real de las características

del clima espacial así como de los fenómenos solares involucrados como las fulguraciones. Sin embargo, los sistemas no siempre tienen la certeza deseada o proporcionan información en un lapso de tiempo muy corto antes de la ocurrencia del evento. Por esta razón proponemos aquí un procedimiento con base en el análisis espectral para pronosticar, con una buena precisión relativa, las fechas próximas y futuras de ocurrencia de GLE, consideramos que PAELD podría ser útil para inferir las fechas de ocurrencia de GLE antes de que iniciara el registro continuo de los rayos cósmicos, es decir, eventos antes de 1942, y antes de la aparición de detectores de rayos cósmicos.

Como ya mencionamos antes, el método que proponemos pretende pronosticar eventos de naturaleza cuasi-estocástica y lo presentamos aquí aplicándolo al análisis de la ocurrencia de lo GLE en la serie de RC. Además, consideramos que PAELD puede aplicarse a otros fenómenos cuya ocurrencia no es entendida con claridad y que además puedan analizarse armónicamente con la serie de tiempo de su ocurrencia, o con otra serie de tiempo que esté relacionada. En la siguiente sección presentamos una aplicación del procedimiento al pronóstico de huracanes de categoría 5 en el Atlántico ya que consideramos que estos fenómenos, que pueden ser devastadores en muchos casos y de gran importancia para el país. Los huracanes cumplen con los requisitos que analizamos y consideramos necesarios para implementar nuestro algoritmo.

3.3. PRONÓSTICO DE HURACANES DE CATEGORÍA 5 EN EL ATLÁNTICO

Las causas que controlan la frecuencia de ocurrencia de los ciclones tropicales no es bien entendida en la actualidad, en promedio ocurren 80 ciclones por año en todo el planeta y están distribuidos de manera casi particular en distintas regiones, por ejemplo, en el Atlántico ocurren en promedio 8.8 ciclones por año, esto representa 11.1% del total de ciclones que ocurren anualmente.

En el Pacífico, la variabilidad anual del número de huracanes depende de las fluctuaciones no temporales en la relación océano-atmósfera. Fenómenos como la Oscilación de El Niño tienen influencia en la trayectoria y ocurrencia de ciclones tropicales, aumentando su aparición en aproximadamente 28%. Recientemente se ha relacionado la frecuencia de huracanes en el Atlántico con las oscilaciones en el Pacífico, aunque no se encontrado una conexión directa (Goldenberg et al., 2001 y Elsner, 1999). Eventos extremos, tales como los huracanes de categoría 5 (HC5) son considerados fenómenos aleatorios que obedecen a configuraciones físicas demasiado complejas, su ocurrencia obedece a variables diversas y poco entendidas como los ciclos de actividad solar, variaciones climáticas e incluso procesos netamente antropogénicos. Los fenómenos solares dominan completamente el medio interplanetario, definiendo de esta manera el llamado clima espacial. Debido a diversos estudios sobre las relaciones Sol-Tierra, consideramos que los eventos extremos en el Atlántico se encuentran también, de alguna forma ligados al comportamiento del sol.

Una gran cantidad de fenómenos en la naturaleza tienen un comportamiento que se puede

describir con funciones periódicas; el comportamiento de la ocurrencia huracanes de categoría 5 en el Atlántico no es la excepción, la serie temporal de huracanes tiene intrínsecamente periodos característicos que describen cierta tendencia oscilatoria, estos periodos se encuentran ligados por procesos físicos que aun no son identificados claramente. Se ha encontrado correlación en algunas periodicidades presentes en los huracanes y en otras series como la anomalía de temperatura superficial (SST), la oscilación multidecadal del Atlántico (AMO) o las tormentas de polvo provenientes del Sahara (Pérez-Peraza et al. 2008 y Trangol, 2012)

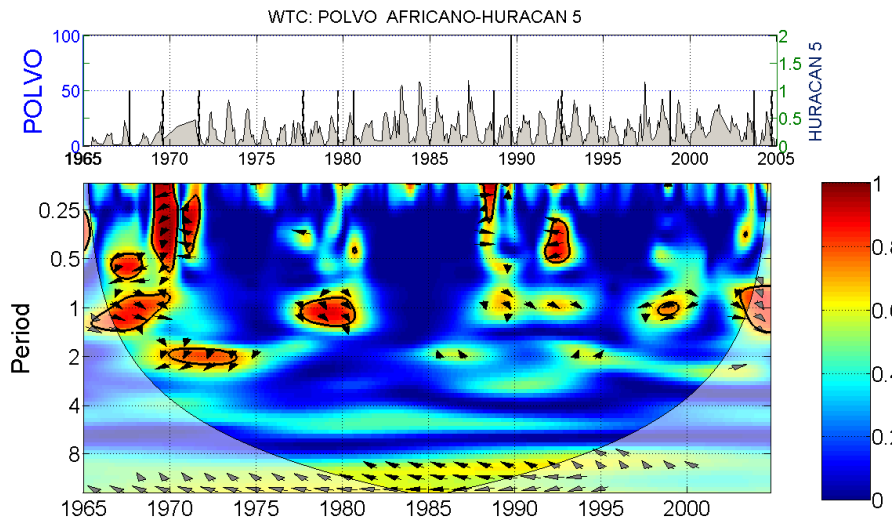


Figura 3.9 Correlación entre las Tormentas de Polvo y Huracanes de Categoría 5 (Tomada de Trangol, 2012)

Utilizando análisis espectral, como la transformada ondícula, así como el análisis del comportamiento de las periodicidades con mayor contenido energético en la serie de la temperatura superficial del Atlántico (SST) buscamos, en esta sección, caracterizar la región temporal donde es factible la formación de huracanes de categoría 5 en el Atlántico Norte; con esto nos referimos a la definición de un lapso temporal en el que las condiciones para la formación de estos huracanes es favorable. Es importante mencionar y tener claro que con este estudio no estamos en condiciones de describir cuantos huracanes pueden ocurrir ni las fechas exactas durante el intervalo de tiempo que define una región activa, en éste trabajo nos limitamos a ubicar la región señalada por las funciones de pertenencia para la ocurrencia del siguiente HC5.

3.3.1. DATOS DE HURACANES Y SST

El procedimiento que llevamos a cabo para analizar la ocurrencia de huracanes de categoría 5 en el Atlántico aprovecha el comportamiento cuasi-oscilatorio en la distribución de temporal de huracanes de máxima categoría, y relaciona su ocurrencia con la serie de temperatura superficial del Atlántico (SST) obteniendo los periodos característicos de oscilación.

En este estudio analizamos la distribución temporal de huracanes perteneciente a la Base de Datos de Huracanes del Atlántico (HURDAT) y que se encuentra en la dirección electrónica <http://weather.unisys.com/hurricane/>. Este catálogo tiene 819 huracanes registrados que ocurrieron en el Atlántico, a partir de 1851 hasta 2011. Muchos de los huracanes no impactan en tierra, desarrollan y desaparecen en aguas abiertas. Por esta razón, muchos huracanes que ocurrieron a finales del siglo XIX y principio del siglo XX no se encuentran registrados en la base de datos (Vecchi y Knutson 2008). El primer registro de eventos de categoría 5 se encuentra en 1920. Sin embargo, el registro más completo de la actividad de los huracanes en el Atlántico inició en 1966 con el uso de imágenes satelitales en el Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés) de EUA y que permiten la estimación y seguimiento de los parámetros de las tormentas con mayor precisión. En la base de datos contamos con 316 huracanes categoría 1, 213 categoría 2, 156 categoría 3, 105 categoría 4 y 29 categoría 5, estos últimos son en los que guardamos especial interés por sus efectos altamente destructivos, son los fenómenos de mayor energía en la atmósfera, además su ocurrencia se ha supuesto aleatoria, por ello son los que consideramos para nuestro análisis.

Un parámetro interesante para medir la influencia de los diversos parámetros que afectan la formación de los huracanes del Atlántico, es sin duda la temperatura de la superficie del Océano Atlántico. La temperatura superficial es un factor muy importante en la generación de huracanes, además de que las altas temperaturas en la superficie del mar son el motor que impulsa el crecimiento de una tormenta y que mantiene su existencia. La Figura 3.10 muestra la anomalía de las temperaturas del Océano Atlántico. Los datos de la temperatura superficial del Atlántico los obtuvimos de ICOADS (International Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set) de la NOAA y se encuentran libres en la dirección electrónica <http://www.cdc.noaa.gov/coads/>. La serie de tiempo abarca el periodo de 1850 a 2013 con valores mensuales.

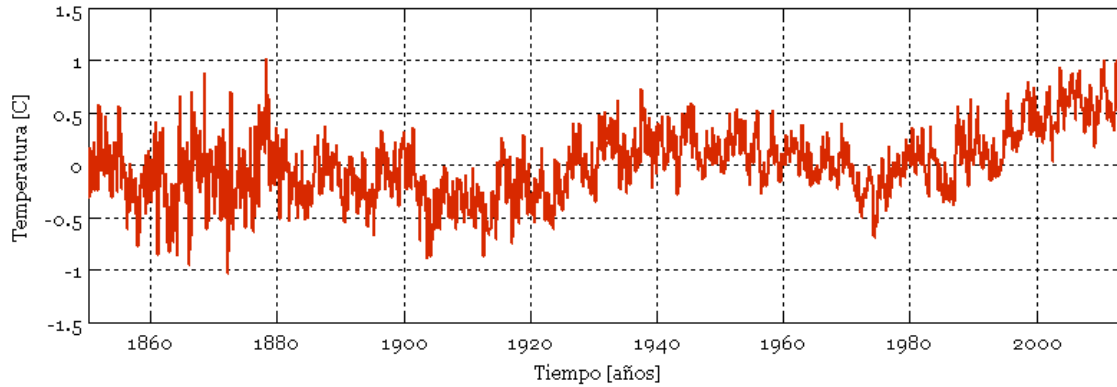


Figura 3.10 Anomalia de temperatura superficial del Atlántico.

3.3.2. PRONÓSTICO DE HA5

En Zapotitla et al. (2013) analizamos las frecuencias de oscilación con mayor energía en la distribución temporal de los huracanes. Los periodos fueron identificados en la transformada ondícula y también con la transformada de Fourier. Posteriormente realizamos una serie de observaciones empíricas para caracterizar los intervalos de tiempo que describen la activación o la desactivación de los procesos óptimos para la formación de HC5 en función de las periodicidades dominantes de forma similar al procedimiento desarrollado en Juarez et al., (2013) para pronosticar GLE. En ese estudio logramos identificar, que para la serie temporal de huracanes analizada, el comportamiento de algunos de las periodicidades energéticas tiene características similares durante las regiones o fechas donde ocurren estos fenómenos. Las periodicidades de huracanes que identificamos y seleccionamos para ese estudio fueron las de 22, 14, 9, 2 y 1 años. Con este análisis temporal, ignoramos la compleja física involucrada en la formación de Huracanes de mayor intensidad pero delimitamos intervalos de tiempo en lo que era posible la formación de HC5 con base en el estudio de su comportamiento oscilatorio. En aquel trabajo se siguió el procedimiento de Pérez-Peraza et al. (2011 y 2012) realizado para pronosticar GLE. Los huracanes de categoría 5 se modularon como pulsos unitarios y se clasificaron en cuatro grupos comenzando con el huracán de 1920 y hasta el último evento observado en 2007. Para la clasificación en grupos se tomó como hipótesis la periodicidad de 22 años (Figura 3.11). Aunque en este caso la clasificación no es tan evidente como en el caso de los GLE. La Figura 3.11 muestra la clasificación propuesta por Zapotitla et al. 2013 de los huracanes de categoría 5 respecto a la periodicidad de 22 años. Se observa que los primeros huracanes de cada grupo (flechas rojas) están siempre en fase de valle, mientras que los últimos eventos de cada grupo ocurren siempre en fase de cresta (flechas azules).

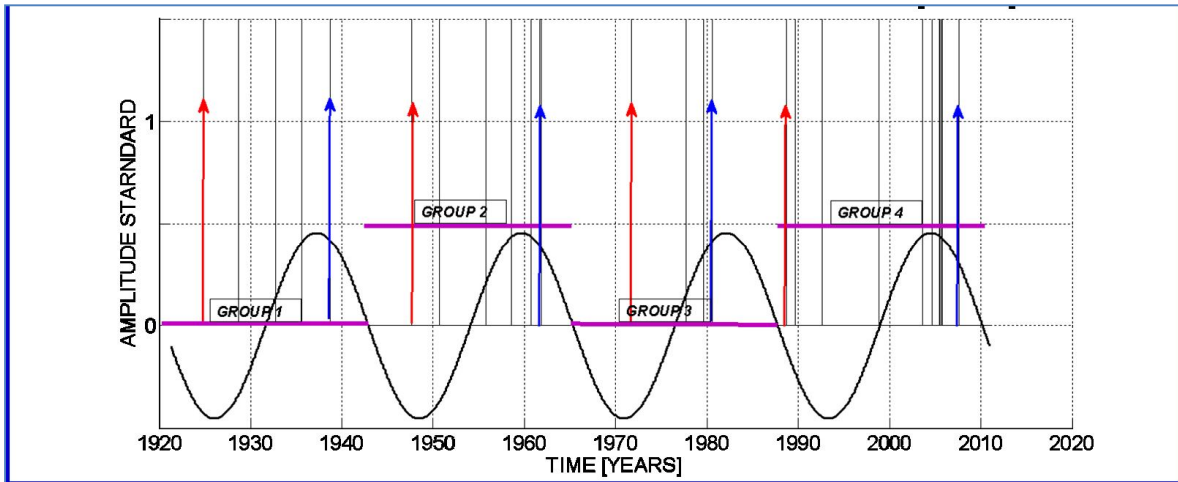


Figura 3.11 Clasificación de los huracanes de categoría cinco en el Atlántico de acuerdo con la periodicidad de 22 años (Tomada de Zapotitla et al., 2013).

Con estas observaciones empíricas de la ocurrencia de los HC5 relacionada con las periodicidades, se construyeron reglas de correspondencia que relacionan el comportamiento de las periodicidades y la ocurrencia de los eventos de interés, en este caso, el primer evento de un grupo. En el paso siguiente, asumimos que el comportamiento de las periodicidades seleccionadas en conjunto puede describir y delimitar la ocurrencia de los HC5, y proyectamos a futuro en el tiempo el comportamiento periódico para, posteriormente, buscar estas reglas de correspondencia. De esta forma se pronosticó que el siguiente huracán de categoría cinco ocurrirá en la temporada de huracanes de 2014, entre junio y octubre, siendo más probable que ocurra en el mes de septiembre, cuando ocurre el pico de actividad ciclónica en el Atlántico.

Aplicando el procedimiento PAELD propuesto en esta tesis, intentamos pronosticar nuevamente la ocurrencia del siguiente huracán de categoría 5 en el Atlántico. La Figura 3.12 muestra el espectro de potencia de onícula calcula de la serie de SST. En el espectro global observamos las periodicidades dominantes de esta serie. Los periodos que utilizamos para el pronóstico de huracanes son: 0.5, 1, 3, 11, 22 y 32 años. En Zapotitla et al. (2013) los periodos con mayor contenido de energía que se encontraron en la serie temporal de huracanes de categoría 5 son de 1, 2, 10, 14 y 22 años. Algunas periodicidades coincidentes con las que encontramos en la serie de SST. Además, en diversos trabajos se ha encontrado correlación entre la serie de SST y la ocurrencia de huracanes en el Atlántico norte (ej. Gray, 1984b; Trangol, 2012).

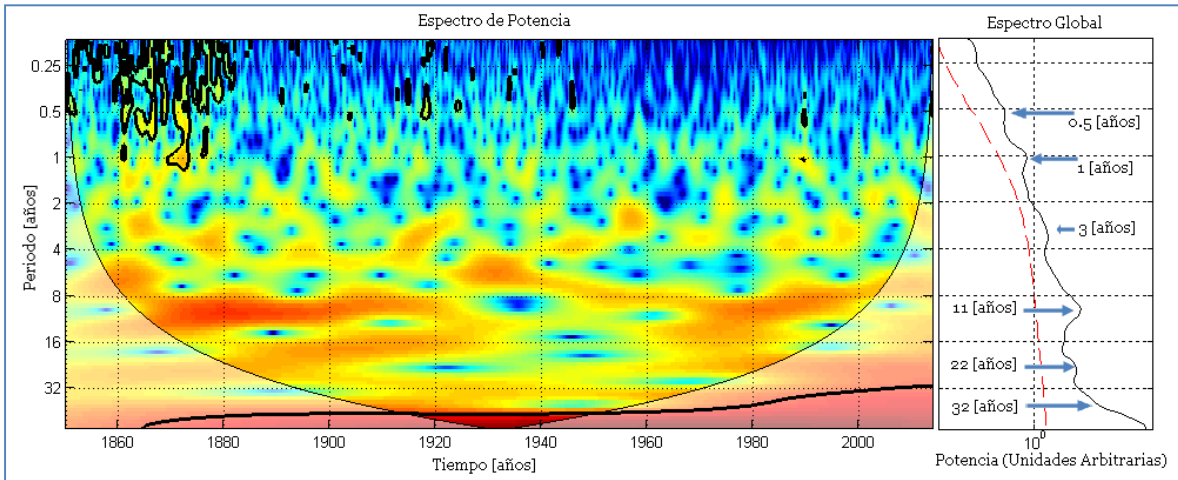


Figura 3.12 Análisis espectral: El central es el espectro de ondícula de la temperatura superficial del Atlántico, y el panel de la derecha es el espectro global de energía.

La Figura 3.13 muestra el espectro de Fourier calculado para la serie de SST. Del espectro de Fourier obtenemos la amplitud y la fase de las periodicidades con mayor contenido de energía para analizar su comportamiento durante la ocurrencia de un evento y posteriormente realizar la proyección a futuro y estimar intervalos donde pueda ocurrir un HC5.

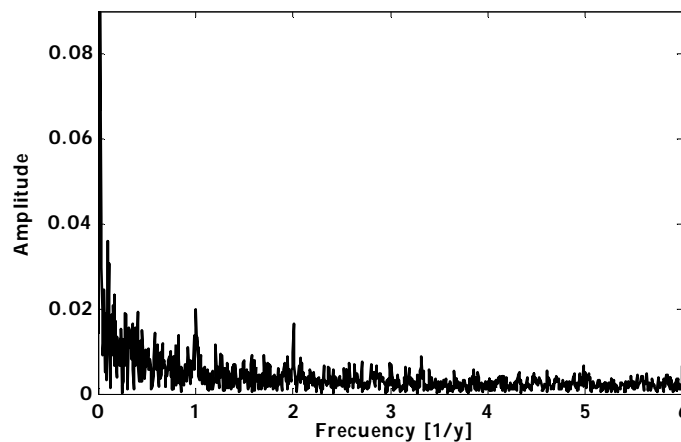


Figura 3.13 Espectro de amplitudes de Fourier de la anomalía de temperatura superficial del Atlántico.

En este nuevo estudio hicimos una nueva clasificación de los eventos muy similar a la mostrada anteriormente, pero considerando aquí, incluso los eventos de categoría 4 que aparecen en el catálogo de HURDAT antes de 1920. Esto con la finalidad de contar con mayor información para realizar nuestro análisis. En la Figura 3.14 mostramos la clasificación que proponemos en función

de la periodicidad de 22 años. En esta figura, las flechas azules representan la ocurrencia de los huracanes de intensidad máxima en el periodo 1851 a 2007, se observa que nuestra clasificación en grupos, señalados con las barras en color verde, supone que los grupos están delimitados dentro de una oscilación completa de la periodicidad, y que inicia con la fase de cresta. Señalamos, también en la Figura 3.14, con la barra azul y la leyenda “no clear data” cuáles son los eventos que consideramos como eventos de gran intensidad antes de 1920 y que no se encuentran clasificados como Huracanes de categoría 5. De acuerdo con la clasificación mostrada, el siguiente huracán de categoría 5 que pronosticamos será el primer evento del grupo 8.

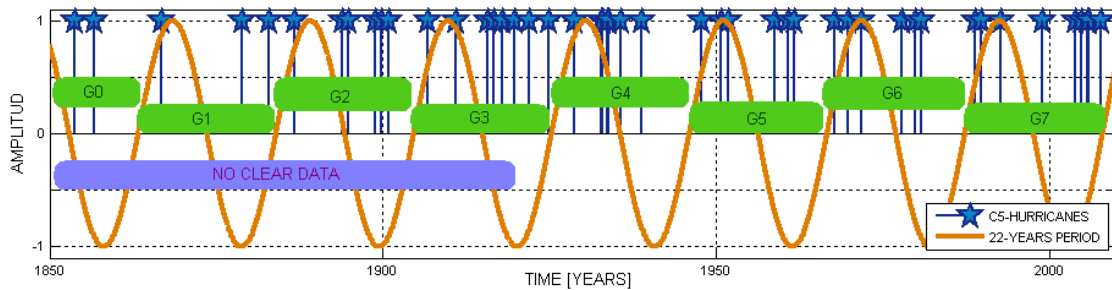


Figura 3.14 Clasificación del los huracanes de categoría cinco en el Atlántico de acuerdo con la periodicidad de 22 años.

Creamos las funciones de pertenencia para las periodicidades con mayor amplitud (mayor energía) en el espectro de frecuencia de la serie de SST en relación con los huracanes. Observamos que la amplitud de la periodicidad, así como su comportamiento (si es fase ascendente o descendente, o en la cresta o en el valle) durante la ocurrencia de los primeros eventos de grupo cumple con características similares que permiten estimar los intervalos de tiempo en que ocurren los eventos de manera retroactiva y pronósticos al futuro. Por ejemplo, los primeros eventos de todos los grupos se encuentran en la fase ascendente de la cresta de la periodicidad de 22 años de la serie la anomalía de temperatura del Atlántico (Figura 3.14 y panel superior de la Figura 3.15). Para otra periodicidad, por ejemplo el de 1 año los primeros eventos ocurren principalmente durante la fase descendente de un valle (panel inferior de la Figura 3.15). Reuniendo información del comportamiento de distintas periodicidades durante la ocurrencia de los primeros HC5 de cada grupo en el pasado, y haciendo la proyección a futuro del comportamiento de las periodicidades, proponemos que es posible pronosticar la ocurrencia de los primeros eventos.

En nuestro análisis, de forma similar al realizado para pronosticar GLE, las funciones de pertenencia fueron construidas con el producto de las ecuaciones de dos campanas gaussianas normalizadas (ecuación 3.1), cuya media y desviación estándar corresponden al promedio y desviación estándar que se obtienen con los datos de las amplitudes de las periodicidades y de su derivada durante la ocurrencia de los eventos de estudio. La Figura 3.15 muestra el ejemplo de las

funciones de pertenencia calculadas para los primeros eventos de grupo respecto al comportamiento de los periodos de 22 años y 1 año.

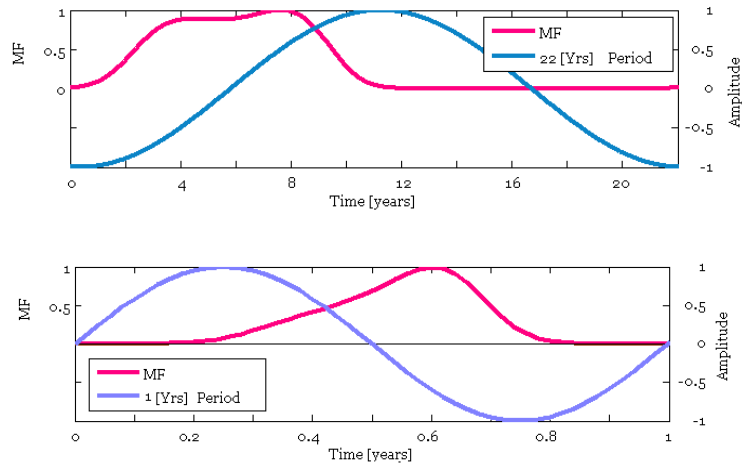


Figura 3.15 Funciones de pertenencia calculadas para los primeros eventos respecto a la periodicidad de 22 años (arriba) y respecto al de 1 año (abajo).

En la Figura 3.16 mostramos la reconstrucción de intervalos de ocurrencia para los primeros eventos de los grupos a partir de 1964 calculadas a partir de la intersección de las funciones de pertenencia de todas las periodicidades analizadas. Mostramos los posibles regiones donde, según el comportamiento cuasi-periódico, indica que pueden ocurrir los primeros eventos en el incipiente grupo 8 y el grado de pertenencia calculado. Los picos en las líneas anaranjadas en los paneles del grupo 1 al 7 indican las regiones reconstruidas donde han ocurrido los eventos. El panel del grupo 8 en la Figura 3.15 muestra los pronósticos para el grupo 8.

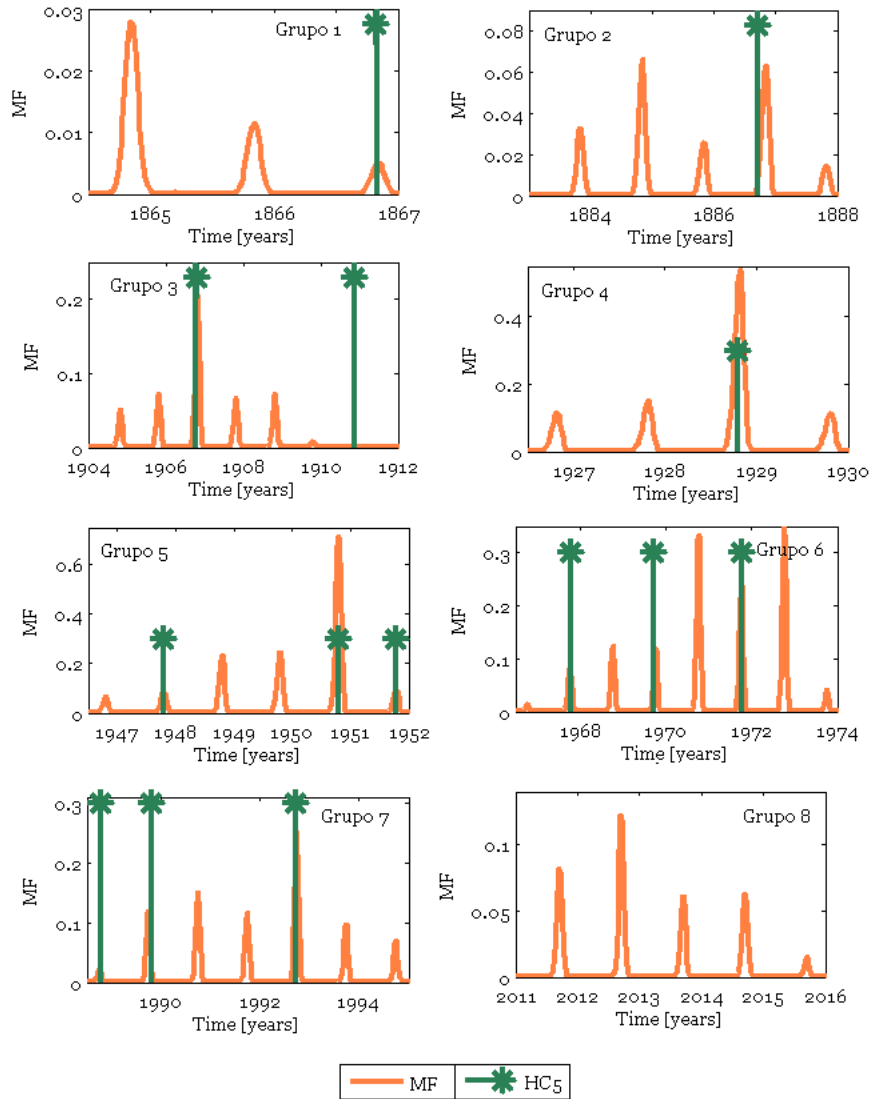


Figura 3.16 Reconstrucción y pronóstico de las funciones de pertenencia calculadas para primeros huracanes de los grupos 1 al 7 y pronósticos para el inicio del grupo 8.

3.3.3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La implementación del procedimiento PAELD para el pronóstico de huracanes de categoría 5 en el Atlántico asume también que la ocurrencia de estos eventos no es completamente aleatoria y que está controlada por fenómenos con comportamiento oscilatorio. Además, consideramos la serie de la anomalía de temperatura del Atlántico para nuestro estudio debido a que su comportamiento tiene una característica importante; la alta temperatura superficial del mar es

una condición necesaria para la formación y desarrollo de huracanes. En la Figura 3.17 mostramos el desempeño de PAELD durante el pronóstico de huracanes. Como observamos, este procedimiento tiene un buen desempeño en cuanto al número de huracanes pronosticados respecto al número de huracanes observados. Sin embargo, su desempeño es pobre en cuanto al número de huracanes observado contra el número de intervalos pronosticados.

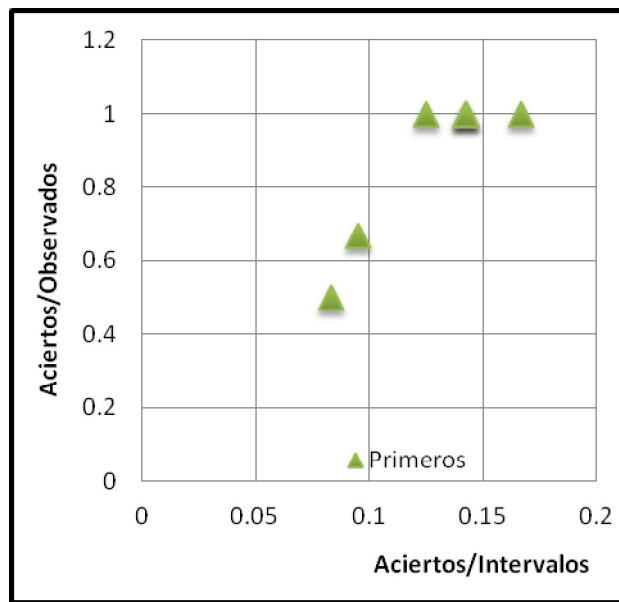


Figura 3.17 Resultados de la validación del procedimiento PAELD para el pronóstico de los HC5.

En la Tabla 3.8 mostramos los resultados de nuestros pronósticos para los HC5 en siguiente grupo. Como ya mencionamos antes es posible que en los intervalos que proponemos no ocurran HC5 pero, es posible que en un mismo intervalo ocurra más de un evento, aunque en el análisis de validación para huracanes encontramos que es común que pronostiquemos más intervalos que los huracanes que ocurrirán.

| POSSIBILITIES FOR THE HAS OF THE GROUP 8 | | |
|--|------------|------------|
| INTERVAL | LIMITS | |
| | START | END |
| 1 | 2011-08-16 | 2011-10-21 |
| 2 | 2012-08-08 | 2012-10-20 |
| 3 | 2013-08-15 | 2013-10-12 |
| 4 | 2014-08-15 | 2014-10-12 |
| 5 | 2015-08-22 | 2015-09-28 |

Tabla 3.8 Intervalos calculados para los primeros HC5 del grupo 8.

Con la proyección del comportamiento de las periodicidades en el futuro pronosticamos la ocurrencia del siguiente HC5 en el Atlántico. Esperamos que el inicio del grupo ocurra entre agosto y octubre de 2014 en el intervalo calculado con el tercer pico en importancia de pertenencia. Los intervalos con mayor pertenencia para los eventos ocurren las temporadas de 2011 y 2012 y el último intervalo señala la temporada de ciclones de 2015 pero con muy poca pertenencia (Figura 3.16).

Los resultados obtenidos coinciden con los obtenidos por Zapotitla (2013). Sin embargo encontramos aquí más intervalos en fechas que ya pasaron y en las que no ocurrieron eventos. A diferencia del método propuesto en trabajos previos, todas nuestras propuestas ocurren dentro de la temporada de huracanes del Atlántico. Además, con PAELD podemos señalar también temporadas de huracanes en las que no se esperan fenómenos de la más alta intensidad. Por ejemplo sabemos que desde el final del grupo pasado (Grupo 7) en 2007 hasta el inicio de este grupo no ocurrirían huracanes de categoría 5 hasta antes de 2011.

3.4. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

En la naturaleza existen diversos fenómenos que, por los efectos que producen, reciben gran importancia para su estudio. Sin embargo, su ocurrencia tiene una física compleja involucrada que es difícil de entender o que aun no se ha descubierto, por ello se asume que su ocurrencia es aleatoria, un ejemplo de dichos fenómenos son los HA5 y los GLE. Con nuestro análisis mostramos que es posible pronosticar este tipo de eventos realizando un estudio temporal de su ocurrencia y del comportamiento de series de tiempo que están relacionadas.

El estudio presentado en esta tesis utiliza sólo una serie de tiempo para describir el comportamiento de la ocurrencia de los fenómenos (rayos cósmicos para los GLE y SST para los Huracanes). Observamos que utilizando únicamente una serie podemos describir y pronosticar la ocurrencia de estos eventos con una buena certeza a pesar de que el número de datos o de eventos estudiados es pequeño. En consecuencia, podríamos pensar que utilizando diferentes series relacionadas de alguna manera con los fenómenos que intentamos pronosticar o que muestren buena correlación con los eventos de estudio, tendremos más información relacionada con su ocurrencia y con el comportamiento de su variación, y por ello podríamos pronosticarlos con mayor precisión y con la anticipación suficiente para emitir alertas y prevenir daños. Por ejemplo, utilizando el conteo de manchas solares y el índice de la corona, mas la serie de los rayos cósmicos para pronosticar GLE o la serie del AMO, el polvo africano, la cizalladura vertical del viento, actividad solar y el SST para pronosticar la temporada de huracanes.

Si contamos con información de diversas series de tiempo, podríamos adaptar el procedimiento para utilizar las series completas, y no únicamente las periodicidades con mayor contenido energético, para crear las funciones de pertenencia que permiten pronosticar intervalos de tiempo donde se cumplen características similares a las que se observaron en la ocurrencia de eventos previos, también creemos que al incluir más información para nuestro pronósticos mejorará el

desempeño del procedimiento sobretodo en cuanto al número de intervalos calculados, ya que como observamos en los análisis de validación, PAELD calcula más intervalos que en los que se observan eventos, y por esta razón algunos de los pronósticos se considerarían como falsas alertas.

Recientemente se han desarrollado y mejorado diferentes métodos para predecir matemáticamente el comportamiento de señales, por ejemplo, el método step-ahead forecaster que utiliza también lógica difusa (Mendel, 1995). Este método podría implementarse a las señales que estudiamos para realizar el pronóstico y predicción de eventos, lo cual se realizaría en forma similar a la observación de parámetros en tiempo real, con diferencia que permitiría emitir alertas con mayor anticipación.

ANEXO A. LÓGICA DIFUSA

Un sistema difuso combina el conocimiento objetivo, como los son las formulaciones matemáticas, con conocimiento subjetivo como expresiones lingüísticas, que difícilmente se pueden representar matemáticamente. Un ejemplo de conocimiento objetivo es la ecuación de transporte de partículas energéticas. En cambio, si expresamos que el flujo de partículas es “mucho mayor” que el normal, o que la periodicidades son de término “ultra corto, corto o medio” son ejemplos de conocimiento subjetivo. La lógica difusa combina la información objetiva y la subjetiva para resolver problemas reales.

El mapeo de un conjunto de datos o vectores a una o varias salidas escalares definen un sistema difuso. En una definición simple, un sistema difuso representa la relación entre un conjunto de datos de entrada y de salida. La ventaja de trabajar con sistemas difusos es que hay múltiples formas de definir dicha relación con base en conjuntos no precisos. Por ejemplo, si realizamos la correlación entre dos conjuntos de datos y obtenemos que el coeficiente de correlación es 0.2, cuando explicamos este resultado es común que digamos que los dos conjuntos de datos tienen correlación baja, entonces estamos haciendo difuso el número 0.2 incluyéndolo un conjunto difuso “baja correlación”.

La lógica difusa se basa en lo relativo de lo observado. Por ejemplo, se considera a una persona como alta si mide más de 1.83 [m], pero de igual forma se considera a una persona como alta si mide 1.82 [m], esta consideración no existe en la lógica tradicional que utiliza demarcaciones estrictas para determinar pertenencia en conjuntos (Figura A1):

Ejemplo: A es el conjunto clásico de personas altas $A = \{ x \mid x > 1.83 \}$

Entonces una persona que mide 1.82 [m] es baja.

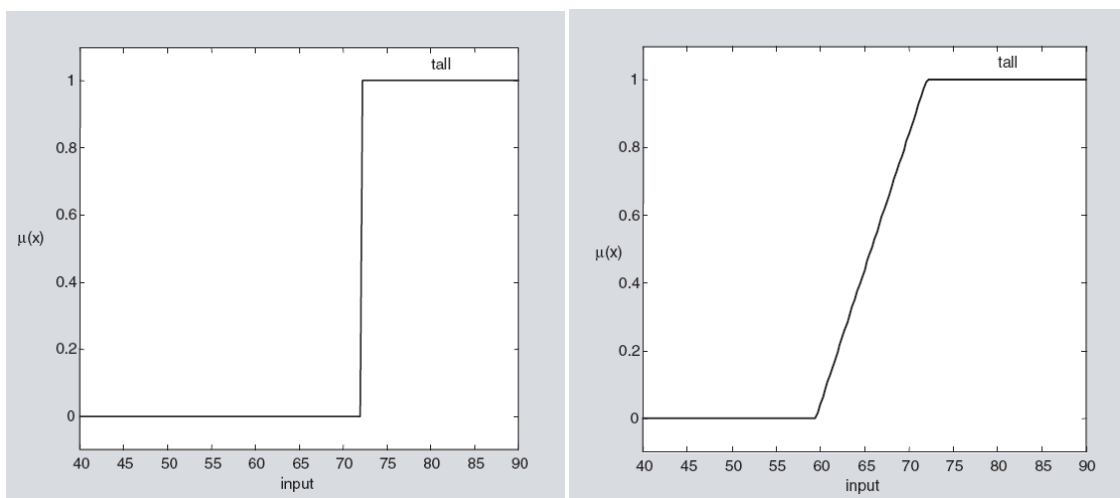


Figura A1. Comparación entre un Conjunto cerrado y un conjunto difuso.

Los sistemas difusos tienen cuatro componentes;

1) **Reglas.** Las reglas pueden ser propuestas por personas especialistas o alternativamente pueden extraerse de datos numéricos. Las reglas suelen expresarse como expresiones *si-entonces*, por ejemplo, "si U es muy caliente y V es muy bajo, entonces W es grande". Para plantear reglas es necesario entender la relación entre las variables lingüísticas (mucho, poco, corto, grande, etc) con valores numéricos que expresen cantidades o magnitudes y con ello cuantificar dichas variables lingüísticas, es decir, una cantidad asociada a un número finito de expresiones lingüísticas (30°C es frío, caliente o muy caliente). Debemos entender también la conexión lingüística entre variables (ejemplo "si", "o", etc.) y la implicaciones (si A entonces B).

2) **Selección difusa.** Agrupa conjuntos de datos numéricos como subconjuntos difusos asociados a variables lingüísticas. Esto es necesario para establecer reglas.

3) **Inferencia.** La inferencia en un sistema difuso mapea los conjuntos difusos a nuevos conjuntos difusos dependiendo de la definición de la reglas y de cómo son combinadas. Es decir, se relaciona con los procedimientos que seguimos los seres humanos para entender las cosas y tomar decisiones.

4) **Selección cerrada o defusificación.** Consiste en convertir un conjunto de salida en un solo valor numérico.

En la definición de los elementos de un sistema difuso se habla de conjuntos difusos. Un conjunto difuso F está definido en un universo de interés U y está caracterizado por una función de pertenencia $\mu_F(x)$ que toma valores en el intervalo $[0, 1]$. Realizando una analogía, la función de pertenencia de un conjunto ordinario tomaría dos valores, cero o uno por lo que un conjunto difuso es una generalización de un conjunto ordinario y la función de pertenencia es una medida del grado de similitud de un elemento en U al conjunto difuso, el cual se puede expresar como la lista de pares ordenados de todos sus elementos y su grado de pertenencia.

$$F = \{x, \mu_F(x) | x \in U\} \quad (A.1)$$

Las funciones de pertenencia están asociadas con las variables lingüísticas definidas por las reglas y con los antecedentes y resultados de la inferencia en los sistemas difusos. Las formas más comunes de funciones de pertenencia son triangulares, trapezoidales, lineales y gaussiana aunque es común que la forma de la función de pertenencia se elija con base en la experiencia del usuario, y por ello, las funciones de pertenencia de dos usuarios pueden ser diferentes dependiendo de su experiencia o perspectivas.

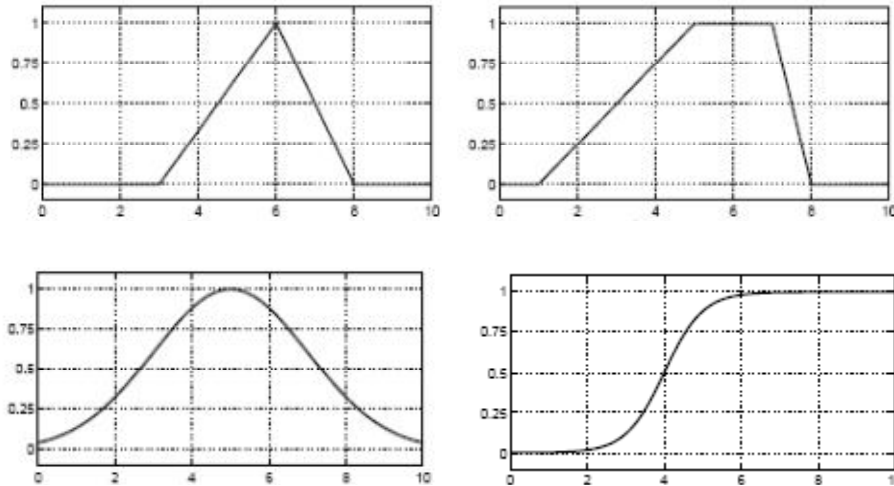


Figura A2. Ejemplos de funciones de pertenencia: triangular, trapezoidal, gaussiana y sigmoide.

De manera análoga a los conjuntos ordinarios, a los subconjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores o bien se puede realizar operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto se obtendrá otro conjunto, lo mismo sucede cuando se realiza una operación entre conjuntos. Las operaciones lógicas se utilizan en controladores y sistemas difusos y son necesarias en la evaluación del antecedente de reglas. Existen tres operaciones básicas que se realizan entre conjuntos, estas operaciones son complemento, *unión* e *intersección*. Si A y B son dos conjuntos difusos asociados a una variable lingüística x , las operaciones son

Complemento
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (A.2)$$

Unión (operador lógico "o")
$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (A.3)$$

Intersección (operador lógico "y")
$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (A.4)$$

En muchas aplicaciones de ingeniería tiene más sentido definir alternativamente la intersección como operador lógico "y" del producto

$$\mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad (A.5)$$

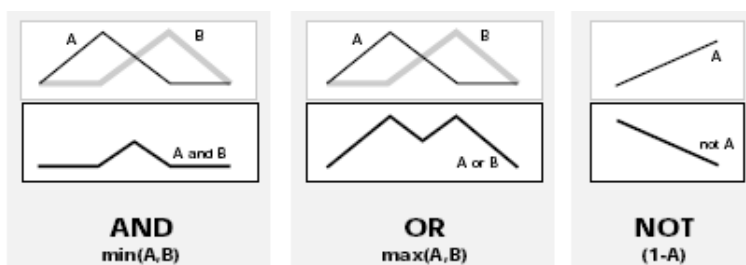


Figura A3. Representación gráfica de las operaciones lógicas entre conjuntos (Tomado de Jang, 1997).

Como ya mencionamos antes, una componente de los sistemas difusos es la selección difusa. Esta operación es la entrada a la componente de inferencia difusa. La selección difusa es un procedimiento matemático en el que se convierte un elemento del universo en un valor en cada función de membresía a las cuales pertenece, recordemos que un elemento del universo puede estar definido por una o más funciones de pertenencia en mayor o menor grado. La Figura A4 muestra un ejemplo de selección difusa de las alturas de dos personas respecto a la función de pertenencia "alto", en este caso una persona con altura 1.70 tiene una pertenencia de 0.3 y una persona de 1.9 tiene una pertenencia de 0.95 en el conjunto difuso representado por la variable alto.

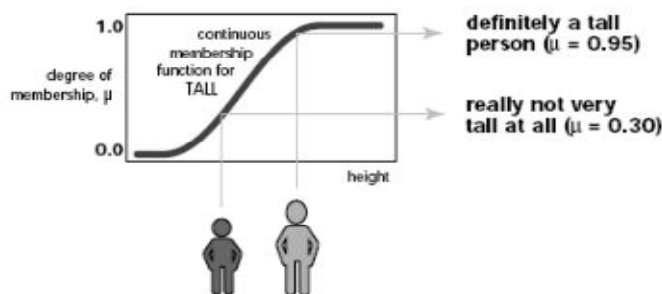


Figura A4. Representación gráfica del proceso de selección difusa (Tomado de Jang, 1997).

Los sistemas difusos utilizan reglas que combinan uno o más conjuntos difuso de entrada y le asocian un conjunto difuso de salida. Las reglas que involucran a conjuntos difusos se les llaman reglas difusas y son afirmaciones del tipo "si-entonces". Los conjuntos difusos de entrada se asocian mediante operaciones lógicas difusas "y", "o", etc.

Las reglas difusas son proposiciones que permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento de manera completa normalmente se expresan varias reglas que determina cual será el comportamiento del sistema difuso y es aquí donde se emula el conocimiento o experiencia del usuario y la correspondiente estrategia de inferencia. Existe una gran variedad de tipos de reglas, aunque

presentamos aquí los dos grupos utilizados, las reglas difusas de Mamdani y las reglas difusas de Takagi-Sugeno (TS).

Las reglas difusas de Mamdani tienen la siguiente estructura

Si x_1 es A y x_2 es B y x_3 es C entonces u_1 es D

Donde x_1 , x_2 y x_3 son las variables de entrada (por ejemplo, amplitud de la periodicidad, amplitud de la derivada, etc). A , B y C son funciones de membresía de entrada (por ejemplo ascendente, descendente, valle o cresta) y u_1 es la acción de control (por ejemplo, ocurre evento). En este punto las variables son lingüísticas, es decir, no toman valores numéricos pero tiene la ventaja de que son intuitivas y adaptan la inferencia al conocimiento y la experiencia.

Las reglas difusas de Takagi-Sugeno están estructuradas de la siguiente forma

Si x_1 es A y x_2 es B y x_3 es C entonces $u_1 = f(x_1, x_2, x_3)$

En principio es posible emplear $f(x)$ como funciones no lineales, pero la elección de tal función puede ser muy compleja, por lo tanto en general se emplean funciones lineales. La elección de las reglas difusas de TS tiene la ventaja de ser computacionalmente eficientes, son adaptables a las variables de entrada y la acción de salida es una función continua, además, está bien adaptado al análisis matemático.

Las *reglas difusas* representan el conocimiento y la estrategia de control del sistema, pero cuando se asigna información específica a las variables de entrada en el antecedente, la *inferencia difusa* es necesaria para calcular el resultado de las variables de salida del consecuente, este resultado es en términos difusos, es decir que se obtiene un conjunto difuso de salida de cada regla, que posteriormente junto con las demás salidas de reglas se obtendrá la salida del sistema. Existe una gran cantidad de métodos de *inferencia difusa*, pero el que genera mejores resultados en la aplicación de esta tesis es la inferencia del producto de Larsen (*Larsen product inference*):

$$\mu_A(x) \times \mu_B(x) \quad \forall x \quad (\text{A.6})$$

La definición de otros métodos de inferencia y detalles de su uso se discuten en Mendel (1995) y Ying (2000).

La *defusificación* es un proceso matemático usado para convertir un conjunto difuso en un número real. La salida del sistema de inferencia difusa es un conjunto difuso, pero el dato de salida del sistema debe, en general debe ser un número real y debe ser representativo de todo el conjunto obtenido, es por eso que existen diferentes métodos de defusificación y arrojan resultados distintos, el más común y ampliamente usado es el centroide, sin embargo existen otros como el centro de área o el criterio del máximo, como se discuten en Mendel (1995).

ANEXO B. ANÁLISIS DE FOURIER

La caracterización y el análisis de las señales, así como de los sistemas que las manipulan son de gran interés para las ciencias y en particular para la geofísica. El tratamiento de señales por medio del procesamiento digital es de gran importancia debido a la posibilidad de manejar señales de diversos orígenes y obtener como resultado, representaciones de los datos que facilitan la comprensión del fenómeno de estudio o de los sistemas que las producen.

En la actualidad, el procesamiento digital de señales ha tenido un desarrollo acelerado debido al avance en la tecnología de la computación, lo que ha permitido el manejo de un gran volumen de datos de una manera rápida y precisa. Sin embargo, los avances en la computación no han sido suficientes para las necesidades de cálculo y manejo de datos en algunas áreas. En geofísica, esto tiene particular importancia pues los volúmenes de datos que se manejan en general son muy grandes, por ejemplo, la exploración petrolera mediante técnicas sísmicas. Si a esto le sumamos los procesos y operaciones matemáticas que se aplican a los datos, resulta en un consumo impresionante de recursos computacionales que suelen ser caros e inaccesibles. En el caso de esta tesis, el volumen de datos que se maneja no es grande, pero es importante tener estas consideraciones pues si existen limitaciones como la rapidez de procesamiento.

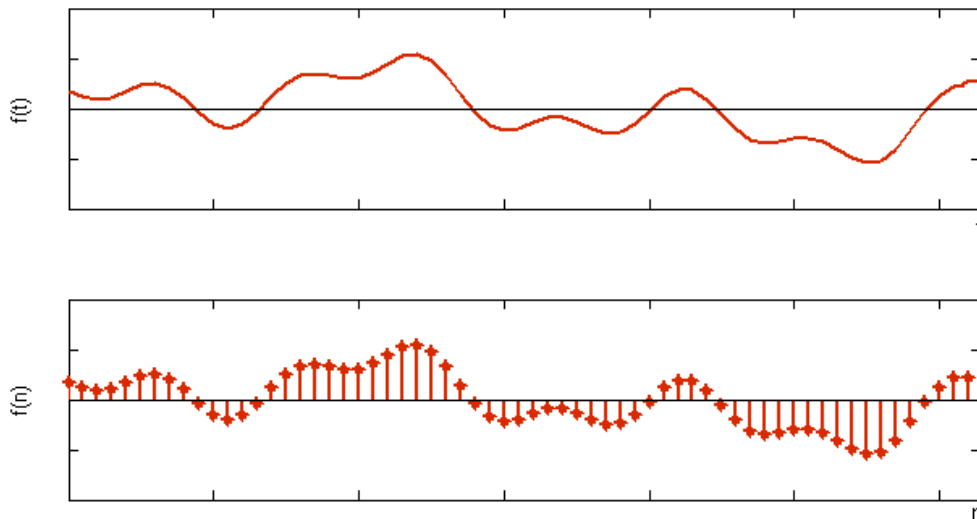


Figura B1. Comparación entre una señal analógica (arriba) y una señal digital (abajo)

SEÑALES

Una señal se puede definir como la variación en tiempo o espacio de alguna magnitud física o de algún otro tipo. En este sentido se puede interpretar que una señal tiene una representación matemática o modelo matemático, es decir, una función que depende de una o más variables (tiempo, distancia, etc.). De acuerdo con los valores que pueden tomar estas variables, las señales

se clasifican en dos grupos: señales continuas y señales discretas (Figura B1). Las señales continuas o analógicas son función de una o varias variables y están definidas en cualquier instante del dominio. Las señales discretas, son función de una o varias variables y están definidas únicamente en valores específicos de la variable independiente. Una señal discreta puede obtenerse por la digitalización de una señal analógica tomando muestras separadas (*sampling* en inglés). Algunas señales son discretas por naturaleza, por ejemplo las edades de una población.

SERIES DE FOURIER

A principios del siglo XIX el matemático francés Joseph Fourier estableció que cualquier señal periódica puede ser representada por una serie infinita ponderada de funciones periódicas elementales; senos, cosenos, o equivalentemente exponenciales complejas, relacionadas armónicamente. La frecuencia de las funciones elementales son múltiplos enteros (incluyendo el cero) de la frecuencia de la función periódica. La representación de la función $f(t)$ de periodo T se puede obtener mediante la siguiente fórmula:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \exp\left(\frac{i2\pi nt}{T}\right) \quad (\text{B.1})$$

Y los coeficientes de la serie se encuentran integrando sobre un periodo de la función, esto es,

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp\left(-\frac{i2\pi nx}{T}\right) \quad (\text{B.2})$$

Desarrollando la exponencial compleja en funciones seno y coseno podemos expresar,

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (\text{B.3})$$

Donde los coeficientes a_0 , a_n y b_n se calculan como:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt; \quad (\text{B.4})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt; \quad (\text{B.5})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt. \quad (\text{B.6})$$

La representación en series de Fourier de una función periódica es la suma de componentes sinusoidales que tienen diferentes frecuencias. La expresión (B.3) se conoce como forma real o trigonométrica de la serie de Fourier de la función f . El primer término de la serie comúnmente se conoce como la frecuencia fundamental o el periodo fundamental porque corresponde al periodo de observación de la función, es decir,

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 2\pi / T \quad (B.7)$$

Donde f_0 es la frecuencia fundamental. Los términos subsecuentes se conocen como n-ésimos periodos y están asociados a las frecuencias $\omega_n = n\omega_0$.

Si una función $f(t)$ es periódica, continua y suave por tramos, su serie de Fourier converge a $f(t)$ en t , y si la función es continua a trozos y posee un número finito de discontinuidades, la serie de Fourier converge a $\frac{1}{2}[f(t_0^-) + f(t_0^+)]$ en donde $f(t_0^-) = \lim_{t \rightarrow t_0^-} [f(t)]$ y $f(t_0^+) = \lim_{t \rightarrow t_0^+} [f(t)]$. Esta propiedad se conoce como el Teorema de Dirichlet.

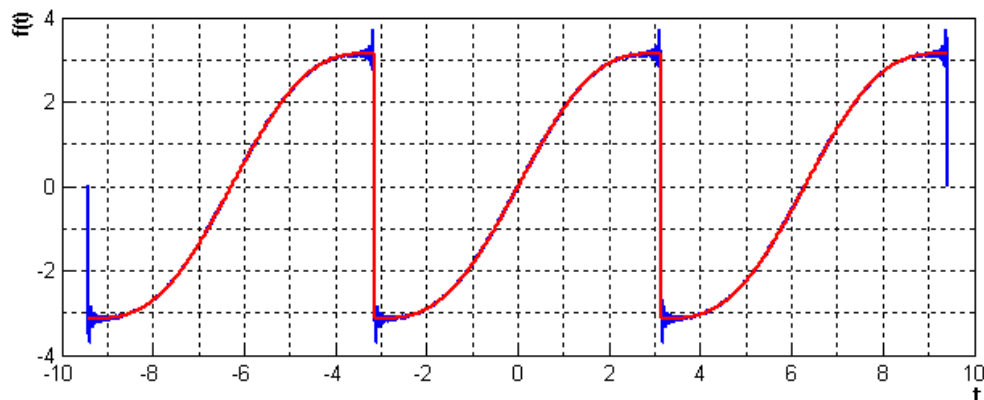


Figura B2. Efecto de Gibbs en las discontinuidades de la función $f(t)=t+\text{sen}(t)$ de periodo $T=2\pi$. En color rojo la función y en azul la aproximación con cien términos de la serie de Fourier. Cerca de las discontinuidades se observan las oscilaciones.

Cuando una función $f(t)$ tiene una discontinuidad en t_0 , en un gráfica de la sumatoria parcial de la serie se observa un comportamiento oscilante irregular, la Figura B2 muestra un ejemplo de este fenómeno. Gibbs probó que este comportamiento es un fenómeno matemático debido a la discontinuidad de la función y no se debe al truncamiento de la serie o errores en los aparatos de medición como se pensaba en el siglo diecinueve. El fenómeno es más evidente cuando se utilizan n términos de la sumatoria, aunque n sea un número muy grande. Debido a esta prueba, posteriormente se nombró efecto de Gibbs a este fenómeno.

TRANSFORMADA DE FOURIER

La transformada de Fourier puede obtenerse como el caso de la serie de Fourier cuando el periodo de la función tiende a infinito, y la frecuencia fundamental tiende a cero. Esto es $T \rightarrow \infty$, $2\pi n/T \rightarrow \omega$ y $2\pi/T \rightarrow d\omega$, entonces el coeficiente puede representarse como $c_n \rightarrow F(\omega)d\omega$ donde $F(\omega)$ es una función continua en las frecuencias y las sumatorias se vuelven integrales. La transformada de Fourier de una función $f(t)$ en el espacio de una dimensión en los reales se define como:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (\text{B.8})$$

Y la transformación inversa,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (\text{B.9})$$

Aquí $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$. $F(\omega)$ es una función continua y delimitada, es decir, $|F(\omega)| \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt$ y $\lim_{\omega \rightarrow \pm\infty} [F(\omega)] = 0$. Al ser una función compleja se tiene que $F(\omega) = R(\omega) + iX(\omega)$ donde $R(\omega)$ y $X(\omega)$ representan las partes real e imaginaria respectivamente. Entonces

$$F(\omega) = |F(\omega)|e^{i\phi(\omega)} \quad (\text{B.10})$$

$|F(\omega)|$ es el espectro de amplitudes y $\phi(\omega)$ el espectro de fase de $f(t)$. Tal que

$$|F(\omega)| = [R^2(\omega) + X^2(\omega)]^{1/2} \quad (\text{B.11})$$

$$\phi(\omega) = \arctan \left[-\frac{X(\omega)}{R(\omega)} \right] \quad (\text{B.12})$$

PROPIEDADES DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER

La transformada de Fourier es una función continua y compleja que tiene diversas propiedades. En esta sección mencionamos algunas de las propiedades de la transformada de Fourier que son útiles, por ejemplo, cuando se resuelven ecuaciones diferenciales o en el procesamiento de señales cuando se trata de la versión discreta (Anders, 2003). Si $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$, definimos $f(t) \leftrightarrow F(\omega)$ como un par transformado, esto es, una representación de las ecuaciones (B.8) y (B.9).

Linealidad. Si La transformación de Fourier es una transformación lineal de funciones en un espacio real a un espacio complejo. Si $F(\omega)$ y $G(\omega)$ son las transformadas de Fourier de las funciones $f(t)$ y $g(t)$ respectivamente, y α es escalar complejo. La linealidad significa que

$$\alpha [f(t) + g(t)] \leftrightarrow \alpha F(\omega) + \alpha G(\omega) \quad (\text{B.13})$$

Desplazamiento. Si $f(t)$ es real y α es un número real. Entonces $f(t - \alpha)$ y $e^{i\alpha t} f(t)$ también pertenecen a los reales y

$$f(t - \alpha) \leftrightarrow e^{-i\omega\alpha} F(\omega), \quad (\text{B.14})$$

$$e^{i\alpha t} f(t) \leftrightarrow F(\omega - \alpha) \quad (\text{B.15})$$

El desplazamiento de una función por un factor α equivale al producto por un factor de fase en el dominio de Fourier. En cambio, un desplazamiento en el dominio de Fourier equivale a una modulación por una exponencial compleja de la función en el dominio real.

Derivación. Si $f(t)$ es una función derivable entonces

$$\frac{d^n f(t)}{dt^n} \leftrightarrow (i\omega)^n F(\omega), \quad (\text{B.16})$$

Y si $F(\omega)$ es una función derivable

$$\frac{d^n F(\omega)}{d\omega^n} \leftrightarrow (it)^n f(t) \quad (\text{B.17})$$

La transformada de Fourier convierte la derivación en una operación algebraica.

Escalamiento. Si $F(\omega)$ es la transformada de Fourier de $f(t)$ y α es un número real

$$f(\alpha t) \leftrightarrow \frac{1}{|\alpha|} F\left(\frac{\omega}{\alpha}\right) \quad (\text{B.18})$$

Convolución. La convolución de dos funciones $f(t)$ y $g(t)$ expresada como $f(t) * g(t)$ se define como

$$f(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t - \tau) d\tau \quad (\text{B.19})$$

La convolución como operación tiene tres propiedades: Es conmutativa, esto es,

$$f(t) * g(t) = g(t) * f(t) \quad (\text{B.20})$$

Asociativa,

$$[f(t) * g(t)] * h(t) = g(t) * [f(t) * h(t)] \quad (\text{B.21})$$

Y distributiva sobre la suma,

$$[f(t) + g(t)] * h(t) = f(t) * h(t) + g(t) * h(t) \quad (\text{B.22})$$

Si $F(\omega)$ y $G(\omega)$ son las transformadas de Fourier de las funciones $f(t)$ y $g(t)$ respectivamente, la convolución en el dominio de Fourier es

$$f(t) * g(t) \leftrightarrow F(\omega)G(\omega) \quad (\text{B.23})$$

La convolución en tiempo de dos funciones equivale a una multiplicación de sus transformadas.

Correlación. La correlación de dos funciones $f(t)$ y $g(t)$ expresada como $f(t) \times g(t)$ se define como

$$f(t) \times g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) g(t + \tau) d\tau \quad (\text{B.24})$$

Si la correlación se calcula entre la misma función es la autocorrelación

$$f(t) \times f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) f(t + \tau) d\tau \quad (\text{B.25})$$

Si $F(\omega)$ y $G(\omega)$ son las transformadas de Fourier de las funciones $f(t)$ y $g(t)$ respectivamente, la correlación en el dominio de Fourier equivale a

$$f(t) \times g(t) \leftrightarrow F(\omega)G^*(\omega) \quad (\text{B.26})$$

Dónde * denota el complejo conjugado.

FÓRMULA DE PARSEVAL

Rayleigh en 1889 estableció que la integral del módulo al cuadrado de una función es igual a la integral del módulo al cuadrado de su espectro.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega \quad (\text{B.27})$$

Esta expresión corresponde al teorema de Parseval para las series de Fourier, que expresa la cantidad de energía en un sistema con base en los coeficientes,

$$\sum_{-\infty}^{\infty} |c_n|^2 = \frac{1}{2T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (\text{B.28})$$

Donde

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \exp\left(-\frac{i2\pi nx}{T}\right) dt \quad (\text{B.29})$$

En ambos lados de la ecuación (B.27) las integrales representan la energía o potencia de la función. El teorema de Rayleigh es válido si alguna de las integrales existe, automáticamente la otra integral convergerá.

TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA

El equivalente a la transformada de Fourier para señales continuas es la transformada de Fourier discreta (TFD) suponiendo que la función ha sido digitalizada desde menos infinito hasta el infinito. Recientemente, debido al desarrollo de la computación para manejar grandes cantidades de datos y realizar operaciones matemáticas con mayor precisión y en menor tiempo, la transformada discreta de Fourier ha tenido gran importancia en el tratamiento de datos numéricos.

La definición de la TFD para una señal $f(n)$ de N valores es:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} ; 0 \leq k \leq N \quad (\text{B.30})$$

La transformada inversa discreta:

$$f(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{-i2\pi kn}{N}} \quad (\text{B.31})$$

Una de las limitantes de la transformada de Fourier es que debe trabajar con señales estacionarias, es decir, la señal no debe cambiar a través del tiempo, otra limitante de la transformada de Fourier es que sólo proporciona el contenido espectral de la señal y no la localización temporal de las componentes espectrales (Figura D5, D6 y D7).

ANEXO C. TEORÍA DEL MUESTREO

Matemáticamente, el muestreo de una función continua $f(t)$ se puede representar como el producto de la función por un tren de impulsos $\delta(t - m\Delta t)$,

$$f_D(t) = \sum_{m=-N}^N f(t)\delta(t - m\Delta t) = f(t) \sum_{m=-N}^N \delta(t - m\Delta t) = f(t)k_{N,\Delta t}(t) \quad (C.1)$$

Donde $k_{N,\Delta t}(t)$ es la serie de impulsos o función de muestreo, el número de muestras en la secuencia es $2N + 1$ y Δt es el intervalo de muestreo.

En el dominio de Fourier, la transformada de $f_D(t)$ puede representarse por la convolución de las transformada de Fourier de $f(t)$ con la transformada de $k_{N,\Delta t}(t)$,

$$F_D(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) K_{N,\Delta t}(\omega - \tau) d\tau \quad (C.2)$$

Pero la transformada de Fourier de la función de muestreo, o tren de impulsos es

$$K_{N,\Delta t}(\omega) = \sum_{m=-N}^N e^{-i\omega m\Delta t} \quad (C.3)$$

Y después de algunas operaciones algebraicas se puede escribir como

$$K_{N,\Delta t}(\omega) = \frac{\sin \omega\Delta t \left(N + \frac{1}{2} \right)}{\sin \frac{1}{2} \omega\Delta t} \quad (C.4)$$

La ecuación (C.4) muestra que la transformada de Fourier de la función de muestreo es periódica y se repite en intervalos de $\frac{2\pi}{\Delta t}$. Se puede demostrar que cuando N es muy grande, la función de muestreo se aproxima a una serie de impulsos infinita espaciada en el eje ω a intervalos de $\frac{2\pi}{\Delta t}$, es decir, una serie infinita de impulsos separados Δt , en el dominio de Fourier es un conjunto infinito de impulsos separados a $\frac{2\pi}{\Delta t}$.

Suponiendo que deseamos muestrear una función infinita $f(t)$, y considerando N el número de muestras infinito. La transformada de Fourier de esta serie infinita es

$$F_D(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{j=-\infty}^{\infty} F\left(\omega - \frac{2\pi j}{\Delta t}\right) \quad (C.5)$$

Lo ideal sería que la transformada de Fourier de la función muestreada fuera igual a la transformada de la función original en cualquier frecuencia, $\Delta t F_D(\omega_0) = F(\omega_0)$, pero de la ecuación (C.6) se observa que la transformada de Fourier de la función muestreada en cada valor de ω_0 , es igual a la transformada de Fourier de la señal continua más un número infinito de valores de $F(\omega)$, este fenómeno se le conoce como aliasing,

$$F_D(\omega) = \frac{1}{\Delta t} \left[\dots + F\left(\omega_0 + \frac{2\pi}{\Delta t}\right) + F(\omega_0) + F\left(\omega_0 - \frac{2\pi}{\Delta t}\right) + \dots \right] \quad (C.6)$$

La naturaleza periódica de $F_D(\omega_0)$ produce la contaminación en cada valor de ω_0 .

El espectro de amplitud (ecuación B.11) de muchos fenómenos físicos, incluyendo los rayos cósmicos (Figura 4.2), decrece rápidamente conforme incrementa la frecuencia ω . Entonces, si una función está muestreada correctamente, las frecuencias pequeñas son una buena aproximación de la función. Al contrario, el aliasing es más severo en números de onda cercanos a $\omega = \frac{\pi}{\Delta t}$, esta es la frecuencia de Nyquist. Una forma de reducir el aliasing es incrementando la frecuencia de Nyquist, es decir, reduciendo el tamaño del intervalo de muestreo. La frecuencia de Nyquist corresponde al periodo de dos veces el intervalo de muestreo. No podemos encontrar información en periodos menores a este límite.

ANEXO D. TRANSFORMADA ONDÍCULA

El análisis común de Fourier descompone una señal en las componentes de frecuencias y determina la potencia relativa de cada una, es decir, descompone una señal en una serie de funciones senoidales de amplitud constante en cada frecuencia y con duración infinita. Esta transformación no brinda información acerca de cuándo la señal exhibe una característica particular y por lo tanto en aquellos casos donde la señal no es estacionaria se pierde información valiosa al ignorar las anomalías locales. El objetivo del análisis espectral con ondículas (wavelets en inglés) de una señal, es utilizar una transformación que represente la señal en el dominio de las frecuencias y en el dominio del tiempo simultáneamente. La diferencia principal entre la transformada de Fourier y la transformada ondícula es que esta última descompone la señal en pequeñas ondas u ondículas localizadas en tiempo y que decrecen a cero después de unas cuantas oscilaciones. La transformada ondícula de una señal cambiante en el tiempo depende de dos variables: la escala o frecuencia y el tiempo (Daubechies, 1992), (Torrence, 1998).

Las ondículas tienen aplicaciones en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería, y con distintos objetivos, por ejemplo, en compresión de datos, filtrado de ruido, reconocimiento de patrones, optimización computacional, etc. (Pathak, 1999), pero el campo donde ha tenido más impacto es en el procesamiento digital de señales, el procesamiento de imágenes y en comunicaciones (Montejo, 2006) En geofísica en uso de la transformada ondícula surgió con el trabajo de dos científicos franceses; J. Morlet y A. Grossman (Grossman y Morlet, 1974). Años después Daubechies y Mallat (Mallat, 1999) establecieron la conexión matemática entre las ondículas y el procesamiento digital de señales.

El análisis con ondículas es una herramienta matemática para el análisis de series de tiempo con potencia no estacionaria en distintas frecuencias, que descompone una señal temporal en suma de diferentes señales temporales denominadas funciones ondículas hijas cuya principal característica es que decaen rápidamente a cero. Cada una de estas funciones tiene diferentes escalas en diferentes niveles de resolución obtenidos mediante escalado y dilatación de una determinada función matemática temporal denominada función ondícula madre. Estas funciones pueden ser reales o complejas. Esto permite el análisis de la señal con diferentes niveles de detalle, es decir, análisis multirresolución.

TRANSFORMADA ONDÍCULA CONTINUA (TOC)

La transformada ondícula constituye una herramienta importante en el análisis sobre el comportamiento local en frecuencias de una señal. Esta transformada utiliza una función ventana que encuadra una señal dentro de un intervalo y enfoca el análisis sólo en ese segmento de la señal.

La transformada continua de ondícula expresa una señal $f(t)$ mediante una expansión de términos o coeficientes proporcionales al producto interno entre la señal y diferentes versiones

escaladas y trasladadas de la función prototipo $\Psi(t)$ conocida como ondícula madre. La transformada wavelet continua se define como

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi_{a,b}(t) dt \quad (D.1)$$

La variable a controla el ancho o soporte efectivo de la función madre $\Psi(t)$, es decir, si interesa ampliar o reducir el intervalo de tiempo en que la función tiene valores no nulo significativos, se puede trasladar y escalar la ondícula básica $\Psi(t)$ a través de un factor a , y la variable b nos da la ubicación en el dominio del tiempo de $\Psi(t)$. Las variables $a \neq 0$ y b son los parámetros de escala y de traslación respectivamente.

La transformación asume que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0 \quad (D.2)$$

Donde $\Psi(t)$ representa la ondícula. Esta condición implica que $\Psi(t)$ tiende a cero en $-\infty$ y en $+\infty$. De la ecuación (D.1) podemos inferir que la transformada ondícula es una transformación bidimensional de una señal definida en tiempo. Los dos dominios de la transformación son el tiempo b y la escala a . El resultado de la transformación es la descomposición de la función definida en el tiempo en una serie de coeficientes $C(a,b)$ reales o complejos que depende de la elección de la ondícula madre.

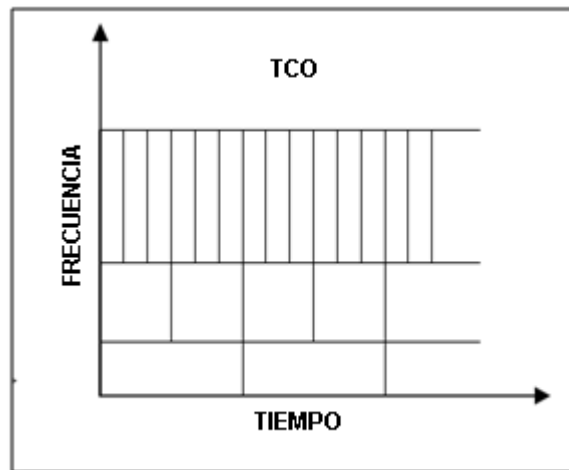


Figura D1. Plano tiempo-frecuencia para la transformada de ondícula (Modificada de Liang, 2007).

La transformada wavelet permite la representación de la señal $f(t)$ en el plano tiempo-frecuencia. La variable escala lleva en si la información de la dilatación y la contracción de la señal, otra forma de analizarlo es considerando que lo que cambia es la frecuencia y con ello al dilatarse

la ondícula, la frecuencia se reduce y al contraerse la frecuencia aumenta. De esta manera se pueden obtener la información de la señal y conocer sus componentes de frecuencia a partir de las características de las ondículas. En el dominio del tiempo el análisis es más sencillo, ya que la variable de traslación indica en qué lugar del eje del tiempo se encuentra la ondícula.

Cuando la variable de dilatación a cambia, tanto la duración como el ancho de banda de la ondícula $\Psi(t)$ también cambian, pero su forma se mantiene igual. En el dominio del tiempo el análisis es sencillo ya que la variable de traslación tiene la información de tiempo, e indica en qué lugar del eje del tiempo se encuentra la ondícula. En la figura 3.3 se muestran las características de la TOC, al movernos en diferentes escalas, tendremos un recubrimiento diferente del tiempo. La TOC ocupa ventanas de corta duración para altas frecuencias y ventanas de larga duración para bajas frecuencias y según los valores b la función se traslada sobre el eje del tiempo.

La ondícula de Haar se define como

$$\Psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < 1/2 \\ -1, & 1/2 \leq t < 1 \\ 0, & \text{otro} \end{cases} \quad (D.3)$$

Esta ondícula está localizada en tiempo, es decir, tiende a cero fuera de un intervalo finito, pero no es continua. Su transformada de Fourier es

$$\hat{\Psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} \Psi(t) dt ;$$

$$\hat{\Psi}(\omega) = ie^{-i\omega/2} \frac{\text{sen}^2 \omega/4}{\omega/4} \quad (D.4)$$

Podemos observar que

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (D.5)$$

La ecuación (D.5) representa la condición de admisibilidad para una ondícula. La existencia de la integral en la ecuación implica que $\hat{\Psi}(0) = 0$ y a su vez

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) dt = 0$$

Entonces $\Psi(t)$ cambia de signo y es una ondícula. Sin embargo, en la ecuación (D.4) observamos que la ondícula de Haar no está bien localizada en frecuencia, pero que si tiende a cero con

$|\omega| \rightarrow \infty$. Las funciones $\Psi(t)$ que cumplen con condición de admisibilidad (D.5), son conocidas como ondículas madres.

Una de las ondículas más utilizada es la denominada Morlet, se define como una onda senoidal compleja modulada por una envolvente gaussiana. Su expresión es:

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-i2\omega_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (D.6)$$

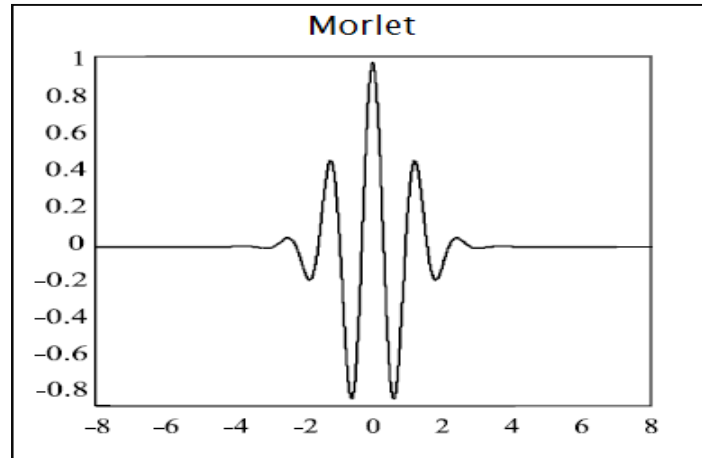


Figura D2. Ondícula de Morlet.

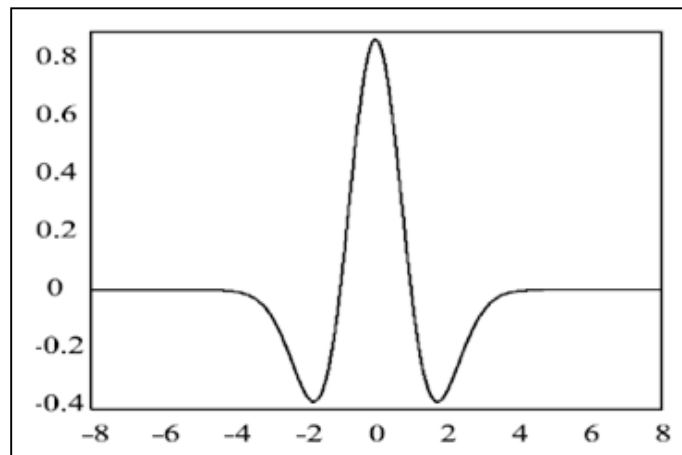


Figura D3. Ondícula Sombrero Mexicano.

La ondícula sombrero mexicano es también una de las ondículas más populares por tener buena localización en tiempo y en frecuencia y matemáticamente es la segunda derivada de una campana gaussiana,

$$\Psi(t) = (1-t^2)e^{-t^2/2} \quad (D.7)$$

Y su transformada de Fourier

$$\hat{\Psi}(\omega) = \sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\omega^2/2} \quad (D.8)$$

Así como en la transformada de Fourier, la señal original $f(t)$ se puede recuperar con la transformada inversa, aquí $f(t)$ se puede recomponer con la llamada fórmula de reconstrucción

$$f(t) = \frac{1}{K_\Psi} \int_{a=0}^{\infty} \int_{b=-\infty}^{\infty} C(a,b) \Psi_{a,b}(t) db \frac{da}{a^2} \quad (D.9)$$

La ecuación (D.9) se conoce como la transformada ondícula inversa. La constante K_Ψ depende de la ondícula madre seleccionada.

En aplicaciones prácticas de ingeniería es común que se trabaje con frecuencias en lugar de escalas. La escala a se relaciona con la frecuencia. Se puede demostrar que a es inversamente proporcional a la frecuencia y el factor de proporcionalidad depende de la ondícula usada (Montejo, 2007). Por ejemplo, en el caso de la ondícula de Morlet la relación entre la frecuencia y el periodo están dadas por

$$\omega_j = \frac{\omega_0}{a_j} \quad (D.10)$$

Evidentemente en el caso de la transformada ondícula, a diferencia de la transformada de Fourier, hay más de una función de transformación. La elección de la función ondícula madre depende de la aplicación o el objetivo que se persiga.

TRANSFORMADA DISCRETA DE ONDÍCULA

El diseño de una versión discreta de la Transformada Wavelet, esencialmente consiste en definir una apropiada malla discreta de parámetros (a_j, b_{jk}) de escalas y traslaciones de modo que la familia de ondículas $\Psi_{a_j, b_{jk}}$ se pueda generar.

Los parámetros de escala y traslación discretos se pueden definir como:

$$a_j = a_0^j; \quad b_{jk} = kb_0 a_0^j \quad (D.11)$$

Donde j y k son números enteros y a_0 es un paso fijo de dilatación.

Bajo estos parámetros tenemos entonces la expresión para ondículas discretas:

$$\Psi_{a,b}(n) = a_0^{-i} \Psi(a_0^i n - kb_0) \quad (D.12)$$

Asumiendo la ondícula madre real y una señal $f(t)$ de energía finita, la transformada discreta asociada se define como:

$$\Psi(j,k) = \sum_k f(k) \Psi_{j,k}(k-n) \quad (D.13)$$

A partir de las mismas consideraciones que en el caso continuo, para el análisis multirresolución vemos ahora que las ondículas $\Psi_{j,k}(n)$ están localizadas en el intervalo temporal centrado en $(n+k)a_0^j$, de longitud $a_0^j \Delta t$ y en la banda de frecuencias $a_0^j \omega_1 \leq |\omega| \leq a_0^j \omega_2$ de ancho $a_0^j \Delta \omega$, esta banda representa una partición en niveles del dominio de las frecuencias.

Para realizar un análisis multirresolución debemos hacer pasar la señal por una serie de filtros, descomponiendo la señal, obteniendo bandas de frecuencias de la señal, con esto podremos realizar el análisis con diferentes niveles de detalle, este proceso se denomina descomposición. Para obtener esas bandas de frecuencias, la señal temporal pasa por una serie de filtros pasa bajas (PB) y pasa altas (PA) para descomponerla, de forma que se obtiene en el dominio del tiempo dos series de muestras que corresponden a las dos bandas de frecuencias. A la salida del filtro PB tenemos una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro se encuentra entre 0 Hz y la mitad de las frecuencias del espectro de la señal analizada. De manera similar, la salida del filtro PA es una señal en el dominio del tiempo cuyo espectro corresponde a frecuencias entre la mitad del espectro y la frecuencia máxima de la señal (Torrence, 1998).

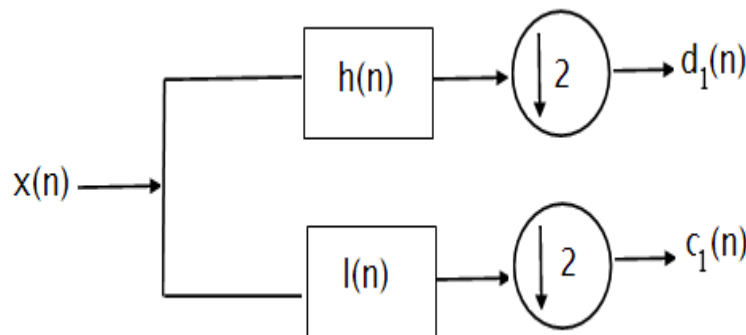


Figura D4. Descomposición simple

La señal resultante del filtro pasa altas puede ser de nuevo descompuesta en el siguiente nivel de descomposición. De este modo obtenemos lo que se denomina árbol simple de descomposición wavelet. Aplicando sucesivamente la descomposición simple a la señal resultante del filtro pasa altas, se pueden diferenciar características de alta frecuencia en la señal, es decir variaciones de mayor frecuencia de entre otras con frecuencia más baja. De esta manera se consigue

descomponer la señal en bandas homogéneas. La señal descompuesta de salida de todos los filtros de todos filtros intermedios se denomina paquete de transformada wavelet.

TRANSFORMADA CRUZADA DE ONDÍCULA

La Transformada Cruzada de Ondícula está definida de acuerdo a Grinsted et al. (2004). Dadas dos series de tiempo x_n e y_n , con sus respectivas transformadas de ondícula, $\Psi^x(j, k)$ y $\Psi^y(j, k)$, podemos definir el Espectro de Ondícula Cruzada como:

$$\Psi^{xy}(j, k) = \Psi^x(j, k)\Psi^{y*}(j, k) \quad (D.14)$$

Donde $*$ denota la conjugación compleja de $\Psi^y(j, k)$, y se define la energía como $|\Psi^{xy}(j, k)|$. El argumento complejo $\text{Im}[\Psi^{xy}(j, k)]$, puede ser interpretado como la fase relativa local entre x_n y y_n en el espacio tiempo-frecuencia. El nivel de significancia para el espectro de potencia de la ondícula se calcula con el método de Monte Carlo. La distribución teórica de la potencia de la transformada cruzada de ondícula de las dos series de tiempo con energía espectral P_k^x y P_k^y está representada como:

$$D\left(\frac{|\Psi^x(j, k)\Psi^{y*}(j, k)|}{\sigma_x\sigma_y} < p\right) = \frac{Z_\nu(p)}{\nu} \sqrt{P_k^x P_k^y} \quad (D.15)$$

Donde $Z_\nu(p)$ es el nivel de confianza asociado a la probabilidad p en una función de distribución de probabilidad definida por la raíz cuadrada del producto de dos distribuciones X^2 , ν vale 1 para ondículas reales y 2 para ondículas complejas, σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de la señal x y y respectivamente.

La transformada cruzada de ondícula de dos series de tiempo representa la covarianza de estas señales. Por lo tanto el espectro de potencia de la transformada cruzada de ondícula nos da información sobre el grado de relación energético entre las señales.

COHERENCIA CON LA TRANSFORMADA ONDÍCULA

La Transformada de Ondícula de Coherencia (TOC) puede ser definida como el coeficiente de correlación en el espacio tiempo-frecuencia de dos series de tiempo (Grinsted, 2004):

$$R^2(j, k) = \frac{\left|S\left((a_0^j)^{-1}\Psi^{xy}(j, k)\right)\right|^2}{S\left((a_0^j)^{-1}|\Psi^x(j, k)|\right) \cdot S\left((a_0^j)^{-1}|\Psi^y(j, k)|\right)} \quad (D.16)$$

Donde S es un operador de suavizado sobre el factor de escala y sobre el tiempo.

La diferencia de fase es útil para indicar si la correlación entre ambas series de tiempo x_n y y_n está en fase o si la correlación es compleja. La fase de ambas señales varía en función a la frecuencia. La fase de una serie de tiempo Φ_x , se relaciona con la fase de la otra serie de tiempo Φ_y , y se calcula la diferencia de fase entre ambas Φ_{xy} . La diferencia de fase es definida como:

$$\Phi_{xy} = \arctan \left(\frac{\operatorname{Re}[\Psi^{xy}(j, k)]}{\operatorname{Im}[\Psi^{xy}(j, k)]} \right) \quad (\text{D.17})$$

CONO DE INFLUENCIA

La relación señal/ruido se define como la relación que hay entre la intensidad o potencia de la señal y la intensidad o potencia del ruido que la afecta. Dependiendo de la ondícula que se utilice, la transformada ondícula puede tener una parte real y una imaginaria, de forma similar a la transformada de Fourier, por esta razón podemos definir una amplitud y una fase. La potencia se define como el modulo al cuadrado de la transformada;

$$P = |W_f(a, b)|^2 \quad (\text{D.18})$$

El espectro global de la transformada ondícula es el promedio en cada nivel de resolución y se compara con el espectro teórico del ruido rojo por ajustarse al perfil de frecuencia de la señal (Zapotitla, 2011), es decir, su espectro de amplitud decae con el aumento de la frecuencia (Torrence y Compo, 1998).

El cono de influencia permite limitar los efectos de borde. Estos efectos son originados en la parte inicial y al final de cada serie de tiempo debido a que la señal que estamos analizando es finita. De la misma forma en la transformada de Fourier estos efectos de borde surgen de la consideración de que la señal es periódica, y por lo tanto la información cerca de los bordes no es confiable para la interpretación y análisis. Si asumimos que la serie de tiempo tiene un espectro de potencia promedio, un valor de potencia que se encuentre por encima del espectro de potencia del ruido rojo de Fourier se asume como una característica real de la señal y tendrá un cierto nivel de significancia. El cono de influencia nos permitirá obtener un nivel de confianza del 95% en los datos analizados dentro del espectro global de la transformada.

ANÁLISIS TIEMPO-FRECUENCIA

La transformada de Fourier es una herramienta muy valiosa para el procesamiento y análisis de señales digitales. Sin embargo presenta desventajas, respecto a la transformada ondícula, en algunas aplicaciones, en especial en aquellas que tratan con el análisis de señales no estacionarias. Cuando se pasa al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier, la información

local de lo que ocurre en el tiempo se pierde. Cuando se observa un espectro de amplitudes de Fourier es fácil distinguir el contenido de frecuencias de la señal que se está analizando. Sin embargo, no es posible identificar en qué tiempo aparecen o desaparecen las componentes o secciones locales de la señal que tienen las frecuencias que aparecen en el espectro de Fourier. Si las propiedades de la señal no tienen variaciones importantes en el tiempo, como en el caso de una señal estacionaria, el problema de identificar las frecuencias no es tan grave. El problema al que nos enfrentamos es que una gran cantidad de las señales de interés en ingeniería geofísica, presentan características no estacionarias, las cuales son generalmente la parte más importante de la señal y la transformada de Fourier no puede detectarlas. De ahí la necesidad de un análisis en ambos dominios, el tiempo y la frecuencia. Un análisis en el tiempo y la frecuencia puede dar valiosa información sobre la evolución del contenido de frecuencia de una señal en el tiempo. Si bien no es la única herramienta para realizar este tipo de análisis, la transformada ondícula es una técnica ventajosa.

Para mostrar la utilidad de esta herramienta, se generó artificialmente una señal $f(t)$ como se muestra en la Figura D5. La Figura D6 muestra el espectro de Fourier de esta señal. A partir del espectro de Fourier podemos decir que la señal tiene cuatro frecuencias dominantes, que corresponden a cada uno de los picos en el espectro, o sea 5 [Hz], 10 [Hz] y 20 [Hz].

Observando únicamente el espectro de Fourier de la señal no puede decirse en qué momento ocurren cada una de las frecuencias presentes a lo largo de toda la duración de la señal. Sin embargo el análisis en tiempo frecuencia mostrado en la Figura D7 permite identificar el momento en que ocurre cada una de las frecuencias de la señal. La transformada ondícula que mostramos aquí se obtiene utilizando la ondícula madre de Morlet.

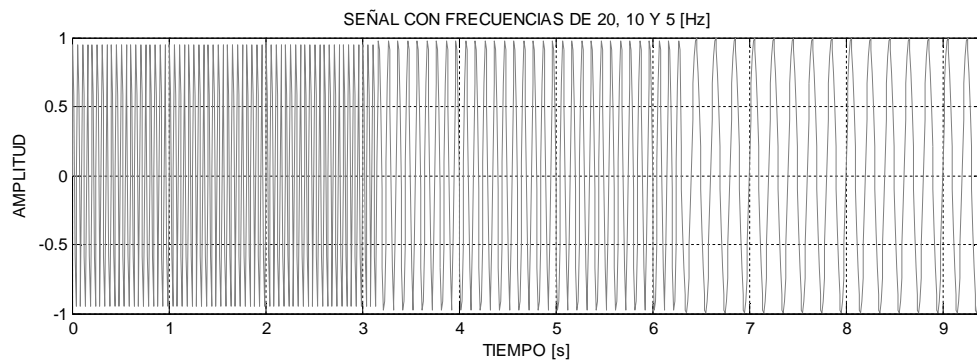


Figura D5. Señal con tres variaciones de frecuencia en el tiempo.

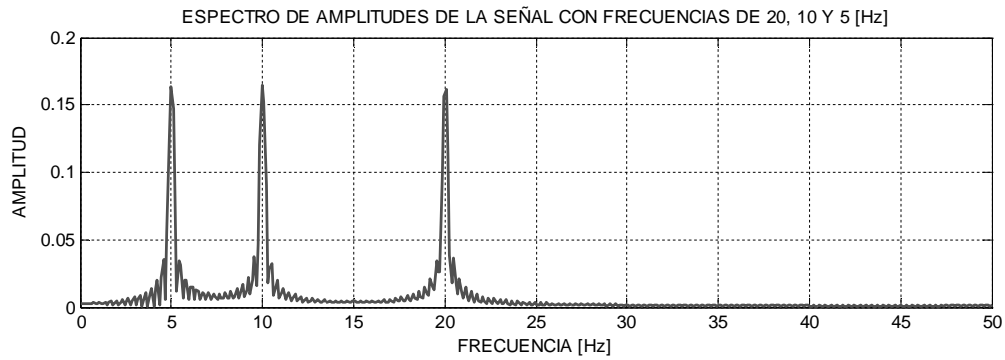


Figura D6. Transformada de Fourier de la Señal con tres variaciones de frecuencia en el tiempo.

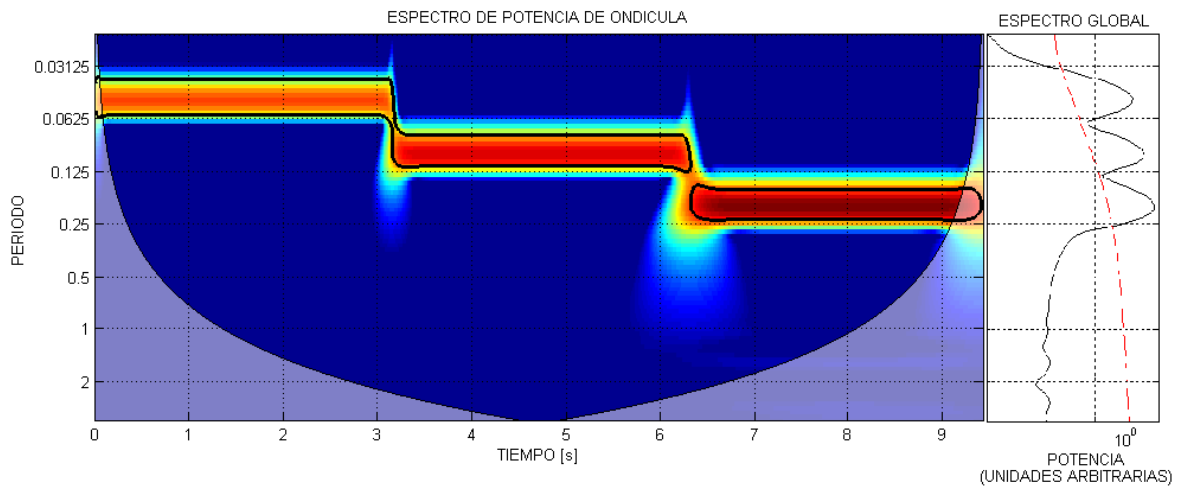


Figura D7. Transformada de Ondícula de la Señal con tres variaciones de frecuencia en el tiempo.

En la gráfica de colores en la Figura D7 es posible identificar las frecuencias que se observan como picos en el espectro de amplitudes en la Figura D6. El color rojo representa las frecuencias con mayor contenido energético, además es posible señalar en qué momento ocurre cada una de las frecuencias.

REFERENCIAS

- Beer, J., McCracken, K., Steiger, R., *Cosmogenic Radionuclides*, Berlin, Germany, Springer, 2012.
- Bell G., Chelliah M. Leading tropical modes associated with interannual and multidecadal fluctuations in North Atlantic Hurricane Activity. *Journal of Climate*, vol. 19., 2006.
- Bengin, V. V., Miroshnichenko, L. I. and Petrov, V. M. Dynamics and prediction of radiation characteristics of solar cosmic rays, *Space Research*, v. 23, No. 1, 1985.
- Burkhard Buttkus, *Spectral Analysis and Filter Theory In Applied Geophysics*, Hannover, Germany, Springer, 2000.
- Burrus C. S., R. A. Gopinath, and H. Guo., *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms*, Prentice Hall, 1997.
- Chilingarian A., Gevorgyan N., Babayan V., Martirosyan H., Test alert service against very large SEP Events, *Adv. Space Res.*, 36, 2005.
- Chuen L., Fuzzy logic in control systems. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. Vol. 20, num. 2, 1990.
- Cowling, T., "The Magnetic Field of Sunspots". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 94: 39–48, 1934.
- Cueto, M., *Variaciones geomagnéticas diarias solares y lunares en los observatorios españoles*, UCM., 2001.
- Daubechies, I., *Ten Lectures on Wavelet*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Ed. by Rutgers University and AT&T Bell Laboratories, 1992.
- Dorman L., Zuckerman I.: Initial Concept for forecasting the flux and energy spectrum of Energetic Particles using Ground level Cosmic Ray Observatories, *Adv. Space Res.*, 31, 2003.
- Dorman L., Pustil'nik L., Sternlieb A., Zukerman I., Forecasting of radiation hazard: 1. Alerts on great FEP events beginning; probabilities of false and missed alerts; on-line determination of solar energetic particle spectrum by using spectrographic method. *Adv. Space Res.*, 37, 2006.
- Elsner, J. B., Kara, A. B., Owens, M. A., Fluctuations in North Atlantic hurricane frequency, *J. Climate*, 427-437, 1999.
- Feynman, J., Proton fluence prediction models, *Solar-Terrestrial prediction- V*, Proc. of a workshop at Hitachi, Japan, January, 1997.
- Goldenberg, S., Lansea, C., Mestas-Nuñez, A., Gray, W., The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implication, *Science* 293, 474-479, 2001.
- Gray W., Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb QBO influences. *Mon. Wea. Rev.* 112, 1984.

Gray W. Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Mon. Wea. Rev.*, 1984.

Gray W., Landsea C., Mielke P., Berry K., Predicting atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance. *Ame. Meteo. Soc.* 1992.

Gray W., Landsea C., Mielke P., Berry K., Predicting atlantic basin seasonal hurricane activity by 1 August. *Ame. Meteo. Soc.* 1993.

Grinsted, A., Moore, J.C., Jevrejeva, S., Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 11:561-566, 2004.

Grossman, A. y Morlet, J., Decomposition of Hardy Functions into Square Integrable Wavelets of Constant Shape, *SIAM Journal of Mathematical Analysis*, Vol. 15(4), pp.723- 736. 1984.

Hanslmeier, A., *The Sun and Space Weather*, 2nd edition, ASCL, vol. 347, BOARD, 2006.

Heckman, G. R., Kunches, J. M., and Allen, H., Prediction and evaluation of solar particles events based on precursor information, *Adv. Space Res.*, v. 12, No. 2, 1992.

Humlum, O., <http://www.climate4you.com/Sun.htm>, update October 2013, 2013.

Huston, S. L., and Kuck, G. A., An early warning prediction scheme for solar proton events, 20th International Conf. on Environmental Systems, Williamsburg, Virginia, July, 1990.

Jacques M., *Les principales methods de traitement du signal (correlation, analyse spectrale...) et leurs applications aux mesures physiques.*, Centre d'Études Nucléaires de Grenoble, France. Rapport CEA-R-4018, 1970.

Jang, R. y Gulley, N., *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. MathWorks, Inc, 1997.

Jiménez-Espinoza, M., Matías-Ramírez, L., Fuentes, O., Prieto, R., *Ciclones Tropicales*, Serie Fascículos, CENAPRED, 2007.

Juárez A., Pérez-Peraza, J., Zapotitla J. On the prognosis of the occurrence of GLE. MA AGU-2013, Cancún, México. 2013.

Kane, P., Prediction of Solar Cycle Maximum Using Solar Cycle Lengths . *Solar Physics*, 2008.

Karttunen H., Kroger P., Oja., Poutanen M., Donner K., *Fundamental Astronomy*. Fifth edition. Springer-Verlag. Berlin, 2007.

Kavlakov, S., Global cosmic ray intensity, solar activity variations and geomagnetic disturbances as north Atlantic hurricane precursors, *IJMPA*, 10:41, 2005.

Kavlakov, S., Elsner, J., Perez-Peraza, J., Atlantic hurricanes, geomagnetic changes and cosmic ray variations. Part 1. Geomagnetic disturbances and hurricane intensifications. 30th ICRC, 2008.

Laing, A., Evans, J., *Introducción a la Meteorología Tropical*, COMET, 2011.

Liang-Gee Chen, *Design of Wavelet Transform Analysis, Architecture and Design Example*, London, Imperial College, 2007.

Mendel, J., *Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial*. Proceedings of the IEEE, vol. 83, num. 3, 1995.

Mallat, S.G., *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 2nd Edition, Academic Press, London, United Kingdom, 1999.

Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V., Plainaki C., Gerontidou M., *Space weather prediction by cosmic*. Adv. Space Res., 37, 2006.

Mavromichalaki H., Souvatzoglou G., Sarlanis C., Mariatos G., Belov A., Eroshenko E., Yanke V.: *Real time GLE Alert for the December 2006 event at the ANMODAP center*. Adv. Space Res., 43, 2009.

Miroshnichenko, L. I., Bengin, V. V., and Petrov, V. M., *The dynamics and prediction of radiation characteristics of solar cosmic rays*, Solar- Terrestrial Predictions. Proc. of a workshop at Meudon, France, June, 1986.

Miroshnichenko, L., *Solar cosmic rays*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 260, 2001.

Miroshnichenko, L., *Radiation Hazard in Space*, Kluwer Academic Publishers, Vol. 297, 2003.

Miroshnichenko, L., Pérez-Peraza, J., *Astrophysical Aspects in the Studies of Solar Cosmic Rays*, IJMP-A, vol. 23, Num. 1, 2008.

Miramontes, P., *El color del ruido*, Ciencias de la UNAM, Facultad de Ciencias, UNAM, No. 54, Abril, 1999.

Moffat H., *Magnetic field generation in electrically conducting fluids*. Cambridge University Press, Cambridge, 1978.

Montejo, L. A. y Suárez, L. E. "Wavelet Based Identification of Site Frequencies from Earthquake Records." *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 10, No. 3, pp. 565-594. 2006.

Nyberg, J. Malmgren, B., Winter, A., Jury, M., Halimeda, K., Quin, T., *Low Atlantic hurricane activity in the 1970s and 1980s compared to the past 270 years*, Nature, vol. 447, 2007.

Odegard J., Selesnick I., *Introduction to Wavelet and Wavelet Transform*, Upper Saddle River, New York. Prentice Hall, 1998.

Pérez-Peraza, J., *Física solar, física coronal y física de las relaciones Sol-Tierra*, Elementos, num. 9, año2, vol. 2, 1986.

Pérez-Peraza, J., Velasco, V., Kavlakov, S., *Wavelet coherence analysis of Atlantic hurricanes and cosmic rays*, Geofísica Internacional 47, 231-244, 2008.

Pérez-Peraza, J., Velasco Herrera, V., Zapotitla Román, J., Miroshnichenko, L.I., Vashenyuk, E., and Libin, I. Proc.32 ICRC, Beijing SH1.5, Vol.10, 149-152, 2011.

- Pérez-Peraza, J., Juárez Zuñiga A., Zapotitla Román J. On the prognosis of the occurrence of GLE. RAUGM-2012, Puerto Vallarta, México. 2012.
- Pérez-Peraza, J., Highlights in helioclimateology, Elsevier Inc, 2012.
- Pérez-Peraza, J., Velasco-Herrera, V.M., Zapotitla, J., Vashenyuk, E.V. and L.I. Miroshnichenko, Proc. 31, ICRC_L SH.1.5-8, Lodz, 2009.
- Pesnell, D., Solar Cycle Predictions (Invited Review). Solar Physics, 2012.
- Pukh Raj Rakhecha, Vijay P. Singh, Applied Hydrometeorology, 2009.
- Sackmann, J., Boothroyd, A., Kraemer, K., Our Sun: present and future, The Astrophysical Journal, 418:457-468, 1993.
- Sakurai, K., Physics of Solar Cosmic Rays, University of Tokyo Press, 1974.
- Smart, D. F., and Shea, M. A., PPS76- A computerized "event mode" solar proton forecasting technique, Solar-Terrestrial Prediction Proceedings, Ed. R.F. Donnelly, Washington, D.C., USA, v. 1, 1979.
- Svetska Z., Solar Flares, Dordrecht: Reidel, 1976.
- Terry, J., Tropical Cyclones, Springer, 2007.
- Torrence, C. and Compo, G., A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bull. American Meteorol. Soc. 79, 61-78, 1998.
- Turner, R. E., Diamond, P. S., and Baker, J. C., Solar event forecast tool, Eos Trans. AGU, 79 (17), Spring Meet. Suppl., s268, 1998.
- Valdéz-Galicia, J. F., Velasco, V. M., Mendoza, B., Mid-term cosmic ray quasi periodicities and solar magnetic activity manifestations, 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, 00, 101-104, 2005.
- Vargas B., Detección de rayos cósmicos solares con el monitor de neutrones de la Ciudad de México., Tesis Doctoral., UNAM, 2012.
- Vita-Finzi, C., The Sun: A User's Manual, Springer, 2008.
- Wang H., Schemm J., Kumar A., Wanqiu W., Long L., Chelliah M., Bell G., Peng P. A statistical forecast model for atlantic seasonal hurricane activity based on the NCEP Dynamical seasonal forecast. Journal of Climate, 2009.
- Ying, H., Fuzzy Control and modeling: Analytical foundations and applications. IEEE Press Series on Biological Engineering, 2000.
- Zolotova, N. V., Ponyavin, D. I., Synchronization in sunspot indices in the tow hemispheres, Solar Phys., 243, 193:203, 2007.

Zapotitla J., Juárez A., Pérez-Peraza, J., Madrigal M., Prediction of category 5 Atlantic Hurricanes., Meet. Ame., AGU-2013, Cancún, México. 2013.

Zapotitla J., Precursores de protones relativistas solares por análisis digital de señales utilizando transformada wavelet y análisis de componentes principales., Tesis de Licenciatura, UNAM, México, 2011.