



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**VARIACIÓN TEMPORAL DE LA PRESIÓN ARTERIAL EN  
JÓVENES Y SU RELACIÓN CON LA ACTIVIDAD  
GEOMAGNÉTICA A LATITUDES MEDIAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICO ESPACIAL)

P R E S E N T A

TANIA AZCÁRATE YÁÑEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. BLANCA EMMA MENDOZA ORTEGA



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

---

*Nunca consideres el estudio como una obligación,  
sino como una oportunidad para penetrar  
en el bello y maravilloso mundo del saber.*

*A. Einstein*

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco de una manera muy especial a la Dra. Blanca Mendoza Ortega, mi asesora, por todo el tiempo, paciencia, comprensión y enseñanza durante estos años. Su apoyo ha sido decisivo en el desarrollo y continuidad de mi vida académica.

Agradezco a mi comité tutorial el tiempo y dedicación que le brindaron a este trabajo para su mejora, a la Dra. Ester Brandan, Dr. Salvador Sánchez, Dr. Manuel Miranda y Dr. Victor Velasco.

A mi mis niños, Marco, Luis, Krsna, Devaki, Azarel, Kevin y Gossuami, por su eterna comprensión y amor. A compañero de vida, Misael, gracias por el impulso y amor.

A mis padres, Lilia y Manuel por estar siempre conmigo.

A mis hermanos, Einar, Ostap, Ragnar y Eduardo con quien puedo contar incondicionalmente, gracias por todo el apoyo.

A mis compañer@s y amigos del Instituto, con los que viví momentos inolvidables y de trabajo intenso, Tere, Marni, Oscar, Dení.

A la UNAM, mi alma mater, por cobijarme más de la mitad de mi vida y al CONACYT por el invaluable apoyo.

TANIA

# ***Índice general***

## **Capítulo 1**

1. Relaciones Sol-Tierra	
1.1. El Sol .....	11
1.1.1 El interior solar .....	13
1.1.2 La atmósfera solar .....	16
1.1.3 El origen de la actividad solar .....	18
1.1.4 Fenómenos característicos de la actividad solar .....	19
1.1.5 El viento solar y el medio interplanetario .....	23
1.1.6 Rayos cósmicos .....	24
1.2 La Tierra .....	24
1.2.1 Estructura de la Tierra .....	25
1.2.2 La atmósfera .....	26
1.2.3 Características de la atmósfera y su actividad .....	27
1.3 El campo magnético terrestre .....	31
1.3.1 Índices geomagnéticos .....	33
1.4 La magnetosfera como resultado de la interacción Sol-Tierra .....	33

## **Capítulo 2**

2. Relación entre la presión arterial y la actividad geomagnética-solar.	
2.1 El aparato circulatorio .....	38
2.1.1 Los procesos de sístole y diástole .....	41
2.1.2 Otros procesos y componentes .....	42
2.2 El papel del sistema nervioso autónomo .....	44
2.3 La presión arterial .....	47
2.4 La presión arterial y los ritmos biológicos .....	54
2.4.1 Ritmos biológicos .....	54
2.4.2 La melatonina .....	58
2.4.3 Presión arterial y ritmos biológicos .....	59
2.5 Influencia de la actividad geomagnética en la salud .....	60

## **Capítulo 3**

3. Datos y resultados	
3.1 Datos .....	62
3.2 Características de la muestra .....	65
3.3 Relación entre presión arterial y campo geomagnético	
3.3.1 Prueba K-S .....	79
3.3.2 Método de épocas superpuestas .....	82
3.3.3 Prueba ANOVA .....	86

## **Capítulo 4**

4. Discusión y conclusiones .....	88
Anexo I .....	93
Apéndice A. Prueba K-S .....	95
Apéndice B. Método de épocas superpuestas .....	98
<b>Bibliografía</b> .....	99

## Índice de figuras

1.1 Estructura del interior solar. (Tomada de <a href="http://www.xenciclopedia.com">www.xenciclopedia.com</a> ).....	14
1.2 Cadena protón-protón. (Tomada de Otaola, Mendoza, Pérez, 1999).....	15
1.3 Comportamiento de la temperatura y la densidad en el interior solar.....	16
1.4 Atmósfera solar según su perfil de temperatura (Tascione, 1994).....	16
1.5 Estructura granular de la fotosfera y regiones activa. (Tomada de <a href="http://sohowww.nascom.nasa.gov">sohowww.nascom.nasa.gov</a> ).....	17
1.6 Dínamo solar $\alpha$ - $\omega$ .....	19
1.7 Manchas solares. (Tomada de <a href="http://sohowww.nascom.nasa.gov">sohowww.nascom.nasa.gov</a> ).....	20
1.8 Gráfica del promedio del número de manchas solares del año 1845 al año 2010 (tomada de <a href="http://www.mearim.cu.edu.cu">www.mearim.cu.edu.cu</a> ).....	21
1.9 Eyecciones de masa coronal. (Tomada de <a href="http://sohowww.nascom.nasa.gov">sohowww.nascom.nasa.gov</a> )..	21
1.10 Estructura de la Tierra. (Tomada de <a href="http://brayalo.iespana.es">brayalo.iespana.es</a> ).....	25
1.11 Estructura de la atmósfera terrestre de acuerdo a su altitud y temperatura. (Tomada de <a href="http://recursos.cnice.mec.es.htm">http://recursos.cnice.mec.es.htm</a> ).....	28
1.12 Perfil de la densidad electrónica en la ionosfera de acuerdo a la altura. Se observan las diferencias entre máximo (línea sólida) y mínimo (línea punteada) de actividad solar (tomada de Gombosi, 1998).....	30
1.13 Representación del campo magnético terrestre. (Tomada de <a href="http://www.greenfacts.org">www.greenfacts.org</a> ).....	31
1.14 Elementos de la magnetosfera terrestre y su sistema de corrientes (tomado de <a href="http://www.astro.if.ufrgs.br">www.astro.if.ufrgs.br</a> ).....	34
1.15 Tormenta magnética según la variación de la componente Horizontal del campo geomagnético ( $D_{ST}$ ). (tomada de WDC-C2 for geomagnetism, Kyoto University).....	36
2.1 Estructura del corazón (tomada de <a href="http://www.smartimagebase.com">www.smartimagebase.com</a> ).....	39
2.2. Recorrido de la sangre en el corazón (tomada de <a href="http://www.nlm.nih.gov">www.nlm.nih.gov</a> ).....	40
2.3 Esquema del sistema circulatorio humano y la red capilar (tomada de <a href="http://juntadeandalucia.es">juntadeandalucia.es</a> ).....	43
2.4. El sistema nervioso autónomo. (Tomada de <a href="http://images.encarta.msn.com">images.encarta.msn.com</a> ).	46
2.5 Gráfica del comportamiento circadiano de las componentes de la PA en una persona normotensa. (Gráfica elaborada con los valores de la PA de un estudiante normotenso del primer semestre de la ENM y H-IPN).....	48
2.6 Localización del núcleo supraquiasmático en un cerebro humano. (tomada de <a href="http://www.cronobio.es">www.cronobio.es</a> ).....	55
3.1 Equipo ABPM usado para medir la presión arterial.....	65
3.2 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial PAS y PAD y el campo geomagnético durante el día para el grupo de mujeres.....	67
3.3 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante el día para el grupo de mujeres .....	67
3.4 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante el día para el grupo de mujeres .....	68
3.5 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial PAS y PAD y el campo geomagnético durante la noche para el grupo de mujeres.....	69
3.6 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo	

geomagnético durante la noche para el grupo de mujeres .....	69
3.7 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante la noche para el grupo de mujeres .....	70
3.8 Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y el campo geomagnético durante el día para el grupo de hombres.....	71
3.9 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante el día para para el grupo de hombres.....	71
3.10 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante el día para para el grupo de hombres .....	72
3.11 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial (PAS y PAD) y el campo geomagnético durante la noche para el grupo de hombres....	73
3.12 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante la noche para el grupo de hombres .....	73
3.13 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante la noche para el grupo de hombres .....	74
3.14. Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y el campo geomagnético durante el día para la muestra total.....	75
3.15. Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante el día para la muestra total .....	76
3.16. Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante el día para la muestra total .....	76
3.17. Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y el campo geomagnético durante la noche para la muestra total .....	77
3.18 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante la noche para la muestra total .....	78
3.19. Comportamiento temporal de las componentes de la FC y el campo geomagnético durante la noche para la muestra total .....	78
3.20. Comportamiento de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en mujeres. ....	82
3.21. Comportamiento de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en hombres.....	83
3.22. Comportamiento de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en la muestra completa.....	84
A.1. Perfil de la PA semanal de una mujer hipertensa (46 años de edad).....	90
A.2. Perfil de la PA semanal de un hombre hipertenso (61 años de edad).....	91
A.3. Perfil de la PA semanal de una mujer hipertensa (69 años de edad).....	91



## Índice de tablas

1.1 Parámetros del Sol.....	12
1.2 Composición química del Sol.....	13
1.3 Datos sobre las principales subdivisiones de la Tierra.....	26
1.4 Composición química de la baja atmósfera terrestre.....	27
2.1 Clasificación de la PA según el VI reporte del Comité Nacional Conjunto.....	49
3.1 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y la BH en el caso de las mujeres durante el día.....	66
3.2 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el BH en el caso de las mujeres durante la noche.....	68
3.3 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de los hombres durante el día.....	70
3.4 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de los hombres durante la noche.....	72
3.5 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y la BH en el caso de la muestra completa durante el día.....	74
3.6 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de la muestra completa durante la noche.....	77
3.7 Valores de $\alpha$ para los cuales existe relación entre la BH y la presión arterial en el caso de las mujeres.....	80
3.8 Valores de $\alpha$ para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial en el caso de los hombres.....	80
3.9 Valores de $\alpha$ para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial en la muestra total (hombres y mujeres).....	80
3.10 Valores de $\alpha$ para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial al contrastar las variables para hombres y mujeres.....	81
3.11 Variación porcentual en los valores de las componentes PAS y PAD durante los días correspondientes a la ventana temporal -3 a +3 días en torno a la tormenta del 23 de abril del 2008.....	85
3.12 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en mujeres tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma.....	86
3.13 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en hombres tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma. ....	87
3.14 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en la muestra total (hombres y mujeres) tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma. Los valores señalados (*) denotan que existe significancia estadística.....	87

## **RESUMEN**

Durante varias décadas se ha estudiado la posibilidad de que la actividad solar-geomagnética tenga un efecto en los sistemas biológicos existentes en la Tierra, en particular en lo que se refiere a la salud de los humanos. En este trabajo se estudia el comportamiento de la presión arterial (PA) y sus componentes sistólica(PAS), diastólica(PAD) y la presión media (PAM) en un grupo de estudiantes de la carrera de medicina de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía (ENMH) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), normotensos con edad promedio de 19 años (18 hombres y 33 mujeres). Los datos se obtuvieron durante los meses de abril y mayo de 2008, periodo en el que se presentaron tres tormentas geomagnéticas moderadas( $K_p=5$ ).

Se usa el método Kolmogorov-Smirnov para comparar el comportamiento entre las distribuciones de las componentes de la presión arterial y el campo geomagnético. Los resultados muestran que existe una relación entre el campo geomagnético y las componentes de la presión arterial. El comportamiento de las distribuciones de la PAS y la PAD bajo la influencia de las variaciones de campo geomagnético es distinto en hombres que en mujeres durante el periodo de tiempo estudiado. También se observa una diferencia al comparar durante el ciclo día-noche en un periodo de 24 hrs. Las variaciones más importantes de las componentes de la presión arterial las muestran las mujeres durante el día y los hombres durante la noche. Cuantitativamente los resultados son: a) La mayor similitud entre las distribuciones (campo geomagnético y PA) se observa entre el campo geomagnético y la PAS ( $\alpha=0.15$ ). b) En el caso de los hombres es en la noche y para las mujeres es en el día ( $\alpha=0.15$ ). c) En el caso de la PAD no se observan variaciones importantes comparadas con la PAS. d) La menor similitud se observa entre el campo geomagnético y la presión media ( $\alpha=0.33$ ). e) Los hombres son más sensibles a las variaciones del campo geomagnético que las mujeres. Al comparar los ciclos día-noche encontramos que las mujeres muestran mayores variaciones en el día, mientras que en los hombres las variaciones más importantes se observan durante la noche.

Adicionalmente, se aplicó el método de épocas superpuestas alrededor del día de la tormenta geomagnética. Los resultados indicaron que: a) tres días antes del inicio de la tormenta se observa un incremento en los valores de la PAS (para toda la muestra: 1.9% ) y la PAD (para toda la muestra: 4.3%). b) dos días antes se observa un descenso en dichos valores PAS (para toda la muestra: -0.6 %) y la PAD (para toda la muestra: -0.3%). c) un día previo al inicio de la tormenta y hasta un día después de ésta, se observa un incremento en los valores de las PAS(para toda la muestra:0.8%) y la PAD (para toda la muestra: 0.9%). d) el máximo cambio para la PAS y PAD es durante 3 a 2 días antes de la tormenta (1.9% y 4.3%) para toda la muestra. e) después del segundo día los valores tienden a regresar a sus valores iniciales. f) en todos los casos la PAD muestra variaciones mayores que la PAS.

Al aplicar la prueba de ANOVA se encontró que existe significancia estadística en la PAS y la PAD un día antes, durante y un día después de la ocurrencia de la tormenta geomagnética, mientras que cuando se estudia la muestra completa, la significancia estadística durante estos tres días se observa en la PAD y en la PAS solo el día de la tormenta.

Las aportaciones principales de este trabajo son: a) las muestras son analizadas a una latitud geomagnética media, b) se hace una distinción según el género y ciclo noche-día y c) se considera el comportamiento circadiano de cada una de las componentes de la PA. Los estudios previos sobre actividad solar-geomagnética y presión en humanos adultos se han realizado a altas latitudes y solo algunos consideran el género.

# CAPITULO 1

## RELACIONES SOL-TIERRA

### **INTRODUCCIÓN**

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra, por lo que es su principal fuente de energía. Diversos procesos físicos y biológicos que se llevan a cabo en nuestro planeta y su entorno inmediato, están relacionados con él y los productos de su actividad. Por tal motivo, el estudio de éste y su ciclo de actividad son cruciales para la comprensión no sólo de las relaciones Sol-Tierra, sino que nos ayuda a entender diversos procesos en el Universo.

El material presentado en este capítulo se obtuvo de las referencias: 3, 7, 14, 15, 17, 23, 24, 25, 28, 36, 37, 42, 44, 46, 52, 60, 61, 62, 64, 65, 69, 72, 85, 90, 93, 94, 95, 100, 101, 103, 114, 121, 122, 124, 128, 132, 133, 134, 135, 136.

### **1.1. EL SOL**

El Sol es una esfera de plasma que se formó hace aproximadamente  $5 \times 10^9$  años. Su clasificación espectral es G2, por lo que se considera una estrella típica en el universo observable. Su región espacial de influencia se denomina **Heliosfera** y abarca, hasta donde las observaciones indican al presente, ~100 Unidades Astronómicas (UA, 1 UA ~  $1.5 \times 10^8$  km, es la distancia promedio entre el Sol y la Tierra), en ella están inmersos los planetas, satélites y demás cuerpos que constituyen el Sistema Solar.

El Sol ocupa más del 99% de la masa del Sistema Solar y debido a que no es un cuerpo sólido su rotación es diferencial: en promedio en el ecuador la rotación es de 24.9 días y en los polos de 31.5 días. Sus características principales se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Parámetros del Sol

Masa (kg)	$2 \times 10^{30}$
GM(km <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	$1.3 \times 10^{11}$
Volumen (km <sup>3</sup> )	$1.4 \times 10^{18}$
Radio medio (km)	$6.96 \times 10^5$
Densidad media(kg/m <sup>3</sup> )	1,408
Aceleración de la gravedad en la superficie (m/s <sup>2</sup> )	274
Velocidad de escape (km/s)	617.7
Elipticidad	$5 \times 10^{-5}$
Momento de inercia (I/MR <sup>2</sup> )	0.059
Magnitud visual V(1,0)	-26.74
Magnitud absoluta	+4.83
Luminosidad (10 <sup>24</sup> J/s)	$3.85 \times 10^{26}$
Razón de conversión de masa (10 <sup>6</sup> kg/s)	4,300
Producción media de energía (10 <sup>3</sup> J/kg)	0.1937
Emisión superficial (10 <sup>6</sup> J/m <sup>2</sup> s)	63.29
Tipo espectral	G2V
<b>Valores medios para el centro del sol</b>	
Presión central	$2.48 \times 10^{11}$ bar
Temperatura central	$1.57 \times 10^7$ K
Densidad central	$1.62 \times 10^5$ kg/m <sup>3</sup>
<b>Parámetros rotacionales y orbitales</b>	
Periodo de rotación sideral (hrs.)	609.12
Oblicuidad eclíptica (deg)	7.25
Rapidez relativa con las estrellas cercanas (km/s)	19.4

El análisis del espectro de la parte más baja de su atmósfera muestra su composición química, donde el elemento más abundante es el hidrógeno (75%),

seguido del helio (24%) y el 1% restante lo constituyen elementos más pesados. (Ver Tabla 1.2).

*Tabla 1.2 Composición química del Sol*

<b>Elemento</b>	<b>Nº relativo de átomos</b>
Hidrógeno	1.000.000
Helio	100.000
Oxígeno	1.000
Carbono	400
Neón	200
Nitrógeno	100
Silicio	60
Azufre y Magnesio	20
Hierro	6
Sodio, Aluminio, Argón y Calcio	2

Para su estudio, el Sol se divide en dos partes principales: el interior y la atmósfera. El interior solar es opaco, lo que impide que se realicen observaciones directas. Actualmente se han desarrollado modelos teóricos sobre la estructura y características físicas de esta región. Mientras que la atmósfera puede estudiarse con mayor facilidad, basándonos en sus características físicas, las cuales se pueden obtener con la tecnología disponible desde la Tierra o en las misiones espaciales.

### **1.1.1 EL INTERIOR SOLAR**

En el interior del Sol se subdivide en tres regiones: el *núcleo*, que es la parte central donde se genera la energía nuclear principalmente en forma de radiación electromagnética; la *zona radiativa*, donde la energía es transportada por medio de la transferencia de radiación y la *zona convectiva*, donde el mecanismo de transporte de energía es llevado a cabo por las turbulentas corrientes convectivas. (Ver Fig. 1.1).

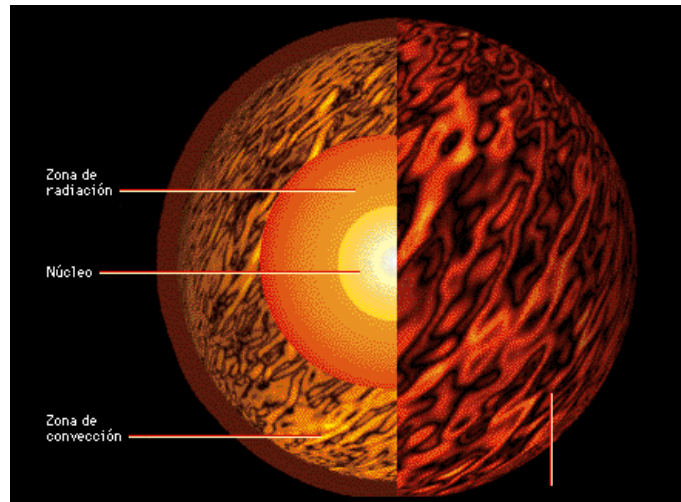


Figura. 1.1 Estructura del interior solar. (Tomada de [www.xenciclopedia.com](http://www.xenciclopedia.com)).

Las características de estas regiones y los procesos físicos principales que se llevan a cabo en cada una, se describen a continuación.

El **núcleo** tiene  $2 \times 10^5$  km de radio, ahí la presión ( $\sim 2.5 \times 10^{11}$  atm) y la densidad ( $160 \text{ gm/cm}^3$ ) dan lugar a temperaturas del orden de  $1.56 \times 10^7$  K, suficientemente alta como para originar reacciones termonucleares de fusión y convertir hidrógeno en helio con la correspondiente producción de energía en forma de rayos  $\gamma$  y neutrinos, éstos últimos casi no interaccionan con las partículas del medio saliendo libremente hacia la superficie.

Casi  $5 \times 10^6$  toneladas de materia se transforma en energía ( $\sim 4.48 \times 10^{-12}$  J por cada átomo de helio formado) y cada segundo se producen  $1 \times 10^{38}$  átomos de helio en un proceso llamado cadena protón-protón de la siguiente forma:

Dos protones ( $^1\text{H}$ ) se unen para formar deuterio ( $^2\text{H}$ ) liberando un neutrino ( $\nu_e$ ) y un positrón ( $e^+$ ), el positrón se encuentra con un electrón y se aniquilan, produciendo dos fotones  $\gamma$ . El deuterio se une a un protón y forman He-3 liberando un fotón  $\gamma$ , finalmente dos He-3 se unen para formar un núcleo de He-4 liberando dos protones que contribuirán en la formación de nuevas reacciones. (Ver Fig. 1.2).

La energía es transportada hacia el exterior mediante los procesos de radiación y convección.

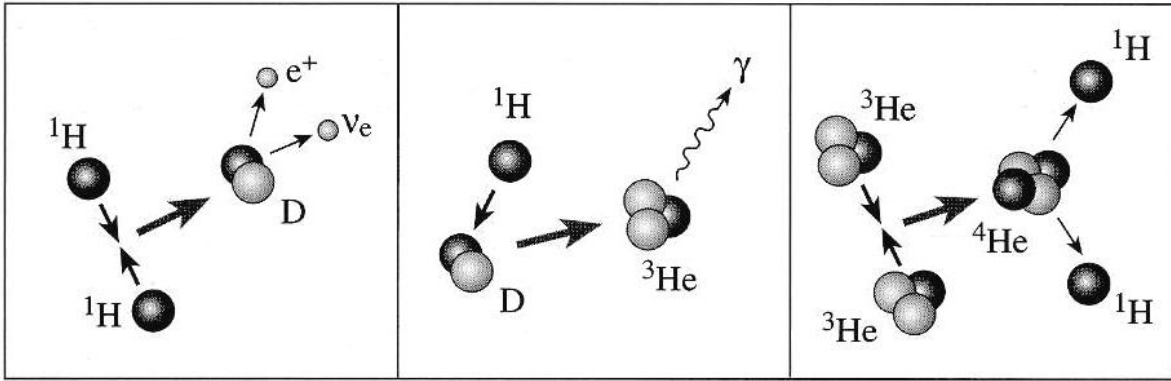


Figura 1.2 Cadena protón-protón. (Tomada de Otaola, Mendoza, Pérez, 1999).

La **zona radiativa** envuelve al núcleo y ocupa de los 2 a los 6 u 8 décimos del radio solar, ahí la temperatura, la densidad y la presión decaen uniformemente hacia afuera. En esta región la transferencia de energía es llevada a cabo por los fotones pero la densidad es lo suficientemente alta como para que éstos interactúen con las partículas del medio cada 1 o 2 centímetros. Durante las colisiones van perdiendo energía lo que se refleja en un cambio en su espectro de emisión, que pasa de rayos  $\gamma$  a rayos ultravioleta extremos (UVE), después a rayos ultravioleta y abandonan la superficie como rayos infrarrojos y luz visible. El tiempo que tardan en dejar esta zona es del orden de  $10^6$  años.

La **Zona convectiva** corresponde a los 2 décimos restantes del radio solar. En esta región, la presión del gas disminuye permitiendo el movimiento de material. Además, debido a que el gradiente de temperatura alcanza un valor crítico, se originan movimientos convectivos, mediante los cuales el material es transportado hacia la superficie como celdas de convección. A medida que el material caliente asciende va perdiendo energía y temperatura y una vez que llega a la superficie cae nuevamente hacia el interior para iniciar un nuevo ciclo. (Ver Fig. 1.3)



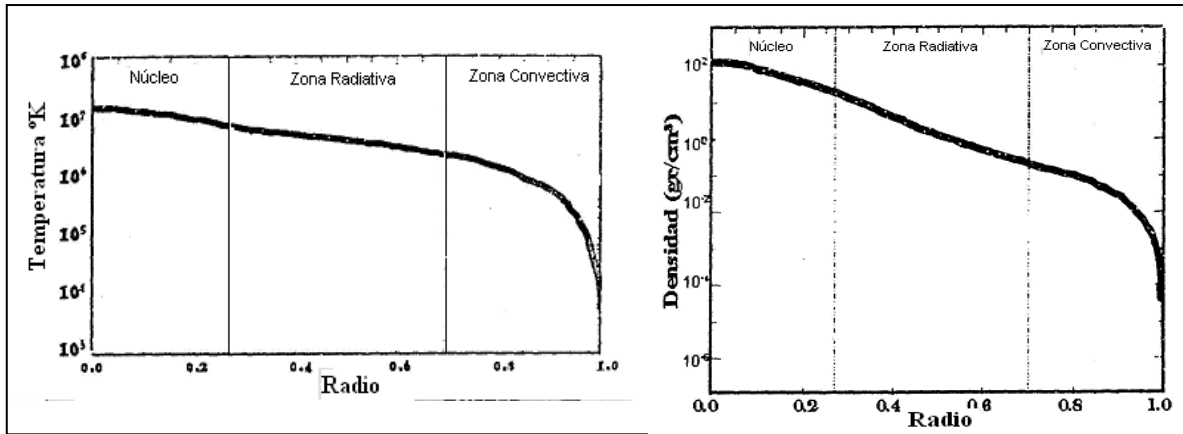


Figura 1.3 Comportamiento de la temperatura y la densidad en el interior solar.

### 1.1.2 LA ATMÓSFERA SOLAR

Para su estudio, la atmósfera solar se divide en capas de acuerdo a su perfil de temperatura: la fotosfera, la cromosfera y la corona (Ver Fig. 1.4).

La **Fotosfera** es la superficie visible del Sol, esta formada por las “cabezas” de las celdas de la zona convectiva. Es una capa delgada de aproximadamente 500 km de espesor cuya temperatura promedio es de 5770 K.

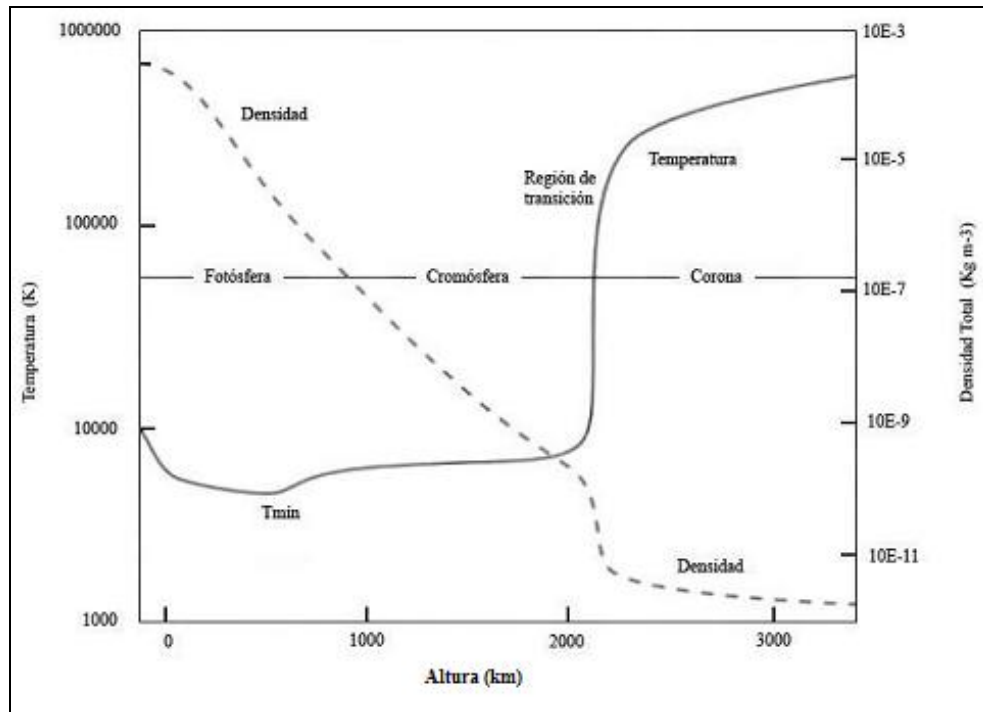


Figura 1.4 Atmósfera solar según su perfil de temperatura (Tascione, 1994).

En esta zona se absorbe la mayor parte de la energía proveniente del interior mostrando un comportamiento muy parecido a un cuerpo negro a esa temperatura. Posteriormente la mayor parte de la energía es radiada en longitudes de onda correspondientes a la región visible del espectro electromagnético (Ver Fig. 1.5).

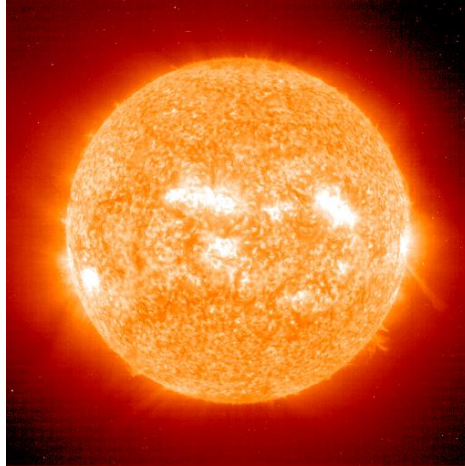


Figura 1.5 Estructura granular de la fotosfera y regiones activa.  
(Tomada de [sohowww.nascom.nasa.gov](http://sohowww.nascom.nasa.gov)).

Después de la fotosfera se distingue una región donde existe un gradiente de densidad disminuyendo hacia el exterior denominada **cromosfera**, la cual comienza a partir de la parte superior de la fotosfera y llega hasta 2500-3000 km por encima de ella. La temperatura en la parte inferior es de 4300 K, incrementándose gradualmente hasta llegar a los  $10^4$  K en la parte superior. La mayor parte de la emisión de la cromosfera está en un rango de emisión del espectro electromagnético correspondiente al  $H\alpha$  y al ultravioleta, es decir, longitudes entre 0.1 y 0.3  $\mu\text{m}$ . Su composición química la constituyen principalmente el H y el He. En la cromosfera se disipa energía mecánica generada probablemente por la convección o la rotación, por lo que la temperatura se incrementa bruscamente hacia el exterior alcanzando los valores observados.

Entre la cromosfera y la corona se encuentra una delgada capa ( $\sim 100$  km de espesor) llamada **región de transición**, en esta zona la temperatura aumenta drásticamente de  $2 \times 10^4$  K en la parte superior de la cromosfera hasta  $2 \times 10^6$  K en la parte baja de la corona.

La **corona** es la última región de la atmósfera solar y debido a su alta temperatura se expande continuamente hacia el medio interplanetario convirtiéndose

gradualmente en el viento solar (Hundhausen, 1972). Esta región está constituida por un gas completamente ionizado cuya temperatura es superior a  $10^6$  K y su densidad es de  $\sim 10^8$  partículas/cm<sup>3</sup>, la cual disminuye con la altura. Su emisión se observa principalmente en el extremo ultravioleta y parcialmente en rayos-X. Puede observarse durante un eclipse total de Sol y su forma y tamaño dependen del ciclo de actividad solar.

Actualmente se proponen dos procesos para el calentamiento de la corona, el primero producido por la disipación de campos magnéticos y el segundo por ondas de choque magnetohidrodinámicas generadas en la zona convectiva.

En la corona se observan 3 tipos de regiones de gran escala: a) *Regiones activas y puntos coronales brillantes* donde el campo magnético es muy intenso, de topología cerrada y complejo, su emisión es en rayos-X. b) *Regiones no perturbadas* cuyo campo magnético y emisión son débiles. c) Los *hoyos coronales*, que son regiones de campo magnético abierto con una temperatura y densidad menores que la corona no perturbada y una emisión menor en rayos-X y ultravioleta. Su temperatura y densidad son entre dos y cinco veces menor que la de las regiones no perturbadas y las activas respectivamente.

### 1.1.3 EL ORIGEN DE LA ACTIVIDAD SOLAR

La actividad solar es la manifestación de los complejos procesos físicos originados por el campo magnético solar. La interacción entre la rotación diferencial del Sol y los movimientos del plasma en la zona de convección generan el llamado **dínamo solar** (*dínamo cinemático  $\alpha$ - $\omega$* , Steenbeck y Krause, 1969; Yoshimura, 1975; Wood y Moffatt, 1985).

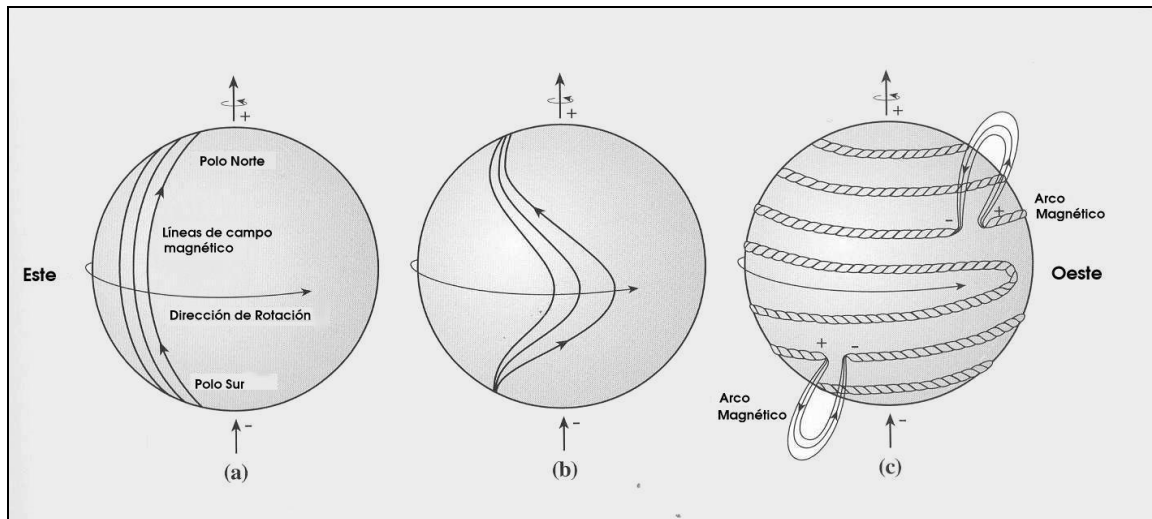


Figura 1.6 Dínamo solar  $\alpha$ - $\omega$ .

Al inicio de cada ciclo solar, el campo magnético originalmente es de forma bipolar (Ver Fig. 1.6 A y B). La rotación diferencial modifica esta estructura estirando y enredando las líneas de campo magnético alrededor del Sol primeramente en la parte ecuatorial (efecto  $\omega$ ) dando lugar a un campo toroidal. Conforme el ciclo avanza, la fuerza de Coriolis actúa sobre los turbulentos flujos de plasma y sobre el campo magnético haciéndolos girar, restituyendo el campo poloidal (efecto  $\alpha$ ) (Ver Fig. 1.6 C y D). A gran escala la estructura toroidal del campo ocurre durante el máximo de actividad y la poloidal durante el mínimo. En 1908 Hale al observar el comportamiento magnético de los grupos de manchas solares encontró que cada 11 años tiene lugar una inversión de los polos magnéticos solares. De tal forma que cada 22 años el campo magnético total vuelve a tener la dirección del campo original (Ver Fig. 1.6).

#### 1.1.4 FENÓMENOS CARACTERÍSTICOS DE LA ACTIVIDAD SOLAR

En la atmósfera solar se llevan a cabo una gran variedad de fenómenos energéticos asociados con el campo magnético del Sol y que están en consonancia con su ciclo de actividad.

- a) En la fotosfera se presentan las manchas solares y las fáculas, que en conjunto forman las llamadas regiones activas. Las **manchas solares** son

manifestaciones del campo magnético toroidal del Sol, en ellas el campo magnético es miles de veces más intenso, (puede llegar a unos  $4 \times 10^{-2}$  T en manchas de gran tamaño) en comparación con los alrededores. Dicho campo inhibe la circulación de material desde el interior. Por este motivo radia menos hacia el exterior, haciéndola una región más fría y oscura que el resto de la fotosfera. Una mancha está constituida por la *umbra* que es la parte central, rodeada de la *penumbra*, formada por una estructura de filamentos oscuros (Ver Fig. 1.7).

b)

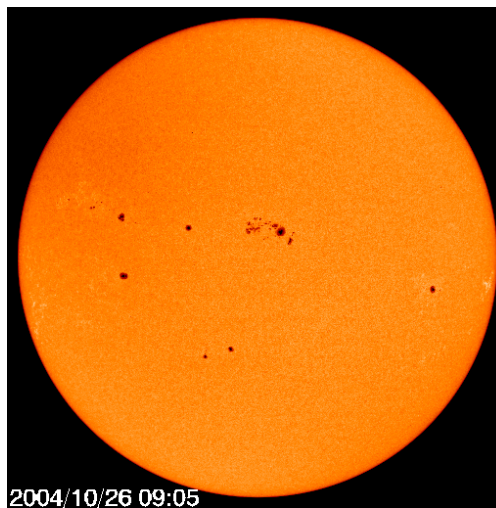


Figura 1.7 Manchas solares.  
(Tomada de [sohowww.nascom.nasa.gov](http://sohowww.nascom.nasa.gov))

La aparición de las manchas es una de las manifestaciones del ciclo de actividad solar. Al inicio de cada ciclo aparecen pocas a altas latitudes ( $\pm 45^\circ$ ) y conforme avanza el ciclo las manchas van apareciendo en mayor número y en latitudes más cercanas al ecuador solar sin llegar nunca a la latitud  $0^\circ$ . Durante el máximo solar se encuentran a los  $\pm 15^\circ$  de latitud. Las manchas presentan una variación de su número que tiene un ciclo promedio de 11 años (Ver Fig. 1.8). Por otra parte, las **fáculas** son regiones irregulares muy brillantes con campos magnéticos también intensos que rodean a las manchas, su emisión principal es en la línea K del calcio.

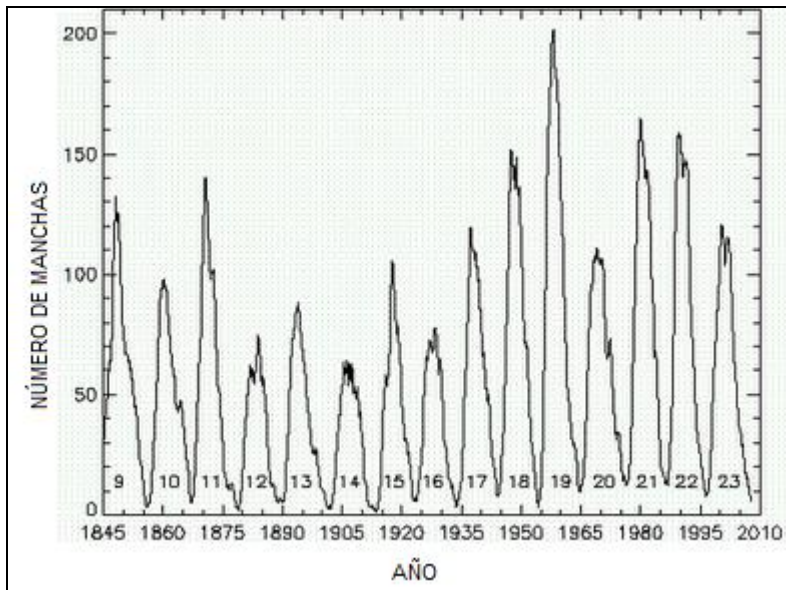


Figura 1.8 Gráfica del promedio del número de manchas solares del año 1845 al año 2010 (tomada de [www.mearim.cu.edu.eg](http://www.mearim.cu.edu.eg)).

b) En la cromosfera se observan las **espículas**, que son cilindros casi verticales de plasma originados por la disipación de la energía magnética, siguen la dirección del campo magnético local. En el limbo se observan las **protuberancias o filamentos**, que son nubes densas de materia que se arquean por encima de la superficie solar, siguiendo la configuración de las líneas de campo magnético (Van Ballegoijen and Martens, 1989). Son más frías que el material circundante y su tiempo de vida está determinado por el grado de estabilidad de las configuraciones magnéticas que las sostienen. Su longitud promedio es de  $\sim 1 \times 10^5$  km y sus temperaturas típicas en su parte central están en el intervalo de los  $10^4$  K a los  $3 \times 10^4$  K.

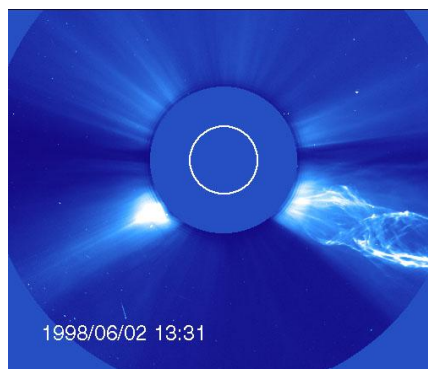


Figura 1.9 Eyecciones de masa coronal. (Tomada de [sohowww.nascom.nasa.gov](http://sohowww.nascom.nasa.gov)).

c) Los eventos energéticos y de mayor escala derivados de la actividad solar se llevan a cabo en la corona y son: las ráfagas o fulguraciones y las eyecciones de masa coronal (EMC). Estos fenómenos se caracterizan por la expulsión súbita al medio interplanetario, de plasma coronal, radiación electromagnética o partículas muy energéticas. Actualmente se sabe que las EMC y las ráfagas son eventos independientes, probablemente a veces haya una causa común, que provoca que aparezcan casi simultáneamente.

Las **Ráfagas o fulguraciones** son el resultado de la conversión de la energía magnética de los arcos coronales en energía cinética de las partículas del medio y en emisión electromagnética en una amplia banda de frecuencias. Se componen de tres etapas principales: a) la *pre-ráfaga* caracterizada por un incremento en la emisión de rayos-x debido a la deformación del campo magnético del Sol, b) la *fase impulsiva* donde las líneas de campo se rompen y reconectan acelerando a las partículas del medio y finalmente c) *la fase térmica o gradual* en la que las partículas aceleradas durante la fase impulsiva viajan a través de la atmósfera solar perturbando a las partículas del medio por donde pasan, las cuales radian su exceso de energía en diferentes longitudes de onda.

Las **EMC** están asociadas con filamentos que se desestabilizan y estallan, lanzando parte de su material y el material que les rodea hacia el medio interplanetario (Ver Fig. 1.9). Pueden llegar a expulsar  $\sim 10^{12}$ - $10^{13}$  kg de materia a velocidades que van de decenas de metros hasta de  $\sim 2 \times 10^6$  km por segundo (Yashiro, 2004).

Las fulguraciones y las EMC pueden producir perturbaciones importantes en el medio interplanetario y ser capaces de dañar a los satélites artificiales de forma permanente. Mientras que en la Tierra provocan disturbios geomagnéticos asociados a alteraciones en los medios de comunicación, alteración de la orientación de especies animales y probablemente afectan el clima y la salud humana (Zadhin, 2001; Mendoza, 2009 y Palmer 2006).

En la corona también se encuentran zonas de topología magnética abierta denominadas **hoyos coronales**, estas regiones aparecen en los polos durante el mínimo solar, siendo grandes estructuras, que pueden incluso tener extensiones hasta el ecuador, y de larga vida (años). En la fase de máxima actividad solar

aparecen en latitudes medias y bajas, siendo pequeños y de corta vida (días). Los hoyos coronales son la fuente de viento solar rápido (~ 700-1000 km/s).

### **1.1.5 EL VIENTO SOLAR Y EL MEDIO INTERPLANETARIO**

El viento solar es la expansión supermagnetosónica de la corona solar. Se origina debido a que en esta región la temperatura es tan alta que el plasma adquiere una energía tal que vence a la fuerza de gravedad. El viento solar permea el medio interplanetario. Las características observadas en el viento solar están determinadas por el ciclo de actividad solar.

A la altura de la órbita de la Tierra (1 UA) el plasma tiene una densidad promedio de 10 partículas/ cm<sup>3</sup> y una velocidad promedio de 450 km/s.

Hay dos clases de viento solar, el rápido (700-1000 km/s a 1 UA) y el lento (400 km/s a 1 UA). El primero se genera en los hoyos coronales (Cranmer, 2004), mientras que el viento solar lento probablemente proviene de los bordes de los hoyos coronales y de las regiones de topología magnética cerrada.

Chapman (1950) propuso el primer modelo en el que describía a la corona como un medio homogéneo, simétrico y estático, lo cual le permitió hacer su caracterización usando teoría hidrostática, sin embargo las observaciones no apoyaron esta teoría. Posteriormente, Parker (1958) propuso un modelo dinámico de la corona en el que se analiza la probabilidad de flujo variable. Sus propuesta se basó en las observaciones realizadas por Biermann (1951), quien registró que la longitud aparente de la cola de los cometas variaba con el tiempo y tales variaciones se hacían mucho más evidentes en los momentos de mayor actividad solar. Parker consideró que a la temperatura a la que se encuentra la corona (~10<sup>6</sup> K) el plasma es altamente conductor y que el teorema de Alfvén es aplicable. Este teorema describe el acoplamiento del campo magnético y el plasma en un fluido conductor en términos del parámetro  $\beta$  ( $\beta$ =Presión del plasma/Presión magnética). Para el caso del viento solar, el plasma y el campo están acoplados de tal manera que uno se mueve con el otro, por ello se dice que el campo está “congelado” en el plasma. El modelo desarrollado por Parker que plantea una corona solar en expansión radial constituye la base de las teorías del viento solar en la actualidad.



### 1.1.6 RAYOS CÓSMICOS

Los rayos cósmicos galácticos (RCG) son partículas altamente energéticas que llegan a la Tierra de manera uniforme desde todas direcciones del cosmos, actualmente se sabe que el 85% de éstas son protones, 12% son partículas  $\alpha$  y el 3% núcleos de átomos pesados y electrones.

El origen de los RCG no está claro, una de las propuestas es que son acelerados en las explosiones de supernovas, y los más energéticos en núcleos activos de galaxias. En la heliosfera, el transporte de los RCG es modulado principalmente por la estructura magnética del viento solar, se proponen procesos tales como: la convección en el viento solar, los efectos de deriva que experimentan las partículas en los choques, o el cambio de energía que sufren en las regiones de compresión asociadas con los choques (Caballero, 2003). La modulación solar impone un ciclo de 11 años en el flujo de RCG que aproximadamente anticorrelaciona con el de las manchas solares.

Una vez que los RCG llegan a la atmósfera terrestre colisionan con las moléculas del aire induciendo cambios de energía en las partículas involucradas originando lo que se conoce como **chubasco atmosférico**. Como ya se mencionó, durante las fulguraciones solares, el Sol emite también partículas energéticas conocidas como *rayos cósmicos solares* cuyas energías son mucho menores que las de los RCG.

## 1.2 LA TIERRA

El Sistema Solar se formó hace  $\sim 4.6 \times 10^9$  años, está constituido principalmente por 8 planetas, un planeta enano, satélites y otros cuerpos menores. La Tierra es el mayor de los planetas interiores, su radio ecuatorial ó terrestre ( $R_t$ ) es de 6,378 km. La Tierra, y su satélite natural la Luna que gira con ella, tiene una órbita elíptica alrededor del Sol con una velocidad de traslación de  $\sim 10^5$  km/h, la cual realiza en 365 días (llamado año solar) y completa una rotación (de oeste a este) en 23 horas, 56 minutos y 4.1 segundos, dando lugar a los días y las noches. El ángulo entre el ecuador solar y el plano de la eclíptica es de  $23.5^\circ$ , es debido a esta inclinación que la luz del Sol incide de forma diferente en cada hemisferio, dando lugar a las estaciones.

### 1.2.1. ESTRUCTURA DE LA TIERRA

La Tierra está constituida por tres estructuras principales: el núcleo, el manto y la corteza (Ver Fig. 1.10).

**El núcleo** se subdivide en interior y exterior. Está compuesto principalmente de hierro y níquel, constituye el 14% del volumen de la Tierra y el 31% de su masa. El núcleo interno se encuentra en estado sólido a una temperatura de  $\sim 5500$  °C. El núcleo exterior está en estado líquido y tiene una temperatura de  $\sim 3700$  °C. Esta región tiene un comportamiento sísmico debido a la propagación de las ondas de presión.

El **manto** envuelve al núcleo, representa el 83% del volumen del planeta y el 65% de su masa. Se subdivide en manto inferior ( $\sim 2200$  km) que está en estado líquido y manto superior ( $\sim 600$  km) subdividido en dos capas, una rocosa y otra semilíquida. El manto en general está formado principalmente de rocas ígneas o magmáticas. En esta capa se transporta la energía térmica del núcleo mediante el proceso de convección, este fenómeno se observa en la llamada deriva continental.

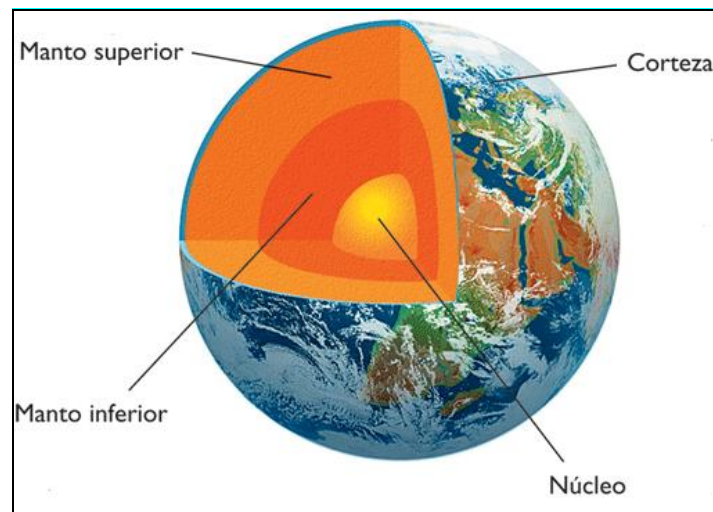


Figura 1.10 Estructura de la Tierra. (Tomada de brayalo.iespana.es).

La **corteza** terrestre es la capa externa de la Tierra, su superficie constituye el 1.6% de la masa del planeta, su espesor no es uniforme y va de los 35-40 km bajo los continentes a los 10 km en los fondos oceánicos.

A su vez, la corteza terrestre se divide en tres capas de espesor variable: la **sedimentaria superficial** que está constituida por rocas. La **corteza continental** o externa que está constituida por rocas muy parecidas en composición química al granito; y por último, la capa basáltica inferior, llamada también **corteza oceánica** cuya composición se asemeja a los basaltos. En la Tabla 1.4 se muestran algunos datos acerca de las principales subdivisiones de la Tierra.

Tabla 1.3 Datos sobre las principales subdivisiones de la Tierra.

Subdivisión	Espesor o radio (km)	Masa (g)	Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )
Núcleo	3480	$1.8 \times 10^{27}$	10.6
Manto	2870	$4.08 \times 10^{27}$	4.6
Corteza continental	40	$1.6 \times 10^{25}$	2.8
Corteza oceánica	7	$7.0 \times 10^{21}$	2.8
Océanos	4	$1.39 \times 10^{21}$	1.0
Atmósfera	-	$5.1 \times 10^{21}$	-
Tierra	6371	$5.98 \times 10^{27}$	5.5

### 1.2.2 LA ATMÓSFERA

La atmósfera es un sistema dinámico que consiste en una envoltura gaseosa que cubre a un cuerpo celeste. La atmósfera terrestre está formada por a) una mezcla de gases que no reaccionan químicamente entre sí, b) vapor de agua y c) una gran variedad de partículas en suspensión. Dichos componentes están interactuando continuamente con diversos factores como la vegetación, el suelo, los océanos y los seres vivos. En cuanto a su composición química, la mayor parte es nitrógeno (78%) el cual es químicamente inactivo. El segundo elemento más abundante es el oxígeno (21%), el cual es químicamente muy activo y al combinarse produce calor y energía para los seres vivos.

En la atmósfera terrestre se encuentran otros elementos y compuestos en cantidades pequeñas, los más importantes son: el bióxido de carbono que absorbe el calor cerca de la superficie de la Tierra; el agua en estado gaseoso, que durante su condensación libera calor latente que suministra la energía para las tormentas; el polvo que puede absorber calor; también existen radicales libres que aunque en muy pequeña concentración son muy activos químicamente, como los radicales halógenos y el radical OH (Ver Tabla 1.5).

Es importante señalar que la cantidad de bióxido de carbono se ha incrementado de manera importante debido a la quema de combustibles fósiles y madera.

Tabla 1.4 Composición química de la baja atmósfera terrestre.

Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.084%
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.946%
Argón (A)	0.934%
Bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	0.033%
Otros gases inertes	0.00256%
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	0.00005%
Metano (CH <sub>4</sub> )	0.00002%
Óxido nítrico (N <sub>2</sub> O)	0.00005%

### 1.2.3. CARACTERÍSTICAS DE LA ATMOSFERA Y SU ACTIVIDAD

La atmósfera se divide en cinco regiones de acuerdo a la variación de la temperatura con la altura: la troposfera, la estratosfera, la mesosfera, la termosfera y la exosfera. Sus propiedades físicas y químicas también tienen variaciones con la altura (Ver Fig. 1.11).

En la *troposfera* la temperatura decrece con la altura. En ella se lleva a cabo el transporte convectivo de calor generado por el vapor de agua de la atmósfera, la formación de nubes, la precipitación pluvial y las tormentas. Está limitada por la tropopausa. Es en la troposfera donde se generan el clima y la vida.

Después de la tropopausa se encuentra la *estratosfera* (a partir de ~15 km de altitud), aquí la temperatura se incrementa con la altura debido a que en esta región

se encuentra la mayor parte del ozono atmosférico el cual se encarga de absorber la radiación ultravioleta proveniente del Sol. Esta región está limitada por la estratopausa.

La capa siguiente es la *mesosfera* (a partir de ~50 km de altitud), es una región químicamente muy activa debido a la incidencia de la radiación y partículas energéticas solares. Se caracteriza por el descenso de su temperatura con la altura hasta la mesopausa.

Ya en la *termosfera* (a partir de ~ 90 km de altura) la temperatura aumenta bruscamente alcanzando los ~500 K en la noche durante un mínimo solar y por arriba de los 1750 K en el día durante un máximo solar. El incremento de temperatura es originado por la incidencia directa de la radiación y partículas energéticas solares de tal forma que los elementos que la constituyen se encuentran en estado atómico. El incremento de temperatura cesa en la termopausa.

La *exosfera* (a partir de ~ 500 km de altura) es la última capa de la atmósfera, está formada principalmente por He e H con velocidades tan altas que les permiten escapar de la atmósfera terrestre. El incremento de temperatura es mínimo por lo que su comportamiento puede considerarse isotérmico ( $T=cte$ ); esta región probablemente se extiende hasta la magnetosfera o magnetofunda.

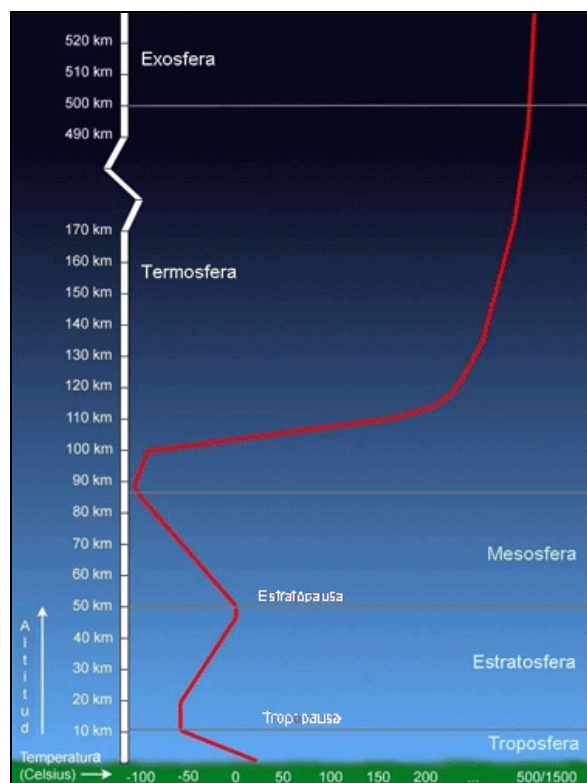


Figura 1.11 Estructura de la atmósfera terrestre de acuerdo a su altitud y temperatura. (Tomada de <http://recursos.cnice.mec.es.htm>).

La **ionosfera** es una región de plasma parcialmente ionizado y magnetizado que envuelve a la Tierra a partir de los ~ 50 km de altura. La ionización es producida principalmente por el proceso de fotoionización y por el impacto de partículas energéticas de origen solar en los átomos y moléculas de la parte alta de la atmósfera. Su estructura, densidad electrónica y propiedades electromagnéticas son altamente variables y están en función de la incidencia de la radiación solar que a su vez depende de la latitud, altitud y del ciclo de actividad solar. En general, las variaciones pueden clasificarse en regulares e irregulares. Las primeras se presentan periódicamente como las del ciclo día-noche, las estacionales y las relacionadas con el ciclo de actividad solar. Mientras que las irregulares están asociadas a eventos transitorios en el Sol, por lo que no se puede predecir su ocurrencia. La ionosfera es muy dinámica y sensible a las perturbaciones inducidas por diversas fuentes: en la parte superior la incidencia de la actividad solar y en la parte inferior las ondas generadas en la troposfera y estratosfera por la ocurrencia de eventos turbulentos como huracanes y tormentas (Rishbeth et al., 2000). En

1908 K. Birkeland propuso la existencia de corrientes eléctricas durante los días en que se presentaban disturbios magnéticos. Estas corrientes son producidas por los iones y electrones en movimiento, los cuales además son capaces de generar campos electromagnéticos mediante el mecanismo de dínamo ionosférico propuesto por Stewart (1883).

De acuerdo con su densidad electrónica la ionosfera se divide en tres regiones: la región D (50-90 km de altitud), la región E (90-150 km de altitud) y la F (150-1000 km de altitud). Las características y propiedades de estas capas cambian continuamente de acuerdo a los factores mencionados anteriormente (Ver Fig. 1.12). El estudio de la ionosfera ha permitido el desarrollo de las tele y radio comunicaciones, por lo mismo, los disturbios que se presentan en ella tienen consecuencias significativas en estos ámbitos.

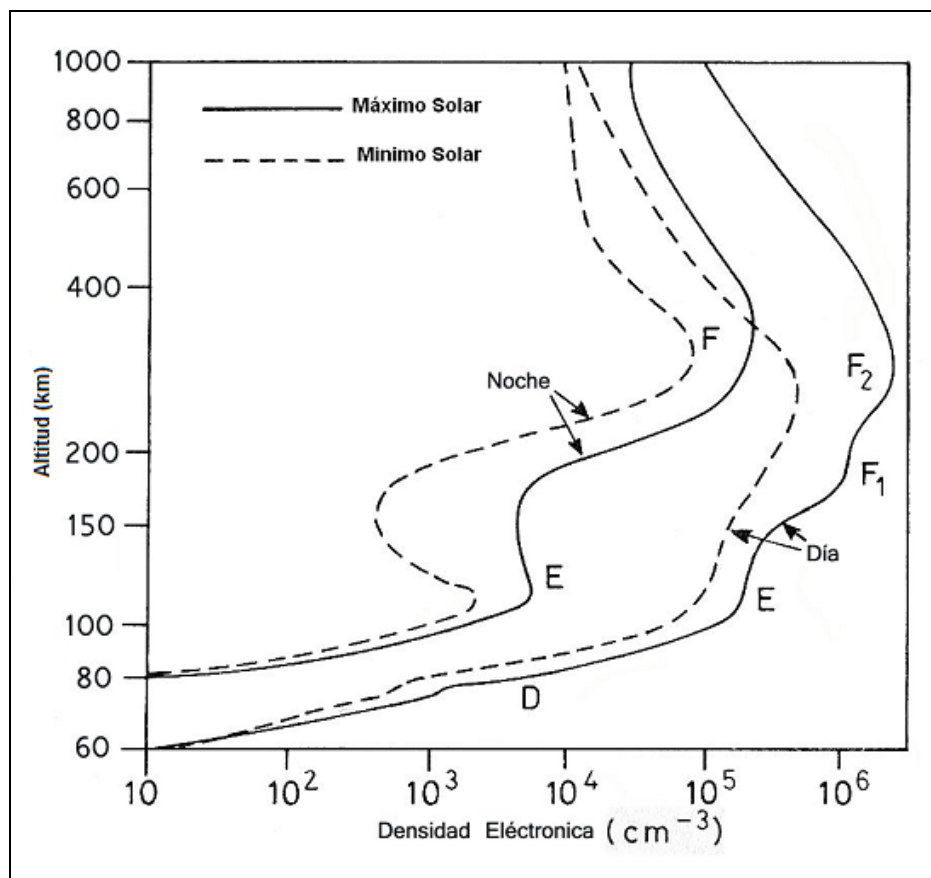


Figura 1.12 Perfil de la densidad electrónica en la ionosfera de acuerdo a la altura. Se observan las diferencias entre máximo (línea sólida) y mínimo (línea punteada) de actividad solar (tomada de Gombosi, 1998).

### 1.3 EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

La Tierra posee un campo magnético intrínseco que puede considerarse como un dipolo con componentes multipolares residuales, caracterizado por presentar variaciones espaciales y temporales. La parte dipolar del campo geomagnético está inclinado  $11.5^\circ$  con respecto al eje geográfico de la Tierra ( $6.5^\circ\text{N}$ ,  $161.8^\circ\text{E}$ ) (Ver Fig. 1.13). En 1832 Gauss estableció que 95% del campo geomagnético es de origen interno y es llamado campo principal, mientras que el 5% restante proviene de factores externos.

Con la misión satelital MAGSAT (Langel, 1982), por primera vez se obtuvo una representación detallada del campo magnético terrestre. Las fuentes internas del campo geomagnético se localizan principalmente en dos regiones de la Tierra: el núcleo externo y la corteza terrestre.

El **campo principal** se origina en el núcleo externo líquido mediante el mecanismo de dínamo-autoinducido. La corriente eléctrica en el núcleo externo es generada por los gradientes de temperatura que dan lugar a la convección, generando un campo magnético cuya intensidad promedio es de  $\sim 5 \times 10^4$  nT. Este campo genera a su vez más corrientes eléctricas, de tal forma que el sistema continúa estimulándose a sí mismo.

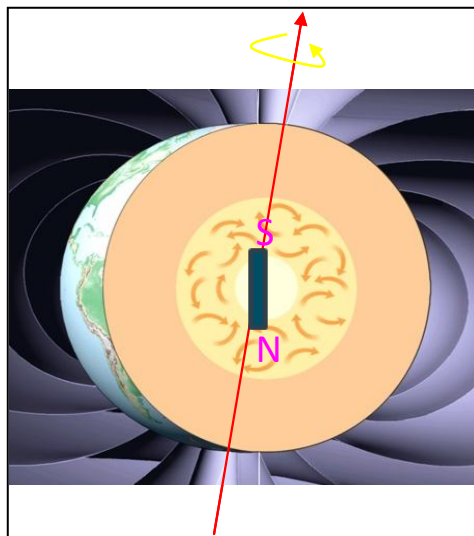


Figura 1.13 Representación del campo magnético terrestre.  
(Tomada de [www.greenfacts.org](http://www.greenfacts.org)).



El campo principal no es uniforme, presenta variaciones que van de fracciones de segundo hasta millones de años con alternancias de alta y baja intensidad. Según la teoría más aceptada el responsable de las irregularidades es el movimiento turbulento del material conductor en el núcleo externo. El campo principal presenta en intensidad y dirección cambios temporales lentos y progresivos denominados variaciones seculares (Amory, 2008). A grandes rasgos, el origen de estas variaciones está determinado por: 1) cambios del campo no dipolar de períodos cortos (> 2000 años) y 2) cambios del campo dipolar. Las características más importantes de la variación secular muestran la deriva hacia el oeste de las componentes no dipolares, la desviación hacia el norte de la componente dipolar y los cambios del momento magnético del dipolo axial. También inversiones de la polaridad cuya frecuencia es muy variable; se sabe que en los últimos cuatro millones de años de evolución, han ocurrido once inversiones.

Por otra parte, **el campo de origen externo** es el resultado del efecto ejercido por sistemas de corrientes producto de la interacción entre la radiación y partículas energéticas solares y el campo magnético terrestre, modulada por el ciclo de actividad solar. También contribuyen las marea atmosférica producidas por la Luna. El campo externo tiene variaciones magnéticas permanentes y transitorias. Las permanentes están asociadas al ciclo día-noche llamadas variaciones diarias y el ciclo lunar (variación de 28 días), mientras que las transitorias se relacionan con la ocurrencia de tormentas magnéticas, subtormentas magnéticas y pulsaciones geomagnéticas, que son producto de la actividad solar.

El campo geomagnético total se obtiene considerando todos los elementos anteriores.

La intensidad del campo geomagnético la podemos especificar por medio de los llamados elementos magnéticos, H (intensidad horizontal, siempre positiva), D (declinación magnética, positiva del norte geográfico hacia el este), I (inclinación magnética, positiva cuando la intensidad se inclina hacia abajo). La intensidad geomagnética total en el ecuador geográfico y cerca de los polos de la Tierra es de aproximadamente  $3 \times 10^4$  nT y  $6 \times 10^4$  nT, respectivamente y cambia en el transcurso del día en alrededor de 2 nT en el ecuador y 5 nT en los polos. Los observatorios

magnéticos indican que la intensidad del campo magnético terrestre en los últimos 100 años ha disminuido ~ 0.05% al año.

### 1.3.1 ÍNDICES GEOMAGNÉTICOS

Los **índices geomagnéticos** son usados para obtener una descripción detallada del comportamiento de las perturbaciones geomagnéticas relacionadas con el ciclo de actividad solar. De acuerdo a la manera en que se obtienen se clasifican en K y A.

Los **índices K** representan el comportamiento de perturbaciones irregulares del campo geomagnético en un periodo de tiempo de tres horas y su valor va de 0 a 9. Están relacionados con la actividad ionosférica. El índice K se clasifica en: Ks y Kp. El **índice Ks** estandarizado elimina perturbaciones que no tienen que ver con las variaciones del campo geomagnético y que no deben ser tomadas en cuenta. El índice geomagnético global llamado **Kp** es la media de los índices Ks distribuidos en el planeta y nos da una visión global sobre la actividad geomagnética terrestre.

Por otra parte, los **índices A**, llamados también de amplitud equivalente, se derivan de los índices K y del promedio de las 24 medianas mensuales de los valores bajos de números de manchas solares, indican las perturbaciones diarias en la vecindad de un observatorio. Se dividen en: el **índice ap**, que se deriva del índice Kp descrito anteriormente y el **índice Ap** que se obtiene de la media de los ocho valores de ap para cada día.

### 1.4 LA MAGNETOSFERA COMO RESULTADO DE LA INTERACCIÓN SOL-TIERRA.

Como ya se mencionó, el campo geomagnético, según las teorías más aceptadas, es de origen interno (Blackett 1949, Elsasser 1950). La acción del viento solar sobre este campo genera una cavidad de plasma magnetizado llamada *magnetosfera*, que protege a la Tierra de la llegada directa del plasma y las partículas energéticas provenientes del Sol.

En el Sistema Solar, todos los planetas poseen un campo magnético intrínseco de gran escala detectable salvo Venus, Marte y Plutón. Los primeros datos reales de la

magnetosfera terrestre los obtuvieron las misiones Explorer X (Heppner et al, 1963) y Explorer XIV (Cahill, 1964). Recientemente misiones como CLUSTER, ACE y WIND estudian y monitorean la dinámica magnetosférica (Phan et al., 2006). El viento solar y el campo magnético interplanetario debido a su interacción dinámica con los planetas, determinan la topología y dimensiones de las magnetosferas. Dentro de éstas el campo magnético planetario domina la dinámica de las partículas cargadas de un gran rango de energías que va de  $10^2$  a  $10^6$  eV.

La magnetosfera no aísla completamente a un planeta del plasma solar, una fracción de éste logra entrar y genera diversos procesos dinámicos muy complejos en la atmósfera planetaria y su entorno.

Para el caso específico de la Tierra, la magnetosfera es dividida en tres regiones principales: la onda de choque, la magnetopausa y la magnetofunda. (Ver Fig. 1.14).

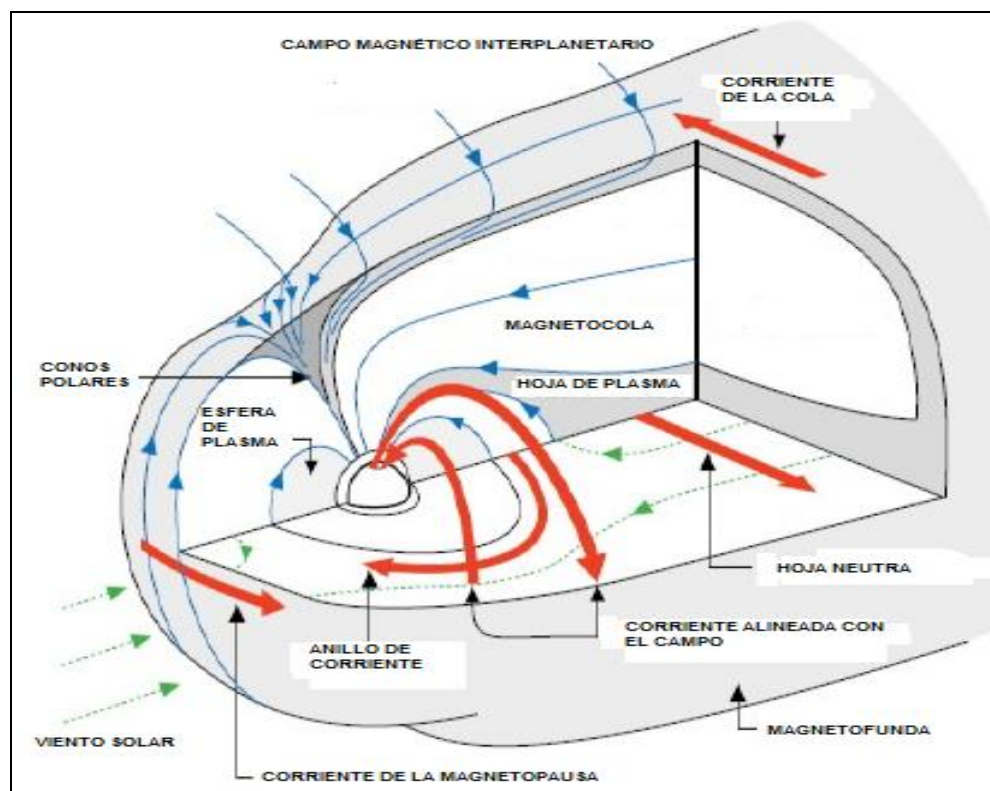


Figura 1.14 Elementos de la magnetosfera terrestre y su sistema de corrientes (tomado de [www.astro.if.ufrgs.br](http://www.astro.if.ufrgs.br)).

La velocidad con que se propaga el viento solar es supermagnetosónica, de tal forma que supera la velocidad de las ondas que se transmiten en él. Esto hace que cuando el viento solar encuentra al campo magnético terrestre, se genere una discontinuidad en el medio. En esta región llamada *onda de choque*, las propiedades del plasma cambian bruscamente. Las ondas generadas son deflecionadas por el viento solar arrastrándolas alrededor de la cavidad magnetosférica.

La magnetopausa es la región determinada por el balance entre la presión dinámica del viento solar y la presión que ejerce el campo magnético de la Tierra (Russell et al., 2007). En promedio se extiende  $10 R_t$  en el sector diurno y por varios miles de  $R_t$  en el sector nocturno.

La *magnetofunda* es una región turbulenta comprendida entre la onda de choque y la magnetopausa. Aquí el plasma es calentado (hasta  $\sim 5 \times 10^6$  K), comprimido y desacelerado ( $\sim 250 \text{ km s}^{-1}$ ). Hay una conversión gradual de energía cinética en energía térmica debido a la compresión del gas.

La magnetosfera nunca está en equilibrio, sufre cambios globales en los que se reestructura la distribución de plasma y de campo magnético. Puede dividirse en subregiones de acuerdo a sus características físicas y electromagnéticas. La primera es la *plasmaesfera* (o esfera de plasma) que es la porción del plasma ionosférico en forma de anillo que rota con el planeta. Dentro de la plasmaesfera, a la altura del ecuador están los *cinturones de Van Allen o anillos de radiación*, que son regiones donde son atrapadas partículas de altas energías en un rango de energía de  $\sim 0.1$  a más de 30 MeV para los iones y de  $\sim 0.04$  a más de 1.6 MeV en el caso de los electrones, el origen de estas partículas es el viento solar y la parte alta de la atmósfera. Aquí las partículas son reflejadas entre los hemisferios mientras que giran alrededor de las líneas de campo magnético. Este movimiento provoca una deriva hacia el oeste para los iones y hacia el este para los electrones, generando un *anillo de corriente* ecuatorial hacia el oeste. Esta corriente a su vez induce un campo magnético opuesto al terrestre (dirección norte). Cuando la magnetosfera se somete a perturbaciones debidas a la actividad solar, la intensidad en el anillo de corriente se incrementa y como consecuencia se registra un

decremento notable en la componente H del campo geomagnético dando lugar a las tormentas geomagnéticas.

Una **tormenta geomagnética** típica se caracteriza por un incremento súbito en la intensidad de la componente H del campo geomagnético (fase precursora), seguido de una caída de este valor de hasta  $-600$  nT para tormentas de gran intensidad (fase principal) y finalmente una fase de recuperación, donde el campo recobra gradualmente su valor inicial (Ver Fig. 1.15). El índice geomagnético asociado a estas variaciones se llama Dst y se mide en nT.

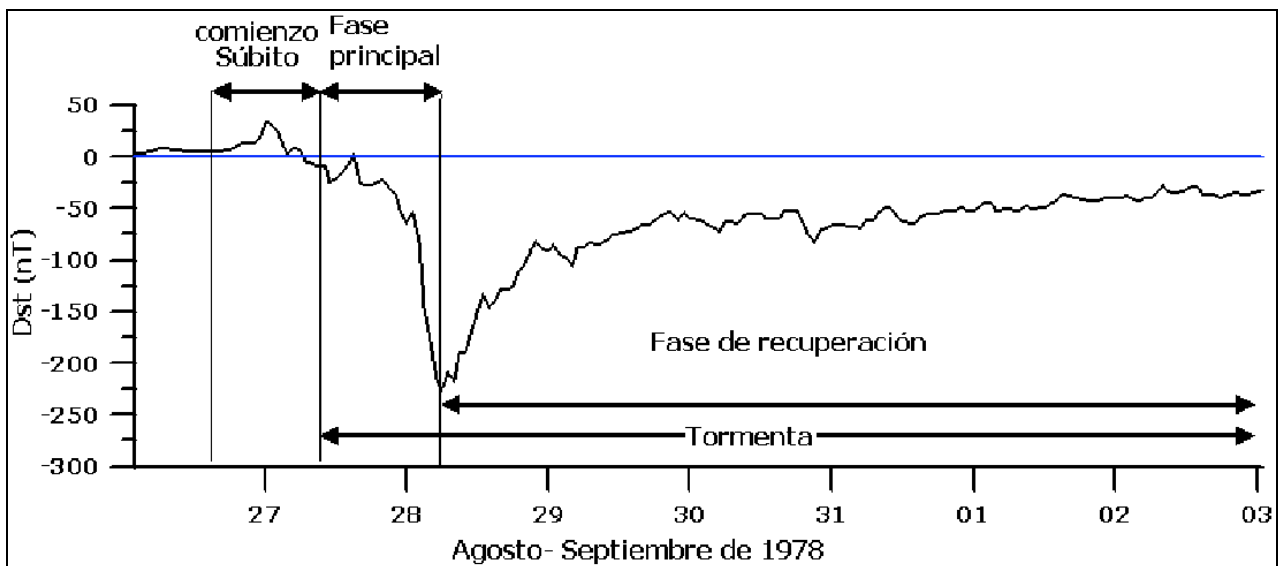


Figura 1.15 Tormenta magnética según la variación de la componente Horizontal del campo geomagnético ( $D_{ST}$ ). (tomada de WDC-C2 for geomagnetism, Kyoto University).

Ya en 1861 Stewart notó la ocurrencia de fluctuaciones en el valor del campo magnético terrestre, con una duración que va de unos segundos a pocos minutos. Estas fluctuaciones, son llamadas **pulsaciones** y son producidas por la interacción del campo geomagnético con la actividad solar. Se clasifican según su periodo (Jacobs et al., 1970) en dos grupos: las continuas o cuasi-sinusoidales que se subdividen en grupos de acuerdo a su frecuencia (Pc-1 en la banda de 0.2-5 Hz hasta Pc-5 en la banda de 1.7-6.7 mHz) y las irregulares que se encuentran en un amplio rango de frecuencias (de 0.025 a 25 Hz).

En el sector noche de la magnetosfera se encuentra la *cola magnetosférica* o *magnetocola* (Piddington, 1960), que es una región muy dinámica formada por dos haces de plasma llamados lóbulos con polaridades opuestas. Las propiedades del plasma en esta zona son muy semejantes a las de la magnetofunta, por lo que posiblemente tiene su origen en ésta. Observaciones recientes de la magnetocola han revelado que a una distancia aproximada de  $16 R_t$  la magnitud del campo magnético decrece a un valor muy pequeño y cambia de dirección abruptamente, de una dirección antisolar a una solar, debido a la existencia de una zona neutra a la altura del ecuador. Esta zona neutra se caracteriza por tener una configuración de las líneas de campo cerradas y un campo magnético muy débil denominada *hoja de plasma*; sus límites varían con el tiempo y con la actividad geomagnética. Una **subtormenta** ocurre durante un periodo de aumento de energía en la magnetosfera debido a la acción del viento solar, la cual se disipa posteriormente en el sistema magnetosférico. Consta de tres fases: la de desarrollo, la de expansión y la de recuperación. En general, este fenómeno se caracteriza por un incremento y acumulación en los flujos de corriente y energía magnética en la magnetocola, volviéndola inestable, liberara su exceso de energía propagándolo por las corriente alineadas al campo magnético, hasta recobrar su valor inicial. Consta de tres fases: la de desarrollo, la de expansión y la de recuperación.

Los *conos polares* están ubicados en los polos magnéticos terrestres. En estas regiones, las líneas de campo geomagnético están abiertas, lo que facilita la entrada de partículas energéticas provenientes del plasma solar.

Finalmente, la entrada de las partículas solares por diferentes partes de la magnetosfera y su interacción con las partículas y moléculas de la alta atmósfera originan las **auroras**, *boreal* en el polo norte y *austral* en el polo sur, al desexcitarse los componentes atmosféricos emitiendo radiación. Debido a que los elementos más abundantes son el oxígeno y nitrógeno moleculares, generalmente las cortinas aurorales tienen la coloración característica de la emisión de dichos elementos.

## CAPÍTULO 2

### RELACIÓN ENTRE LA PRESIÓN ARTERIAL Y LA ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA-SOLAR

#### INTRODUCCIÓN

Diversos estudios realizados han analizado la posibilidad de que exista una asociación entre la actividad geomagnética y algunos procesos biológicos en la Tierra, específicamente en algunas patologías presentadas en el humano. El estudio de estos problemas es muy complejo, ya que se trata de procesos no lineales e inestables de origen multifactorial. Uno de los problemas en estudio, es el comportamiento de las componentes de la presión arterial (sistólica y diastólica) en presencia de las variaciones de la actividad geomagnética. Como ya se vio en el Capítulo 1, la actividad geomagnética es un resultado del impacto de la actividad solar en nuestro planeta.

Para entender como funciona la presión arterial como una variable inherente a cualquier ser vivo que posee aparato circulatorio, es necesario conocer su anatomía.

Las secciones 2.1 a 2.4 fueron elaboradas con base en la siguiente bibliografía: 1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 18, 19, 20, 21, 22, 27, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 43, 45, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 66, 67, 68, 70, 71, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 96, 97, 98, 99, 102, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 115, 116, 117, 118, 119, 123, 125, 126, 127, 129, 130, 131, 137.

#### 2.1 EL APARATO CIRCULATORIO

Es un sistema cerrado constituido por una serie de vasos sanguíneos por los que viaja la sangre a todo el organismo en dos circuitos a partir del corazón. En el humano lo componen el sistema cardiovascular y el sistema linfático.

El **corazón** es el órgano central del aparato circulatorio. Es un músculo contráctil que actúa como una bomba capaz de mantener el flujo de la macro y micro circulación sistémica, así como el flujo de la circulación pulmonar responsable de la

hematosis<sup>(1)</sup> (Ver Fig. 2.1). Se encuentra situado en la cavidad torácica, entre los pulmones y sobre el diafragma. Lo constituyen tres paredes de diferentes tejidos que, del interior al exterior se denominan endocardio, miocardio y pericardio. El *endocardio* está formado por células epiteliales<sup>(2)</sup> y una parte subendotelial<sup>(3)</sup> con fibras elásticas, colágeno, nervios y vasos sanguíneos. Mientras que el *miocardio* está formado por células contráctiles llamadas miocitos y el intersticio, que le sirve de sostén y nutrición. El *pericardio* es el tejido que envuelve al corazón completamente y se divide en pericardio fibroso y epicardio.

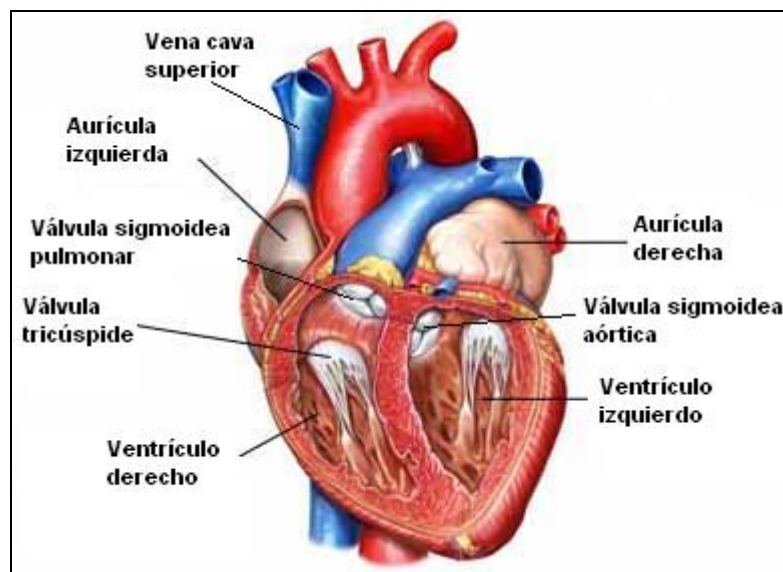


Figura 2.1 Estructura del corazón (tomada de [www.smartimagebase.com](http://www.smartimagebase.com)).

(1) Hematosis: Es el proceso mediante el cual hay intercambios gaseosos al interior de los alveolos pulmonares que dan como resultado la oxigenación y la extracción del anhídrido carbónico de la sangre.

(2) Epitelio: es el tejido formado por una o varias capas de células que recubren todas las superficies libres del organismo, y constituyen el recubrimiento interno de las cavidades, órganos huecos, conductos del cuerpo y la piel.

(3) Subendotelial: es el tejido que se encuentra bajo el epitelio que tiene fibras de colágeno. Ayuda en la hemostasia, mecanismo de retención de la sangre de un organismo cuando hay una lesión.



El tejido del corazón está constituido por las células contráctiles denominadas miocitos (auriculares y ventriculares), que están formadas por miofibrillas encargadas del mecanismo contracción-relajación que impulsa la sangre en el organismo. En las miofibrillas se localizan las dos principales proteínas contráctiles llamadas miosina y actina. Los miocitos y la membrana citoplasmática o sarcolema de las células, forman una red tubular que interactúa con las proteínas del medio para regular la fuerza de contracción. Las principales proteínas que intervienen en el proceso son: actina, miosina, tropomiosina, vinculina, titina, integrina y troponina. Por otra parte, el corazón está dividido en dos partes (izquierda y derecha) que no se comunican entre sí. Éstas a su vez están divididas en dos cavidades superiores llamadas aurículas y dos inferiores denominadas ventrículos, separadas por las válvulas cardíacas auriculoventriculares tricúspide y mitral, las cuales se encuentran revestidas por células ventriculares. Dichas válvulas se abren y cierran continuamente, permitiendo o impidiendo el flujo sanguíneo desde el ventrículo a su correspondiente aurícula. La parte derecha del corazón contiene sangre desoxigenada, procedente de las venas cava superior e inferior, mientras que la parte izquierda del corazón siempre posee sangre rica en oxígeno proveniente de los pulmones, donde pasa por un proceso de purificación, ésta es distribuida posteriormente y sirve para oxigenar los tejidos del organismo a partir de las ramificaciones de la arteria aorta (Ver Fig. 2.2).

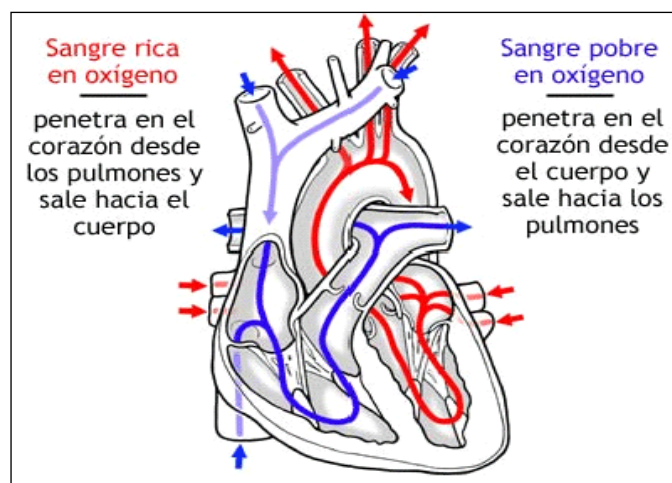


Figura 2.2. Recorrido de la sangre en el corazón (tomada de nlm.nih.gov).

Gracias a los trabajos realizados por Lewis (1920) y Wiggers (1921) a principios del siglo XX quedó establecida la secuencia de eventos que ocurren durante el **ciclo cardíaco** y que pueden ser resumidas en los siguientes pasos: 1) la sístole ventricular se inicia con la activación eléctrica y la elevación de la presión ventricular, este periodo se le conoce como fase de contracción isovolumétrica; 2) previo al ascenso de la presión intraventricular, las presiones auriculares y ventriculares son iguales, asciende la presión ventricular y se produce el cierre de las válvulas, originando el primer ruido cardíaco y produciendo un discreto abombamiento hacia las aurículas; 3) inicialmente las válvulas sigmoideas permanecen cerradas por la contracción isovolumétrica ventricular en la cual no existen cambios significativos del tamaño ventricular; 4) en el momento en que la presión intraventricular supera la presión aórtica y gracias al acortamiento de las fibrillas miocárdicas pulmonares, las válvulas se abren y se produce la expulsión sanguínea.

El movimiento cardíaco se lleva a cabo mediante dos mecanismos principales denominados sístole y diástole.

### **2.1.1 LOS PROCESOS DE SÍSTOLE Y DIÁSTOLE**

La **sístole** se caracteriza por la contracción isovolumétrica del músculo cardíaco con la correspondiente expulsión de sangre. Durante este proceso se distinguen los siguientes eventos: 1) *precarga*, que se caracteriza por el incremento de la presión del volumen sanguíneo sobre la pared ventricular al final del periodo diastólico (tensión por  $\text{cm}^2$ ); 2) *poscarga* o momento en que se presenta la contracción y 3) *contractilidad*, que es el reflejo de la velocidad y capacidad de acortamiento instantánea de la fibra miocárdica a una carga determinada. Durante la sístole intervienen los siguientes componentes celulares: a) la *miofibrilla*, que es responsable de la interacción de los filamentos gruesos y delgados durante el proceso; b) la *mitocondria*, que aporta la energía mediante la molécula de adenosín trifosfato (ATP); c) la *red tubular* formada por la membrana celular denominada sistema-T, que se encarga de la transmisión de la señal eléctrica de la parte exterior del sarcolema al interior de la célula; d) el *retículo sarcoplásmico* (RS) que toma y libera iones de calcio durante la contracción; e) la *cisterna terminal* del RS, que es

el sitio de captación de los iones de calcio; f) el *sarcolema* encargado del control de los gradientes iónicos; g) el *núcleo*, donde se lleva a cabo la síntesis de proteínas y h) los lisosomas, que son los encargados de la digestión y proteólisis intracelular.

Durante el proceso de **diástole** el músculo cardíaco se relaja, permitiendo así que se lleve a cabo el llenado de las cavidades. Empieza antes del cierre de la válvula aórtica y se prolonga hasta el inicio de la apertura mitral, influyen los procesos de precarga y poscarga descritos anteriormente, así como la frecuencia cardíaca y la sincronía de la activación ariculoventricular.

### 2.1.2 OTROS PROCESOS Y COMPONENTES

Para que se origine la contracción sincronizada de la masa muscular, es necesaria la intervención del **sistema de conducción**, el cual está constituido por estructuras altamente especializadas que en forma de nodos, haces y ramificaciones son los encargados de generar y conducir a todo el corazón los impulsos eléctricos que provocan la contracción. El **nodo sinusal** también llamado marcapasos cardíaco, es la región situada en la parte superior de la aurícula derecha donde se origina el impulso eléctrico que desencadena la contracción. El corazón late en promedio setenta veces por minuto y bombea todos los días el equivalente a unos 10.000 litros de sangre.

Por otra parte, los **vasos sanguíneos** (arterias, capilares y venas) son conductos musculares elásticos que distribuyen y recogen la sangre de todos los rincones del cuerpo. Las **arterias** son los vasos sanguíneos que nacen en los ventrículos y que llevan la sangre, ya sea rica o pobre en oxígeno, desde el corazón hasta los órganos corporales. Están formadas por tres capas concéntricas de tejido con características funcionales diferentes. De adentro hacia afuera se distingue primero una capa de células endoteliales llamada *íntima*, que es la que está en contacto directo con la sangre. La segunda capa está constituida por células musculares lisas dispuestas en forma espiral llamada capa *muscular* o media de espesor variable de acuerdo al vaso del que se trate, ésta capa es la responsable del control de la presión arterial. La última capa está formada por tejido conectivo llamada *adventicia* cuya función es la de protección. La lesión del endotelio propicia respuestas diferentes a estímulos que normalmente causan vasodilatación como la

sustancia denominada *factor relajante endotelial*. Una enfermedad derivada de las lesiones en el endotelio da origen a la aterosclerosis.

Las grandes arterias que salen desde los ventrículos del corazón van ramificándose y haciéndose más finas hasta que por fin se convierten en **capilares**, vasos tan finos que a través de ellos se realiza el intercambio gaseoso y de sustancias entre la sangre y los tejidos. Una vez que se da este intercambio sangre-tejidos a través de la red capilar, los capilares van reuniéndose en vénulas y venas por donde la sangre regresa a las aurículas del corazón (Ver Fig. 2.3).

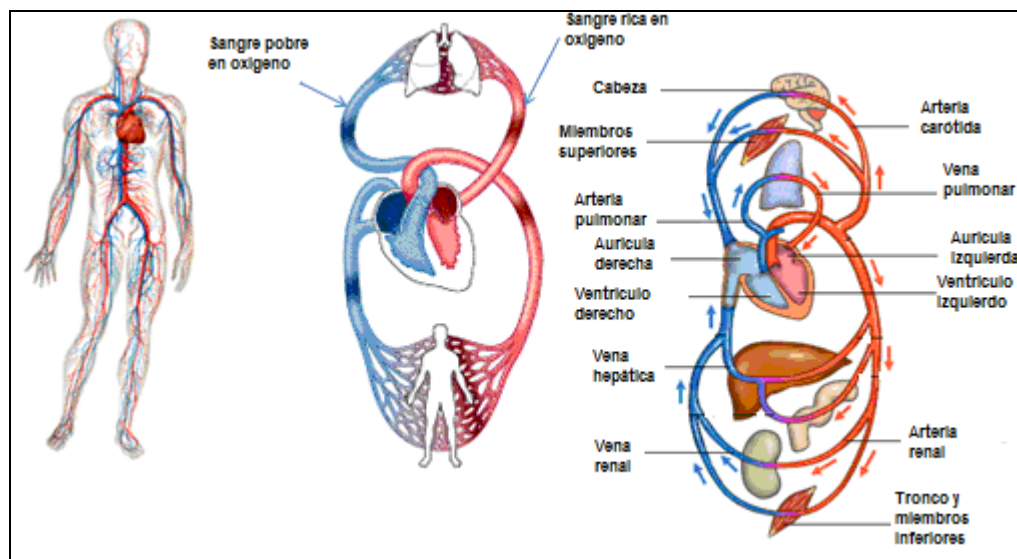


Figura 2.3 Esquema del sistema circulatorio humano y la red capilar (tomada de junta deandalucia.es).

Las **arteriolas** son ramificaciones de las arterias pero de menor dimensión, poseen una capa muscular gruesa y una red nerviosa vasomotora, son las encargadas de regular la presión arterial y llevar la sangre hacia los capilares.

Del corazón salen dos arterias:

1. Arteria pulmonar: sale del ventrículo derecho y lleva la sangre a los pulmones.
2. Arteria aorta: sale del ventrículo izquierdo y se ramifica; de esta última arteria salen otras principales entre las que se encuentran:
  - Las carótidas: aportan sangre oxigenada a la cabeza.
  - Subclavias: aportan sangre oxigenada a los brazos.

- Hepática: aporta sangre oxigenada al hígado.
- Esplénica: aporta sangre oxigenada al bazo.
- Mesentéricas: aportan sangre oxigenada al intestino.
- Renales: aportan sangre oxigenada a los riñones.
- Ilíacas: aportan sangre oxigenada a las piernas.

La **sangre** es el fluido que circula por todo el organismo a través del sistema circulatorio, es un tejido líquido, compuesto por agua y sustancias orgánicas e inorgánicas (sales minerales) disueltas, que forman el plasma sanguíneo y tres tipos de elementos principales llamados formas o células sanguíneas: glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas. Una gota de sangre contiene aproximadamente unos 5 millones de glóbulos rojos, de 5.000 a 10.000 glóbulos blancos y alrededor de 250.000 plaquetas. Los glóbulos rojos, también denominados *eritrocitos* o hematíes, se encargan de la distribución del oxígeno molecular (O<sub>2</sub>). Los glóbulos blancos o *leucocitos* participan en el Sistema Inmunológico al efectuar trabajos de limpieza (fagocitos) y defensa (linfocitos). Mientras que las *plaquetas* son fragmentos de células muy pequeños, sirven para bloquear las heridas y evitar hemorragias. El **plasma sanguíneo** es la parte líquida de la sangre donde están inmersos los otros componentes, lleva los alimentos y las sustancias de desecho recogidas de las células.

El sistema cardiovascular se complementa con el **sistema linfático**. Lo constituye un conjunto de vasos cuya función principal es la de colectar el líquido de los espacios tisulares así como las moléculas que no son transportadas por los vasos sanguíneos para verterlas en la circulación venosa a través de los conductos torácico y linfático. Su circulación es unidireccional y lenta. Está constituido por el bazo, el timo, los ganglios linfáticos y la médula ósea.

## 2.2 EL PAPEL DEL SISTEMA NERVIOSO AUTÓNOMO

La existencia anatómica y funcional del sistema nervioso autónomo se planteó desde el siglo XVIII con las observaciones de Galvani. En 1921 Loewi mostró la forma en que se transmite el impulso eléctrico entre el nervio y el órgano efector (arteria, vena, corazón, etc.), cuya respuesta puede ser excitadora o inhibidora . El

sistema nervioso autónomo se encarga de regular las funciones autónomas o involuntarias en todo el organismo, entre las que se encuentran por ejemplo los latidos cardiacos, la contracción y dilatación de los vasos sanguíneos, la respiración, los movimientos intestinales. Es activado principalmente por centros nerviosos situados en la médula espinal, el tallo cerebral e hipotálamo, así como en algunas regiones de la corteza cerebral como la corteza límbica, donde se pueden transmitir impulsos a los centros inferiores influyendo en el control autónomo (Ver Fig. 2.4).

El sistema nervioso autónomo se divide en dos partes que trabajan coordinadamente: el **sistema nervioso simpático**, también llamado adrenérgico, libera adrenalina y noradrenalina como neurotransmisores, y lo constituyen una cadena de ganglios. La adrenalina incrementa la frecuencia cardiaca seguida de un aumento de la presión arterial. Este sistema se encuentra implicado en actividades que requieren gasto de energía. La estimulación de los nervios simpáticos produce vasoconstricción, lo que a su vez produce elevación inicial de la resistencia vascular que trae consigo un aumento de la presión arterial.

El **sistema nervioso parasimpático** también llamado colinérgico, se encarga de las funciones y actos involuntarios, lo forman ganglios aislados y libera la acetilcolina como neurotransmisor. Esta última inhibe la frecuencia cardiaca y produce vasodilatación en las arterias de resistencia, bajando la presión arterial. Se encarga de la producción y el restablecimiento de la energía corporal.

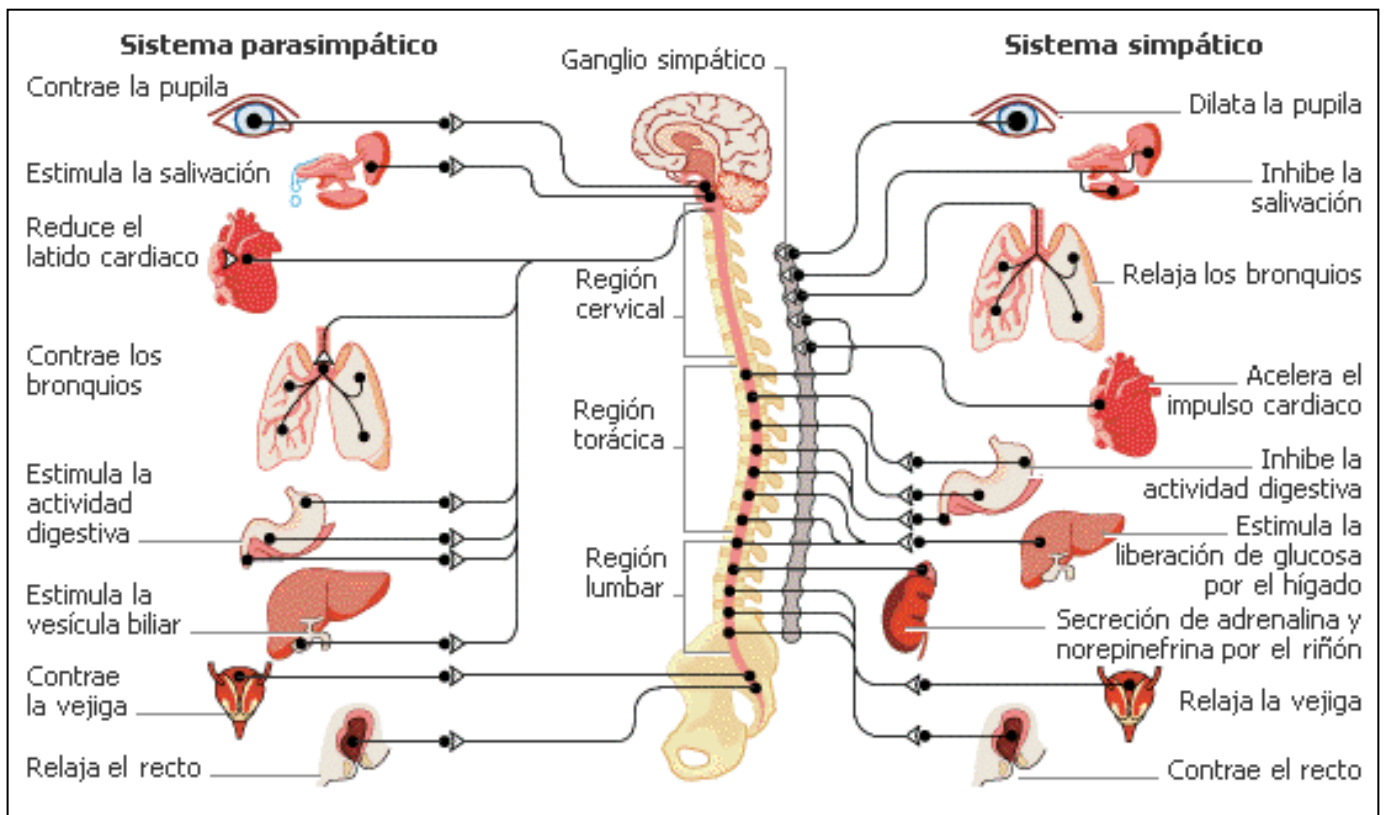


Figura 2.4. El sistema nervioso autónomo. (Tomada de [images.encarta.msn.com](http://images.encarta.msn.com)).

Por otra parte, las moléculas receptoras de los neurotransmisores se encuentran en las células del órgano efector. En el exterior de la membrana celular se llevan a cabo las primeras reacciones químicas, que a su vez generan reacciones secundarias al interior de la célula causando la reacción o efecto. Los receptores simpáticos se denominan  $\alpha$  y  $\beta$ . En el caso del corazón que tiene inervación parasimpática predominan los receptores  $\beta$ , cuya estimulación provoca taquicardias. En las arterias predominan los receptores  $\alpha$ , en este caso su estimulación ocasiona vasoconstricción, aumento de la resistencia vascular y de la presión arterial.

La resistencia que opone la pared arterial a la fuerza de la sangre (tono de la pared arterial) es fundamental en la presión arterial. Este mecanismo es controlado por el sistema nervioso autónomo y por las hormonas que se encuentran en la pared arterial, así como las que trae la sangre.

## 2.3 LA PRESIÓN ARTERIAL (PA)

Hales (1677-1761) descubrió que la PA es la que ejerce la sangre sobre las paredes de arterias y venas. Actualmente se define como la fuerza por unidad de área ejercida por la sangre sobre la pared de las arterias. La PA depende del gasto cardiaco (cantidad de sangre bombeada por el corazón en un minuto) y de la resistencia vascular (resistencia que oponen las arterias al paso de la sangre), que a su vez es producto de la longitud y del diámetro de las arterias de pequeño calibre. Estas últimas cambian de acuerdo a la distancia de la rama arterial respecto al corazón. La presión es menor en las pequeñas arterias de la periferia, llamadas arterias de resistencia, que en la aorta o sus ramas principales llamadas arterias de conductancia.

Para que la fuerza se mantenga es necesario el efecto impulsor de bomba activa combinado con el sistema vascular, si falla alguno de estos elementos desciende el valor de la presión. El corazón mantiene a la presión dentro de límites muy constantes. El sistema arteriolar actúa como un sistema regulador, influido por el sistema nervioso y sus neurotransmisores.

La regulación de la PA está influida por impulsos originados en áreas presorreceptoras situadas en la superficie interna de la aorta y el seno carotídeo, su compresión produce hipotensión, bradicardia y vasodilatación, mientras que la ausencia de presión sobre esa región produce elevación de la PA, taquicardia y vasocompresión.

La PA es una variable continua, puede tomar cualquier valor dentro de un rango numérico el cual está relacionado con la hora del día (variación circadiana), el peso corporal, la estatura y la edad. También influyen factores ambientales tales como la ingesta excesiva de sal, el ruido elevado, estrés, el consumo de nicotina (Ver Fig. 2.5). Su unidad de medida es el pascal (Pa). Actualmente para facilitar su lectura y con base en el esfigmomanómetro (inventado por Rocci en 1891), se usa el milímetro de mercurio (mm Hg) ( $1\text{kPa}=7.5\text{ mm Hg}$ ). Para obtener medidas más precisas de la presión se usa el método auscultatorio combinado con las lecturas del esfigmomanómetro introducido por Korotkoff en 1905. Este aparato mide la PA



de manera indirecta, se supone que la presión usada para ocluir la arteria es la misma que hay dentro de ella.

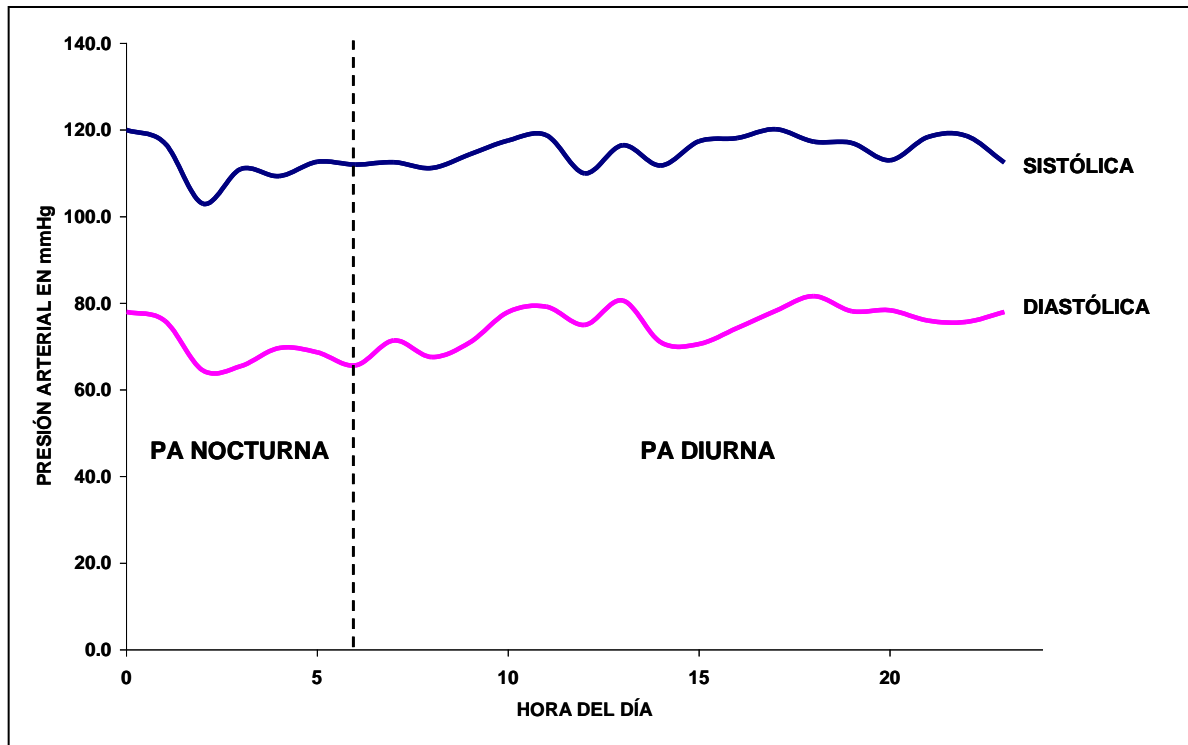


Figura 2.5 Gráfica del comportamiento circadiano de las componentes de la PA en una persona normotensa. (Gráfica elaborada con los valores de la PA de un estudiante normotenso del primer semestre de la ENM y H-IPN).

La PA se expresa con dos valores numéricos asociados a la presión sistólica o máxima (PAS), y la presión diastólica o débil (PAD). De manera general, la presión se expresa mediante la presión media (PAM), la cual se encuentra empleando el siguiente algoritmo:

$$PAM = (PAS + 2PAD) / 3$$

Para individuos normotensos, es decir, aquellos que no tienen fluctuaciones importantes de la presión, los valores establecidos son: para la PAD 60-79 mm Hg y para la PAS 100-129 mm Hg. (Ver Tabla 2.1).

A medida que la sangre fluye a través del sistema circulatorio, la presión disminuye progresivamente hasta casi 0 mm de Hg, para elevarse nuevamente, al final de la vena cava, en la aurícula derecha. La presión en el interior de la aorta es extremadamente alta, alcanzando en promedio 100 mm de Hg.

Tabla 2.1 Clasificación de la PA según el VI reporte del Comité Nacional Conjunto.  
(tomada de [42])

Categoría	PAS (mm Hg)	PAD (mm Hg)
Óptima	~120	~80
Normal	~130	~80
Normal alta	130-139	85-89
Hipertensión (promedio)		
Etapa I	140-159	90-99
Etapa II	160-179	100-109
Etapa III	≥ 180	≥ 110

Actualmente se reconocen tres mecanismos de regulación de la PA que están relacionados entre sí:

- *Reflejo barorreceptor*: barorreceptores<sup>(4)</sup> en varios órganos pueden detectar cambios en la PA y ajustan su media alterando tanto la fuerza y la velocidad de las contracciones de corazón, así como la resistencia periférica total.
- *Sistema renina-angiotensina (RAS)*: Este sistema es generalmente conocido por su ajuste a largo plazo de la presión arterial. Este sistema permite al riñón compensar por la pérdida en el volumen de la sangre o caídas en la PA al activar un vasoconstrictor endógeno conocido como angiotensina II.
- *Liberación de aldosterona*: hormona esteroide liberada desde la corteza suprarrenal en respuesta a la angiotensina II o a altos niveles de potasio en el suero. La aldosterona estimula en los riñones la retención del sodio y la excreción del potasio. Debido a que el sodio es el principal ión que, por ósmosis, determina la cantidad de fluido en los vasos sanguíneos, la aldosterona aumentará la retención de fluido, e indirectamente, la presión arterial.

(4) Barorreceptores: Terminales nerviosas sensibles a los cambios de presión.

Las fluctuaciones importantes en los valores de la presión considerados como óptimos pueden comprometer la salud de los individuos y se clasifican en hipotensión e hipertensión.

La **hipotensión** es definida por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como las cifras menores a 90 mm Hg o bien al descenso de 40 mm de Hg en el valor de la presión sistólica basal del individuo. Lo anterior ocasiona que el organismo no reciba suficiente sangre para realizar sus funciones de forma adecuada. Por tal motivo pueden afectarse el sistema nervioso central, las arterias periféricas, el corazón y los riñones. Entre los síntomas más frecuentes se encuentran: palidez, mareo, náusea, vómito, síncope, dolor de cabeza. La hipotensión se clasifica en: a) *primaria*, que a su vez se subdivide en ortostática y atrofia sistémica múltiple. En el primer caso no hay anomalías neurológicas, mientras que en el segundo hay manifestaciones múltiples del sistema nervioso central, tal es el caso de la enfermedad de Parkinson; b) *secundaria*, que se asocia a enfermedades como la diabetes, el alcoholismo y la anemia entre las más importantes. Para controlar la hipotensión es necesario identificar su origen. Las medidas generales consisten en una dieta alta en sal e ingesta de abundantes líquidos, así como medias de compresión en piernas y movimientos lentos. Los fármacos indicados son la fluorocortisona para retener la sal, los vasoconstrictores y los simpaticomiméticos.

La **hipertensión** es definida por la OMS como las cifras iguales o superiores a 90 mm Hg de presión diastólica y de 140 mm Hg de presión sistólica registradas en reposo. Hay individuos que solo presentan hipertensión en una de las componentes de la presión arterial, aunque la mayoría de los individuos presentan presión limítrofe, caracterizada por cifras normales y elevadas (superiores a 160/90 mm Hg). Los hipertensos leves y moderados son en su mayoría asintomáticos. Los síntomas más frecuentes que presenta un hipertenso son: dolor de cabeza y nicturia (orinar durante horas de sueño). La hipertensión no controlada puede causar lesiones en órganos blanco, que son aquellos que resultan directamente afectados debido a las variaciones de la presión arterial, como el corazón, riñones, cerebro y vasos sanguíneos. El accidente vascular cerebral, la cardiopatía hipertensiva y la apoplejía son las complicaciones que se asocian directamente a la

hipertensión. Se ha encontrado que la hipertensión no controlada es un factor que coadyuva a la esclerosis.

Cuando la hipertensión no está asociada con alguna enfermedad se le denomina *hipertensión esencial o primaria*, y en el caso de ser la manifestación de una enfermedad es llamada *hipertensión secundaria*. Una actividad persistentemente aumentada del sistema nervioso simpático puede ser la causa de la hipertensión arterial primaria, relacionada con la reducción de la sensibilidad de los barorreceptores dando lugar a una falla en la regulación o incremento en la sensibilidad arterial o cardíaca a la actividad simpática. En el caso de la segunda clasificación se encuentran principalmente las personas que tienen enfermedades renales, aunque también está asociada a aquellas personas con padecimientos cardíacos, algún tumor y aquellos que presentan coartación de la aorta (estrechamiento aórtico). Algunas personas desarrollan un tipo de hipertensión secundaria llamada *hipertensión iatrogénica* asociada a un efecto adverso por la ingesta de algunos medicamentos como corticoides (cortisona, prednisona, etc.), así como el uso de anticonceptivos, algunas drogas para reducir peso y la cocaína. Diversos estudios muestran que la hipertensión es un padecimiento en el que hay una predisposición genética o hereditaria desencadenada por estímulos ambientales. (Ver Anexo I).

Existen ***mecanismos nerviosos de regulación*** para la PA inherentes a los organismos, se ha propuesto que un posible trastorno de éstos sea el responsable de las fluctuaciones importantes que provocan hipertensión. Los barorreceptores reducen la frecuencia cardíaca produciendo una vasodilatación refleja regulando el incremento de la presión. Los barorreceptores se encuentran en las arterias carótidas (en ambos lados del cuello) y en el arco aórtico. Estas terminales responden al estiramiento de la pared causado por la elevación de la presión arterial. La señal generada por el incremento de ésta última es enviada al sistema nervioso central quien manda la instrucción de reducir la frecuencia cardíaca y la resistencia periférica a través de los nervios eferentes a los órganos efectores, que en este caso son corazón y arterias.

Los ***riñones*** son órganos fundamentales en la regulación de la presión arterial, ya sea por el control sobre el agua y los electrolitos asociados al volumen sanguíneo o

por su capacidad de secretar *renina*. La renina es una enzima proveniente del tejido renal que al actuar sobre el *angiotensinógeno*, que es un componente de la sangre sobre el que actúa la renina y que genera la angiotensina que es la responsable de la elevación de la presión arterial.

Existen tres variantes de la angiotensina: *angiotensina I*, la cual es inactiva; la *angiotensina II*, altamente vasoconstrictora debido a la acción de la enzima convertora de angiotensina (ECA) y la *angiotensina III* inactiva que es el producto de la degradación final. La ECA favorece la formación de angiotensina y también aumenta la degradación e inactivación de la hormona llamada bradicina que libera el óxido nítrico del endotelio vascular reduciendo así la presión sanguínea. El resultado final es un incremento marcado de la presión arterial. El óxido nítrico es el principal modulador de la función vascular, tiene acción vasodilatadora y actúa como un mecanismo adaptativo mediante el cual el endotelio responde a los cambios en su entorno.

La PA no controlada se asocia con alteraciones del sistema cardiovascular, que a su vez dan origen a otras enfermedades.

a) La hipertensión severa y crónica da lugar a la producción anormal de la angiotensina o el crecimiento del músculo cardíaco, lo que conlleva a la producción de arritmias e hipertrofia ventricular, responsable de que la sangre tenga una deficiencia de oxígeno y nutrientes, misma que llega a los órganos de la periferia.

b) La **aterosclerosis** se caracteriza por el depósito de grasa, fibrina y endurecimiento por calcificación de la pared de las arterias, reduciendo el espacio por donde fluye la sangre hasta llegar a bloquearlo por completo. Este proceso es capaz de desencadenar un infarto cardíaco o cerebral, insuficiencia renal y gangrena de extremidades inferiores entre otros.

c) Otras consecuencias debidas a fluctuaciones importantes en los valores de la PA son la trombosis, embolias y hemorragias cerebrovasculares. La **trombosis** se origina cuando un conjunto de plaquetas se anidan en una región con aterosclerosis formando un coágulo sanguíneo (trombo) que reduce e incluso obstruye la cavidad, originando un infarto cardíaco o cerebral. El **infarto cardíaco** es el resultado de la oclusión de una arteria coronaria por un trombo. El **aneurisma de la aorta** consiste en la separación de las capas del vaso en una zona donde la tensión es muy

grande. La región del vaso pierde su elasticidad y tiende a abombarse para romperse posteriormente. Las lesiones oculares también llamadas **hemorragias retinarias**, son originadas por trombos que a su vez causan escotomas, caracterizadas por zonas negras en el campo de visión. Las **lesiones renales** aunadas a hipertensión y aterosclerosis en los vasos renales causan insuficiencia renal a largo plazo.

Cuando a un individuo se le diagnostica hipertensión es necesario que modifique su estilo de vida aunado a un tratamiento farmacológico que ayuden a regularla. Los medicamentos se basan en los bloqueadores adrenérgicos para los neurotransmisores, que tienen como papel fundamental inhibir la reacción química una vez que se lleva a cabo la unión entre neurotransmisor y receptor. Además de bloquear la posible unión con otros neurotransmisores.

La absorción de un fármaco por los tejidos orgánicos varía de acuerdo a las características fisicoquímicas del fármaco y las del tracto intestinal. La mayoría de los receptores son proteínas que normalmente interactúan con hormonas o neurotransmisores del organismo. Si la interacción del medicamento con este receptor produce un efecto semejante al fisiológico se le denomina agonista, mientras que si lo inhibe o impide la respuesta normal se le llama antagonista. Al ser liberada la noradrenalina de las terminales nerviosas, se une a un receptor en la membrana de las células musculares lisas de las arterias, provocando vasoconstricción, aumentando la resistencia vascular y la presión arterial. Muchos antagonistas actúan uniéndose al receptor y ocupando el lugar del agonista, en tal caso se trata de un bloqueador.

Actualmente existe un gran número de fármacos con características distintas capaces de actuar sobre distintos factores de regulación de la presión, su clasificación de acuerdo al mecanismo con el que actúan es:

- Antiadrenérgicos de acción central y periférica (metildopa, clonidina, reserpina, etc.).
- Bloqueadores  $\beta$  adrenérgicos o de receptores, (propranolol, atenolol, metoprolol, labetalol, etc).
- Vasodilatadores (prazosina, hidralazina, etc.)
- Diuréticos (hidroclorotiazida, indapamida, etc)

- Antagonistas del calcio (verapamil, diltiazem, nifedipina, etc.)
- Inhibidores de la enzima convertidora de la angiotensina I (captopril, enalapril, etc.)
- Bloqueadores de la angiotensina II (losartán, valsartán, etc.)

## 2.4 LA PRESIÓN ARTERIAL Y LOS RITMOS BIOLÓGICOS

### 2.4.1 RITMOS BIOLÓGICOS

La rotación de la Tierra trae consigo periodos de luz-oscuridad asociados a diversos procesos conductuales y fisiológicos en los seres vivos, lo cual sugiere que los organismos están en sincronía con los cambios periódicos ambientales a los cuales están sometidos. Diversas investigaciones realizadas en humanos muestran que esta relación se manifiesta, por ejemplo, en desórdenes de la presión arterial debidas a las variaciones en las condiciones geofísicas (Haldberg 2008(a,b,c,d)).

Estudios realizados con distintos animales mostraron la existencia de un *reloj biológico* responsable de marcar los ciclos. Los ciclos son de duración variable, de acuerdo a su frecuencia se clasifican en: circadianos (~24 hrs), los ultradianos (menos de 24 hrs) y los infradianos (más de 2 días). Los ***rítmicos circadianos*** son todas aquellas funciones endógenas que se manifiestan en un periodo de aproximadamente 24 horas. Entre las funciones que siguen un patrón circadiano se encuentran los cambios hormonales y bioquímicos en todos los sistemas del organismo, la variación de la temperatura corporal durante el día, así como varios aspectos de la fisiología del cerebro como la actividad neuronal y la secreción de neurotransmisores.

La localización del reloj biológico en los mamíferos se llevó a cabo a mediados del siglo XX mediante experimentos realizados en diversas regiones del cerebro, entre los que destacan los de Richter (1967), quien lesionó el hipocampo de ratas y observó que perdían su organización temporal así como parte de su actividad motora, además demostró que las fluctuaciones periódicas del medio ambiente afectan a las oscilaciones internas.

Posteriormente Moore (1972) descubrió que la información luminosa llega desde la retina al ***núcleo supraquiasmático*** (NSQ) a través del *tracto retinohipotálamico* y

encontró que en esta zona se sincronizan los osciladores internos. Por tal motivo, el NSQ es considerado el reloj biológico de varias especies animales, entre ellas el humano, cuya función principal es la de regular diversas funciones orgánicas de forma periódica. Los estímulos externos de luz captados por los organismos a través de la retina, en particular por células denominadas ganglionares tipo W, son los que permiten que el NSQ establezca una coherencia entre los ritmos internos y el ambiente. A esto se le conoce como *sincronización*. Es necesario reajustar el reloj biológico constantemente para que guarde concordancia con los ciclos geofísicos diarios.

El NSQ está constituido por un grupo de células especializadas que se localizan en el hipotálamo. Cada una de sus células tiene la capacidad de generar biopotenciales con una frecuencia de hasta más de 100 ciclos por segundo característicos. Las neuronas de esta zona se caracterizan por utilizar al ácido gama-aminobutírico (GABA) como uno de sus principales neurotransmisores. La región dorsal del NSQ se caracteriza por la presencia de vasopresina, mientras que la región ventral usa como neurotransmisor a la molécula llamada polipéptido vasoactivo intestinal. Además, tiene la propiedad de transmitir señales de tiempo a todos los tejidos finos del cuerpo por medio de hormonas y del sistema nervioso autónomo. Mediante estas señales, los tejidos y órganos ajustan sus oscilaciones en concordancia con los periodos de actividad o reposo (Ver Fig. 2.6).

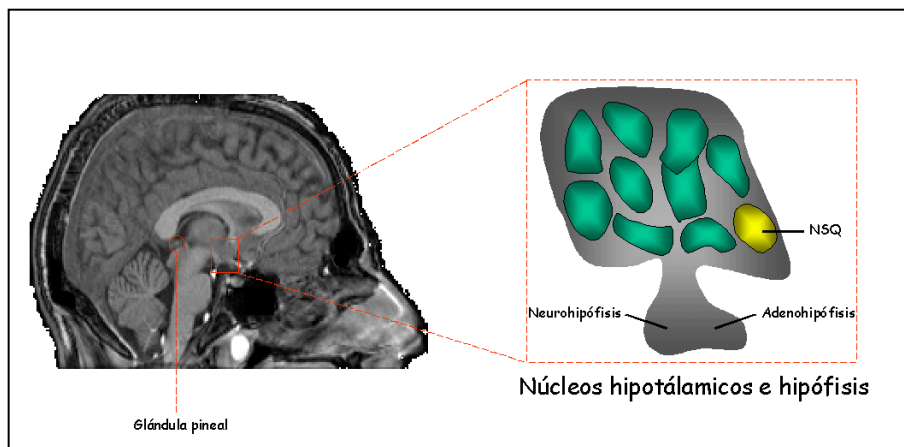


Figura 2.6 Localización del núcleo supraquiasmático en un cerebro humano. (tomada de [www.cronobio.es](http://www.cronobio.es))



Desde el punto de vista molecular, el mecanismo de reloj se lleva a cabo mediante dos sistemas de retroalimentación: uno positivo y uno negativo. En estos procesos intervienen genes específicos que codifican las proteínas generadas durante el proceso, de tal forma que las células se sincronizan. El funcionamiento del sistema de retroalimentación positivo depende de la unión de dos proteínas conocidas como *factores de transcripción* dentro del núcleo de la célula, que reciben los nombres de CLOCK y BMAL1. Esto lleva a la expresión de tres genes denominados *periodo* (*Per1*, *Per2* y *Per3*) y dos genes llamados *cryptocromo* (*Cry1* y *Cry2*). Al salir del núcleo el ácido ribonucleico mensajero, que lleva la información de los genes *per* y *cry*, y fabricarse sus proteínas en el citoplasma, éstas regresan al núcleo e inhiben la expresión de los genes CLOCK y BMAL1 (sistema de retroalimentación negativo). El lapso durante el cual transcurre la expresión de los factores de transcripción se da cada 24 horas. Ciertas alteraciones en la maquinaria molecular del reloj debidas a mutaciones en alguno de sus genes provocan alteraciones en la amplitud, el periodo o la frecuencia de diversos ritmos circadianos.

En 1979 Stephan propuso que los ritmos endógenos se generan por un sistema de multioscilladores, es decir, por más de un reloj. A partir de entonces se planteó la existencia de un reloj sincronizado por el alimento, independiente del NSQ.

Recientemente se ha demostrado que órganos como el hígado, los pulmones, el corazón, el riñón y la corteza y otras estructuras, presentan oscilaciones relacionadas con los genes reloj que persisten hasta 20 días y se atenúan paulatinamente. Lo cual sugiere que el sistema circadiano en mamíferos está formado por un sistema de osciladores que funcionan de manera independiente y jerárquica dirigidos por el NSQ, de tal forma que se logra un acoplamiento y sincronización entre ellos. Los órganos de la periferia transmiten información sobre su estado de oscilación vía la médula espinal y el tallo cerebral al NSQ, donde la información es integrada, permitiéndole ajustar su señal de ritmo según las señales entrantes provenientes del cuerpo y del exterior durante la fase de inactividad a la fase de actividad y viceversa.

Antes de llegar al NSQ y a otros sitios nerviosos centrales, las señales pasan por la *zona ventral del núcleo arqueado*. Esta región del cerebro desempeña un papel esencial para identificar concentraciones de sustancias, producto del metabolismo,

como glucosa, insulina, leptina, grelina y ácidos grasos libres. En el caso del sistema nervioso autónomo, las respuestas del NSQ pueden ser dirigidas a órganos específicos del cuerpo. Tal es el caso del tono de contracción del corazón, durante el periodo activo aumenta mediante la rama simpática del sistema nervioso autónomo. En el periodo inactivo, la rama parasimpática prevalece y el ritmo cardiaco y la presión arterial disminuyen.

El sistema nervioso autónomo dirige la sangre al cuerpo de forma selectiva, regulando la contracción de los vasos sanguíneos. Los vasos sanguíneos en estas regiones deben recibir diversas señales nerviosas autónomas según el momento del día. Tal es el caso de los periodos activos (actividad física) e inactivos (periodo de digestión).

El desfase de los ritmos biológicos no solo origina alteraciones en los periodos de sueño normal, sino también tienen repercusiones en varios niveles en las células del cerebro, del riñón, del sistema inmune y hasta en nuestra conducta y capacidad cognitiva. Los ritmos biológicos también pueden ser alterados por factores genéticos y debido a la presencia de un tumor en la región donde se ubica el NSQ. Una lesión en el NSQ elimina la mayoría de los ritmos circadianos. Cuando el NSQ ha perdido su congruencia temporal y sus señales son arrítmicas, se pierde la sincronía de la actividad del cuerpo al cambio del ciclo luz-oscuridad. Por ejemplo en el caso del cortisol y la glucosa, éstas no aumentan antes del principio del periodo activo y la presión arterial no decrece en el periodo de inactividad o reposo. Se ha demostrado que cuando hay un desfase, otros sincronizadores como el alimento trabajan de forma independiente hasta que se vuelvan a sincronizar.

Otros eventos que pueden causar un desequilibrio del reloj biológico ocurren por ejemplo, con el llamado *jet-lag*, que es el resultado de la pérdida temporal de la sincronía entre un cambio abrupto en el ciclo sueño-vigilia y el tiempo local. También en aquellos relacionados con cambios en los horarios de trabajo. Los trabajadores que laboran durante la noche o turnos de 24 horas presentan problemas cardiovasculares caracterizados por una atenuación del ritmo diurno de presión arterial. Las personas con problemas psiquiátricos como la depresión o ciertos trastornos del sueño también presentan dichos desfases.

Algunos fármacos y la actividad locomotora pueden ser sincronizadores no luminosos, es decir, que actúan a través de otras vías neuronales para reajustar al reloj. Actualmente el mejor método para tratar los diversos síndromes relacionados con desórdenes de los ritmos circadianos es la fototerapia, y en algunos casos se usa una terapia con drogas.

#### **2.4.2 LA MELATONINA**

Durante el sueño se produce **melatonina** (N-acetil-5-metoxitriptamina) que es una hormona producida por la glándula pineal que funciona como un mensajero bioquímico y además se le considera un transductor electroquímico. Esta es vertida al torrente sanguíneo hasta llegar a las células, modificando su funcionamiento. De acuerdo a sus características químicas es hidrofílica (soluble en agua) y lipofílica (soluble en lípidos) lo cual le permite interactuar libremente con los organelos celulares. Su secreción disminuye con la edad, o cuando hay un desfase del reloj biológico debido a un cambio en los ciclos luz-oscuridad.

La glándula pineal está constituida por dos tipos de células: los pinealocitos o células parenquimatosas, encargadas de producir la melatonina a partir del triptófano (aminoácido) y que constituyen el 85% de la masa pineal y las células glias, que constituyen el 15% restante cuya función es sostener a los pinealocitos y a las terminaciones nerviosas. La glándula pineal es un órgano muy vascularizado e innervado por el sistema nervioso simpático irrigado por el torrente sanguíneo. La innervación simpática desde el NSQ conecta a la glándula pineal con las células fotorreceptoras de la retina, lo cual permite que los estímulos luminosos del medio ambiente lleguen a esta zona originando una respuesta endocrina con la producción de melatonina. Permite la adaptación de los seres vivos a las condiciones ambientales tanto internas como externas. La exposición prolongada a la luz provoca en los organismos pinelectomía funcional, pues inhibe la producción de melatonina. La hormona viaja a través del torrente sanguíneo y tiene la capacidad de modificar el microambiente que la rodea, en consecuencia la funcionalidad de las células con las que interactúa. La melatonina sincroniza varios ritmos biológicos en varias especies de reptiles, aves y mamíferos con el ciclo luz-oscuridad, entre ellos se encuentra la temperatura corporal, el ciclo sueño vigilia y el

ciclo de actividad locomotora. En los mamíferos, los receptores de melatonina se distribuyen en la glándula pituitaria, en la retina, en el NSQ del hipotálamo (receptores MT<sub>2</sub> y MT<sub>3</sub>), en la corteza cerebral y cerebelar y en el subiculum, entre otras. Los órganos periféricos que tienen receptores de melatonina son el riñón, el intestino, el bazo, etc., las células endoteliales de las arterias también tienen receptores de melatonina. La melatonina nos ayuda a reparar el daño causado por los radicales libres instalados en los organelos celulares donde hay muchas especies reactivas de oxígeno, su función es la de neutralizar los radicales hidroxilo altamente reactivos, por lo que es considerado un antioxidante endógeno.

Además de las influencias del fotoperíodo sobre la síntesis de la melatonina, se ha observado que la radiación electromagnética de baja frecuencia (~60Hz) inhiben producción de esta hormona (Cherry, 2002; Sandyk, 1993). De tal manera que con base en esta evidencia se ha propuesto que la glándula pineal es un órgano que relaciona a los seres vivos con su ambiente temporal y espacialmente.

### **2.4.3 PRESIÓN ARTERIAL Y RITMOS BIOLÓGICOS**

Se ha demostrado que la hipertensión puede ser tratada con un suplemento de melatonina diario por la noche, el cual resincroniza al NSQ y restaura la variación (Frank, 2004; Simko, 2007) diurna en la presión arterial, además de que disminuye el nivel general de la presión arterial.

Algunas enfermedades muestran una considerable variación diaria, ya sea en la aparición o en la severidad de los síntomas. Accidentes cerebrovasculares y ataques cardíacos ocurren con mayor frecuencia entre las 6:00 am y el mediodía y (García, 2000) la incidencia de ataques de asma es mayor en la noche. Las personas con artritis reumatoide tienden a experimentar sus peores síntomas al despertar por la mañana. El aumento de la incidencia de los ataques cardiovasculares y muerte en la mañana puede ser explicado en términos de fisiología normal circadiana.

## 2.5 INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD GEOMAGNÉTICA EN LA SALUD

En un gran número de estudios se ha mostrado que la actividad solar-geomagnética influye en diversos procesos fisiológicos en los seres vivos. Los resultados indican que los eventos tanto cíclicos como transitorios de dicha actividad pueden llegar a comprometer la salud de los individuos, en particular si ésta se asocia a órganos que presentan actividad eléctrica intrínseca. Tal es el caso del efecto que aparentemente provocan las tormentas geomagnéticas sobre la actividad bioeléctrica en el cerebro (Babayev et al, 2007, Persinger, 2004 y 2005) y el corazón relacionados con infartos al miocardio (Otsuka et al, 2000, Cornelissen et al, 2002). Durante una tormenta se observa un incremento de lípidos y un decremento de oxígeno en la sangre dando como resultado una disminución en el poder de contracción del corazón (Breus et al, 2002), y por tanto una alteración periódica de los ritmos circadianos (Cornélisen 1998).

De la misma manera, se han identificado los efectos de dicha actividad sobre la presión arterial y la secreción de la melatonina. Kirschvink (2001) sugiere que los biosistemas se adaptan a las variaciones del campo geomagnético ya que se observan alteraciones en las componentes circadianas y circaseptanas durante los días con actividad geomagnética intensa respecto a los días quietos. Un ejemplo es la semana biológica en la circulación neonatal humana, la cual presenta variaciones temporales más evidentes que en el día biológico (Breus et al, 2002). Respecto a este problema, se ha sugerido que diferentes organismos presentan una biomineralización magnética y una magnetorrecepción: la frecuencia de resonancia de los iones como el Na, K, Mg y Ca se difunden en un campo magnético débil en aproximadamente un ciclo por semana (Ulmer 2005).

Por otra parte el sistema parasimpático está involucrado en estas variaciones, además la glándula pineal es muy sensible a las variaciones del campo geomagnético (Bartsch, 1994, Semm et al, 1980).

Concerniente también con la presión arterial, las investigaciones sugieren que el incremento de lípidos en la sangre, así como la destrucción de la mitocondria en las cardiopatías y el decremento de oxígeno durante una tormenta geomagnética puede ocasionar un decremento en el poder de contracción en el corazón,

alterando así su ritmo circadiano en diversos periodos de estudio. Lo cual tiene repercusiones importantes en el comportamiento de la presión arterial (Chibisov 1995).

Las investigaciones indican que las componentes celulares de la sangre (leucocitos, eritrocitos, plaquetas) in vitro son sensibles a frecuencias de 0.1-100 Hz (Otsuka, 2001, Ptitsyna, 1998) e intensidades de entre 50-5000 nT (Kononenko et al, 1999). Dichos estudios muestran que el efecto neto de la exposición de los eritrocitos al campo geomagnético es el de cambiar su orientación. Se observa una correlación perceptible entre los valores del Dst y las células sanguíneas (in vitro) con un pico en un intervalo de 7 días (Dasso et al, 2004).

Otros estudios muestran que las variaciones de campo geomagnético influyen en las células barorreceptoras, lo cual se traduce en una variación del baroreflejo arterial (Gmitrov, 2002, 2004 y 2006). Mientras que en otros trabajos de investigación se encontró que con la exposición de la glándula pineal a más de 30 nT decrece la producción de melatonina (Burch et al, 1999; Reiter, 2004).

Estos estudios sugieren que existe un mecanismo mediante el cual la actividad geomagnética regula el ritmo cardiaco.

En resumen, en todos los casos que se estudiaron en este contexto se encuentra que la interacción de la actividad solar-geomagnética y la salud humana tienen las siguientes características (Palmer et al, 2006; Cherry, 2002):

1. Los efectos son más evidentes a altas latitudes
2. La variación del campo geomagnético debido a la actividad solar (tormentas y subtormentas) afectan a un 10-15 % de la población humana.
3. Los organismos son sensibles al rango de frecuencias de 0.1-50/60 Hz, y a cambios en la intensidad del campo geomagnético de 50 nT.
4. Los iones de Ca, Mg, K y Na juegan un papel importante en diversos mecanismos.

## **CAPÍTULO 3**

### **DATOS Y RESULTADOS**

#### **INTRODUCCIÓN**

A lo largo de la historia, la interacción de los seres vivos con su entorno se ha llevado a cabo mediante diversos procesos de adaptación a las condiciones del medio físico que le rodea, como las condiciones atmosféricas o geomagnéticas. Algunos estudios han mostrado que las variaciones del campo geomagnético está asociados al incremento de los accidentes cardiovasculares relacionados con la circulación sanguínea (Gmitrov, 2006). La presión arterial también ha sido objeto de estudio, algunos resultados han mostrado que las características circadianas de la PAS y la PAD cambian en presencia de tormentas geomagnéticas en comparación con los días quietos (Chibisov, 2004), presentando en ocasiones un efecto hipotensivo y algunas veces un efecto hipertensivo.

#### **3.1 DATOS**

El estudio se realizó con los datos proporcionados por Salvador Sánchez de la Peña, investigador de la Escuela Nacional de Medicina y Homeopatía (ENMH) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Se trata de una muestra de 51 estudiantes voluntarios que estudian la licenciatura en medicina del primer semestre de la ENMH del IPN. Fueron 18 hombres y 33 mujeres, aparentemente sanos considerados normotensos con edad promedio de 19 años (el rango de edad es de 18 a 23 años). A estos voluntarios se les integró un expediente médico en el Centro de Investigación Cronómica de la ENMH. Llevaron un diario de sus actividades cotidianas y dieron su consentimiento para participar en el automonitoreo de la Tensión Arterial durante los días comprendidos del 4 de abril al 16 de mayo del 2008 en la Ciudad de México. Este monitoreo generó una base de datos de 11,356 registros para cada una de las cinco componentes de la PA (PAS, PAD, Pp, PAM, FC).

Los detalles sobre la selección de la muestra, así como el control sobre los estudiantes se llevó a cabo por el Dr. Sánchez, quien refiere que durante la toma de datos las personas tuvieron un estilo de vida saludable, es decir, no ingirieron sustancias que alteraran de forma significativa los valores de la presión, tales como el café, tabaco, bebidas alcohólicas o medicamentos; respetaron las horas de sueño y comida y evitaron situaciones de estrés. Este comportamiento minimizó los factores que pudieran influir considerablemente en los valores de la PA. Las personas llevaron además una bitácora donde anotaban cualquier situación relevante que pudiera influir en sus registros.

Al conjunto de datos obtenidos se aplicaron las pruebas estadísticas de Kolmogorov-Smirnov (K-S), el método de épocas superpuestas y la prueba ANOVA, para verificar si existe relación entre los distintos parámetros de la tensión arterial y el campo geomagnético.

El primer método empleado es el K-S descrito en el Apéndice A, con el cual se estudió la relación entre los valores del campo geomagnético y las componentes de la PA de la muestra en general y para el día-noche, dividiendo los grupos por sexo y luego comparándolos. El comportamiento temporal de las series de presión respecto al día de la tormenta magnética se obtuvo al aplicar la prueba de épocas superpuestas. Mientras que la prueba usando el análisis de la varianza (ANOVA) se aplicó para encontrar la significancia estadística del análisis de épocas superpuestas.

De la muestra original eliminamos aquellos datos que presentaban valores extremos en comparación con el promedio de la muestra por considerarlos erróneos (solo se pueden tener valores de la PAS mayores a 180mmHg y de la PAD menores a 40 mmHg), los cuales existen debido a que el instrumento de medición es muy sensible y un movimiento brusco puede alterar la lectura. Una vez realizado el proceso de depuración se localizó el día y la hora exactas en la página del observatorio Geomagnético de Teoloyucan y se asoció el valor de la componente horizontal del campo geomagnético (BH). Obtuvimos una base final de 68,136 datos correspondientes a la PAS, PAD, PAM, Pp, FC y el campo geomagnético.



Como se mencionó anteriormente, los valores de la BH se obtuvieron del observatorio geomagnético de Teoloyucan, en el Estado de México (latitud 19.3° 45' 11 N, longitud 99° 11' 15 O) durante los meses de abril y mayo del 2008. Los datos son registrados electrónicamente cada segundo en Teslas ([www.veso.unam.mx](http://www.veso.unam.mx)). Es importante mencionar que los datos correspondientes a la  $B_H$  no tienen incertidumbre asociada, ya que de acuerdo con los responsables del Observatorio, los datos son procesados por dos métodos para eliminar dicha incertidumbre. El primer método que se usa para reducir la incertidumbre es el de integración gaussiana en el rango  $\pm 45$  seg y el segundo método corresponde al filtro de los picos relacionados con la variación estacional de la señal.

Los valores de las componentes de la PA (PAS y PAD) se tomaron usando los métodos Korotkoff y oscilatorio, usando el Ambulatory Blood Pressure Monitor modelo TM-2421. El instrumento consta de un componente digital que registra y almacena las medidas para su análisis posterior, un mango y un brazaletes ajustable (Ver Fig. 3.1).

El instrumento detecta por dos métodos i) oscilométrico y ii) por los sonidos de Korotkoff. El instrumento se programó para la detección automatizada de las componentes de la presión arterial. Cabe señalar que a cada valor tomado se le asoció el respectivo valor de la BH de acuerdo a la fecha y hora exactas.

## EQUIPO DE MONITOREO DE LA TENSIÓN ARTERIAL AND TM-2421



Figura 3.1 Equipo ABPM usado para medir la presión arterial.

### 3.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA

En esta sección se hace una descripción estadística del comportamiento de las componentes de la presión arterial y del campo geomagnético.

Para su estudio, la muestra se dividió por sexo, así como en día y noche, ya que como se mencionó en el Capítulo 2, los valores de la presión presentan variaciones circadianas y debidas al género. El periodo considerado “día” está en el intervalo de tiempo de las 7:00 a las 22:00 hrs, mientras que el periodo considerado como “noche” corresponde al periodo de las 22:01 a las 6:59 hrs. Los valores de la PA se obtuvieron mediante un monitoreo ambulatorio cada 30 minutos durante el día y cada hora durante la noche.

Durante el periodo de tiempo estudiado se registró un evento energético solar transitorio de acuerdo al reporte del Centro del Ambiente Espacial (NOAA, [www.noaa.gov](http://www.noaa.gov)). Esto originó tres tormentas geomagnéticas moderadas ( $K_p = 5$ ) durante los días 4-6, 23 y 30 de abril.

El comportamiento estadístico según el sexo y los intervalos de tiempo día-noche se advierte en las tablas que se muestran a continuación. Las siglas MÍN y MÁX se

refieren a los valores mínimo y máximo de cada una de las variables, MEDIA corresponde a la media de la muestra y DE a la desviación estándar para cada uno de los grupos.

El comportamiento temporal de los parámetros para cada grupo de datos durante el periodo de tiempo del estudio se muestra en las gráficas correspondientes a las Figuras 3.2 a 3.19. Las líneas verticales señalan los días con tormenta geomagnética.

## **1. MUJERES**

a) *Día.*

Se consideran las 33 mujeres de la muestra.

Tabla 3.1 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y la BH en el caso de las mujeres durante el día.

<b>VARIABLE</b>	<b>MÍN</b>	<b>MÁX</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DE</b>
BH(nT) <sup>(a)</sup>	28118.3	28197.9	28157.4	12.4
PAS <sup>(b)</sup>	79.6	127.5	105.8	6.6
PAD <sup>(c)</sup>	46.0	86.5	65.2	5.7
Pp <sup>(d)</sup>	27.0	76.0	40.5	5.6
PAM <sup>(e)</sup>	58.6	97.0	78.7	5.3
FC <sup>(f)</sup>	53.3	121.3	78.6	9.7

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Presión de pulso (Pp) en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto.

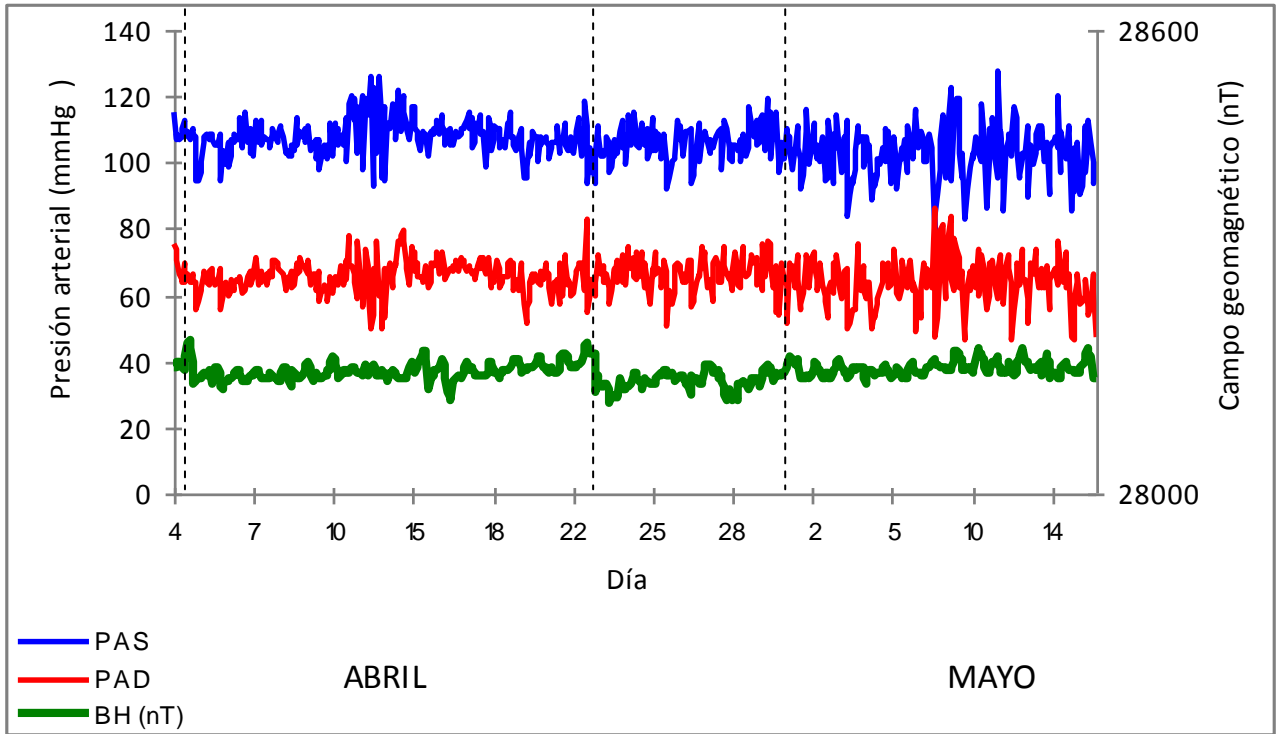


Figura 3.2 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial PAS y PAD y el campo geomagnético (BH) durante el día, para el grupo de las mujeres.

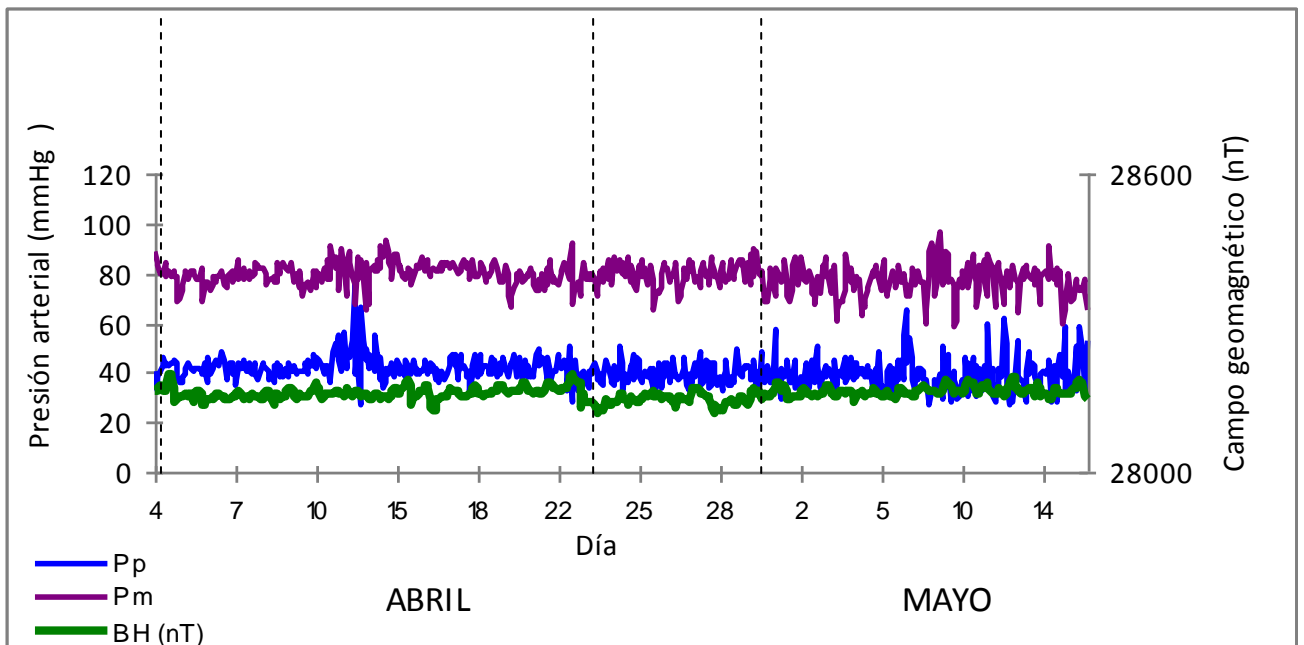


Figura 3.3 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y BH durante el día, para el grupo de las mujeres.

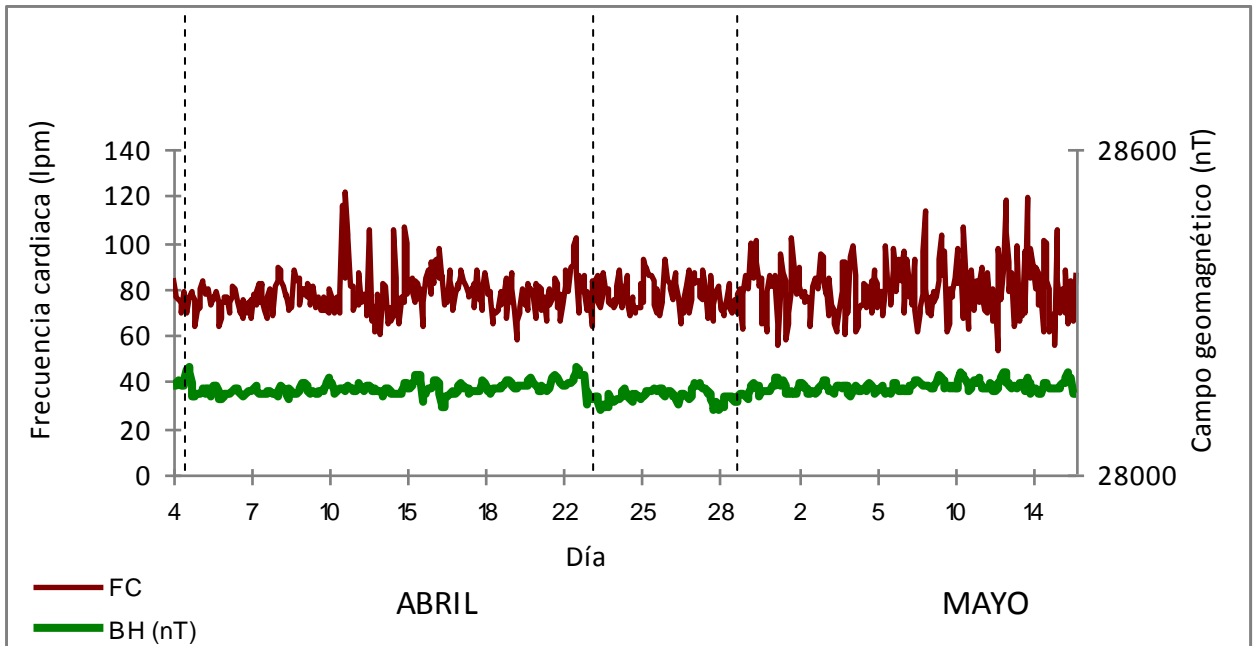


Figura 3.4 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante el día, para el grupo de las mujeres.

*b) Noche.*

Tabla 3.2 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el BH en el caso de las mujeres durante la noche.

VARIABLE	MÍN	MÁX	MEDIA	DE
BH(nT) <sup>(a)</sup>	28114.3	28173.6	28149.9	10.9
PAS <sup>(b)</sup>	74.0	126.0	99.0	7.5
PAD <sup>(c)</sup>	40.0	84.0	59.3	7.2
Pp <sup>(d)</sup>	22.0	59.0	39.7	5.4
PAM <sup>(e)</sup>	51.3	95.3	72.5	6.8
FC <sup>(f)</sup>	42.0	118.0	66.5	9.4

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Presión de pulso (Pp) en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto para el grupo de las mujeres.

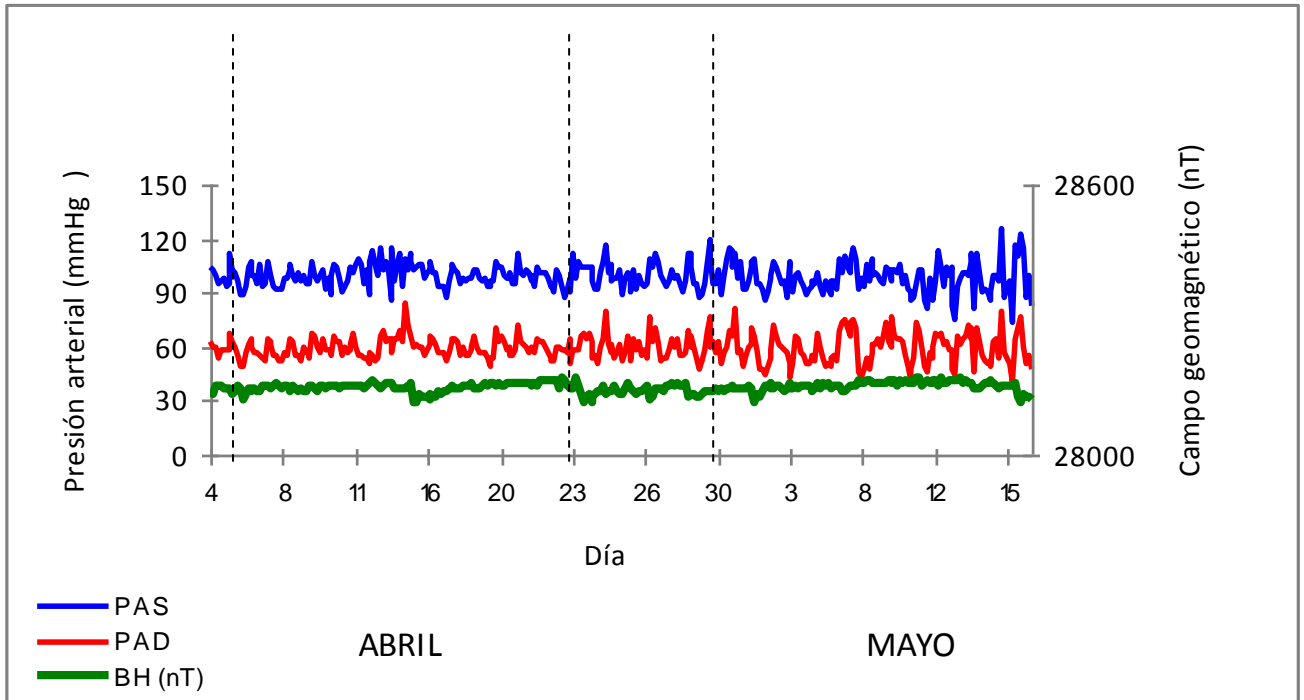


Figura 3.5 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial PAS y PAD y BH durante la noche, para el grupo de las mujeres.

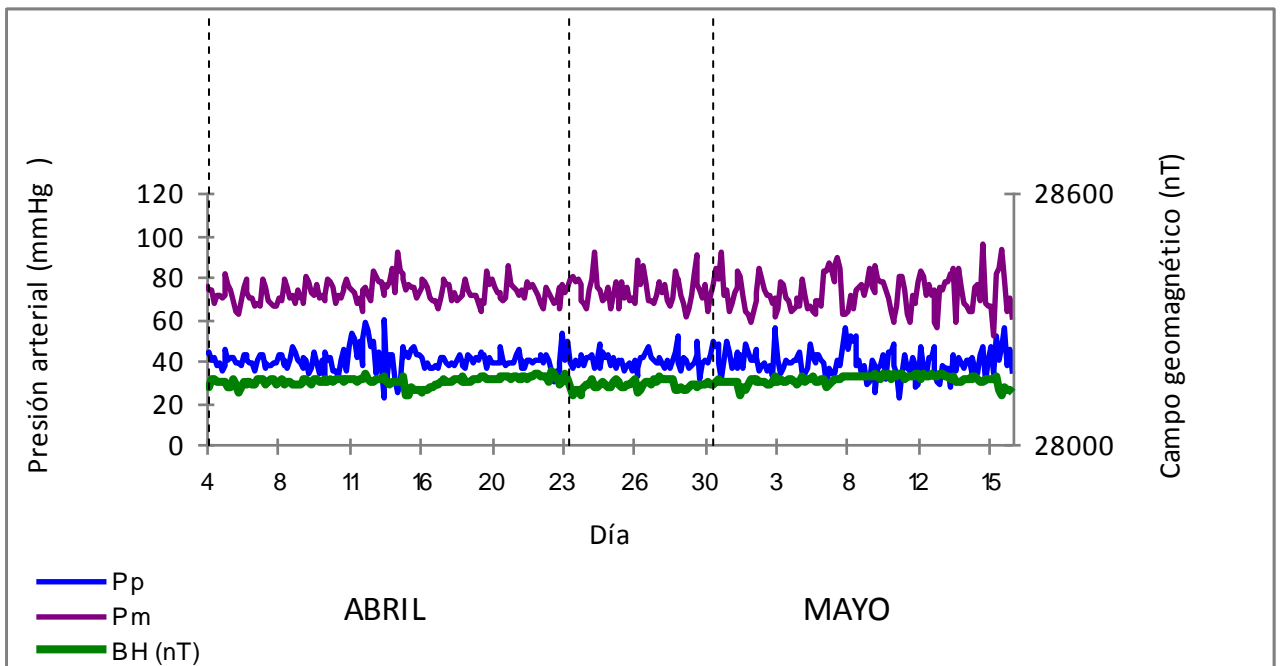


Figura 3.6 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y el campo geomagnético durante la noche, para el grupo de las mujeres.

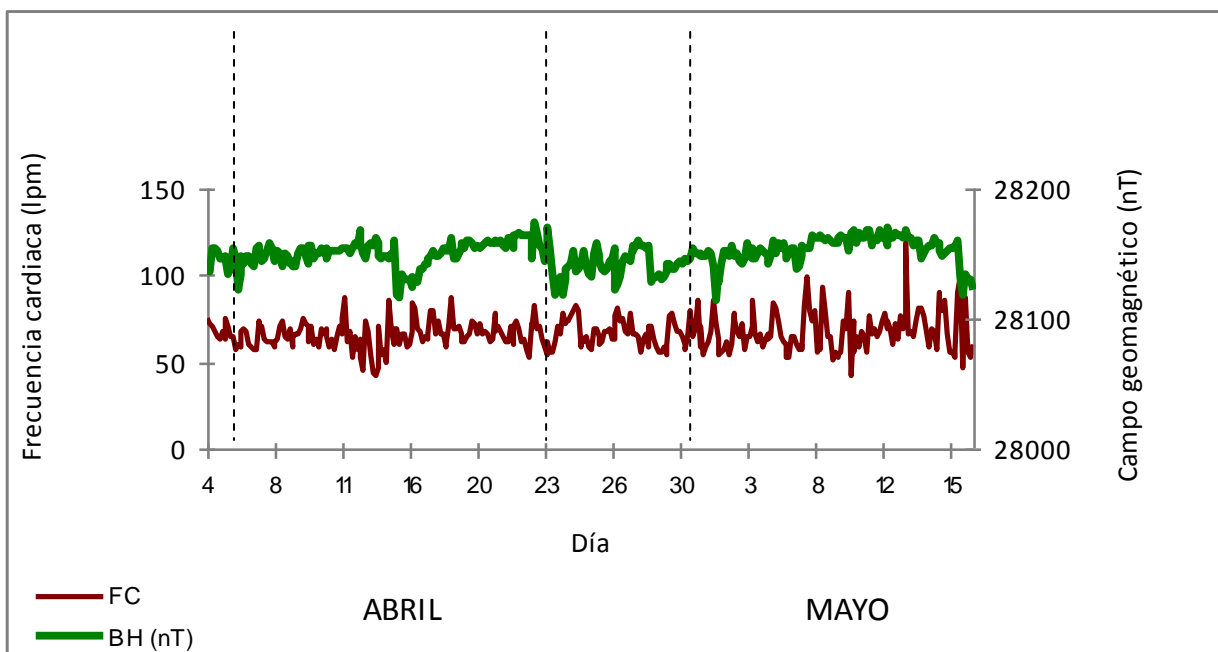


Figura 3.7 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante la noche para el grupo de las mujeres.

## 2. HOMBRES

Se consideran las 18 hombres de la muestra.

a) *Día*

Tabla 3.3 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de los hombres durante el día.

VARIABLE	MÍN	MÁX	MEDIA	DE
BH(nT) <sup>(a)</sup>	28119.4	28199.9	28155.1	12.3
PAS <sup>(b)</sup>	90.7	129.0	113.0	6.1
PAD <sup>(c)</sup>	52.4	86.0	69.3	6.4
Pp <sup>(d)</sup>	24.0	62.0	43.9	5.5
PAM <sup>(e)</sup>	68.2	98.0	83.9	5.8
FC <sup>(f)</sup>	45.0	93.0	74.5	7.5

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Presión de pulso (Pp) en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto.

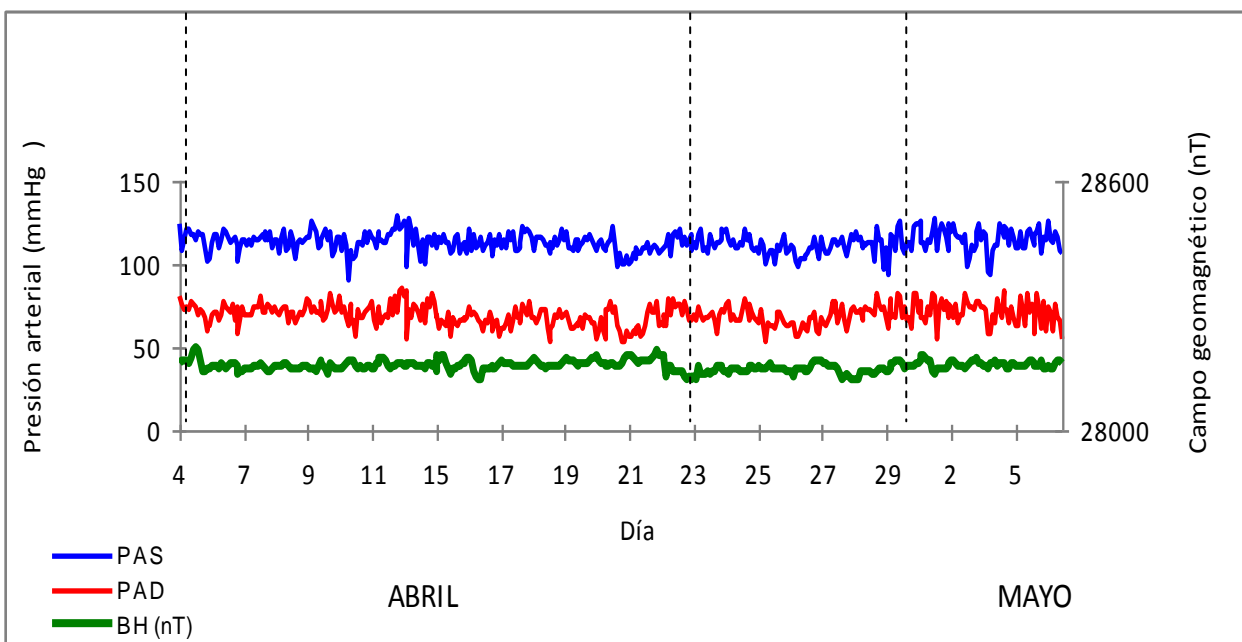


Figura 3.8 Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y BH durante el día, para el grupo de los hombres.

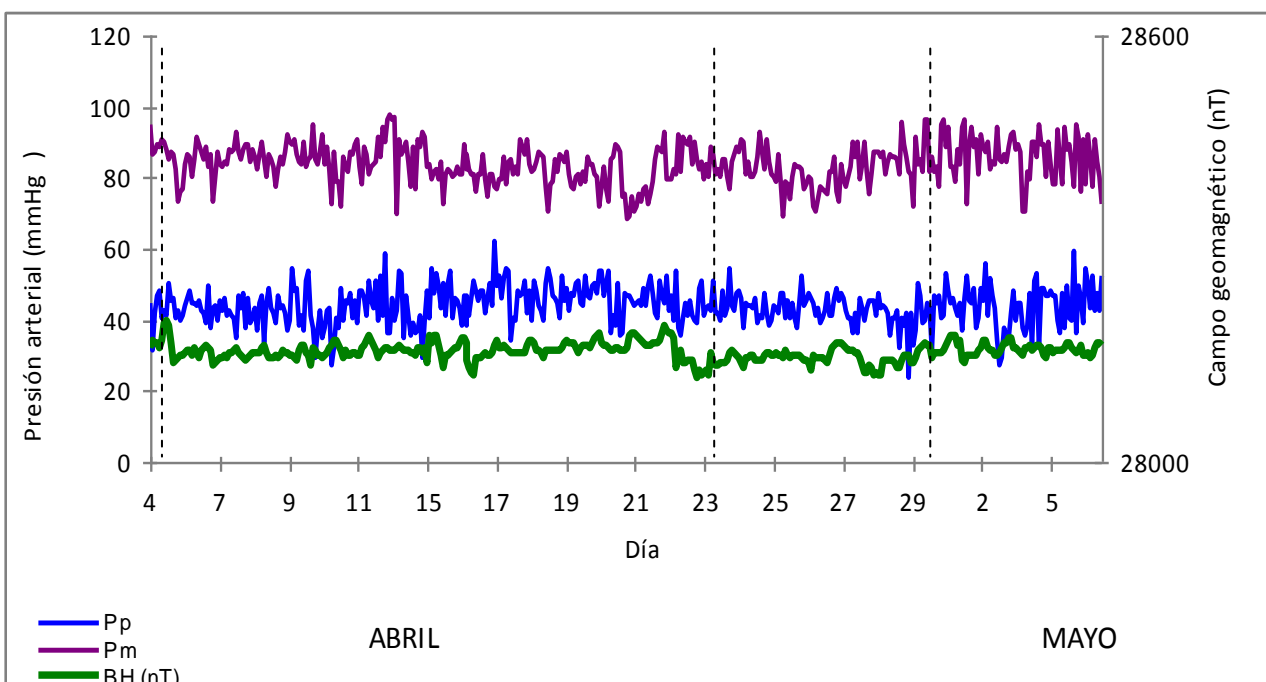


Figura 3.9 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y BH durante el día, para el grupo de los hombres.



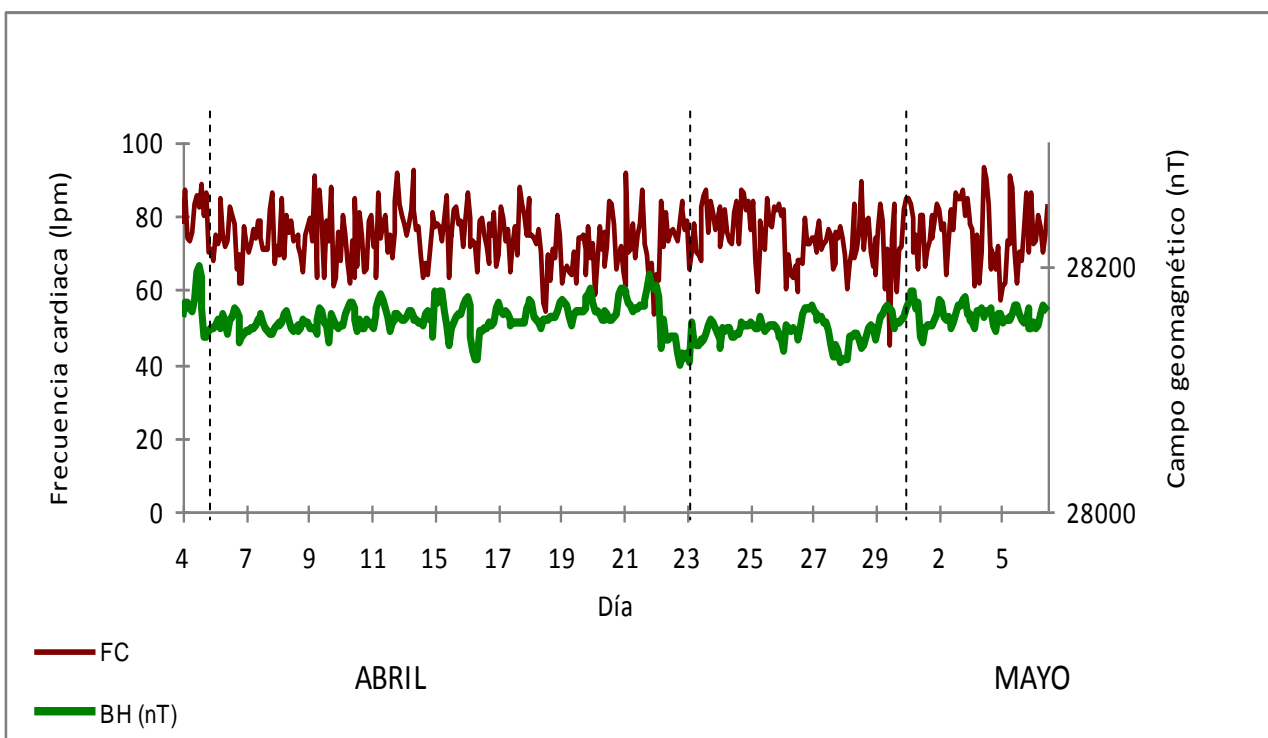


Figura 3.10 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante el día, para el grupo de los hombres.

*b) Noche*

Tabla 3.4 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de los hombres durante la noche.

VARIABLE	MÍN	MÁX	MEDIA	DE
BH (nT) <sup>(a)</sup>	28114.2	28169.9	28147.5	10.2
PAS <sup>(b)</sup>	79.0	130.0	105.3	8.1
PAD <sup>(c)</sup>	44.0	84.5	59.7	7.1
Pp <sup>(d)</sup>	32.5	83.0	45.7	6.5
PAM <sup>(e)</sup>	57.0	98.3	74.9	6.8
FC <sup>(f)</sup>	46.0	99.0	60.9	8.5

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Pp en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto.

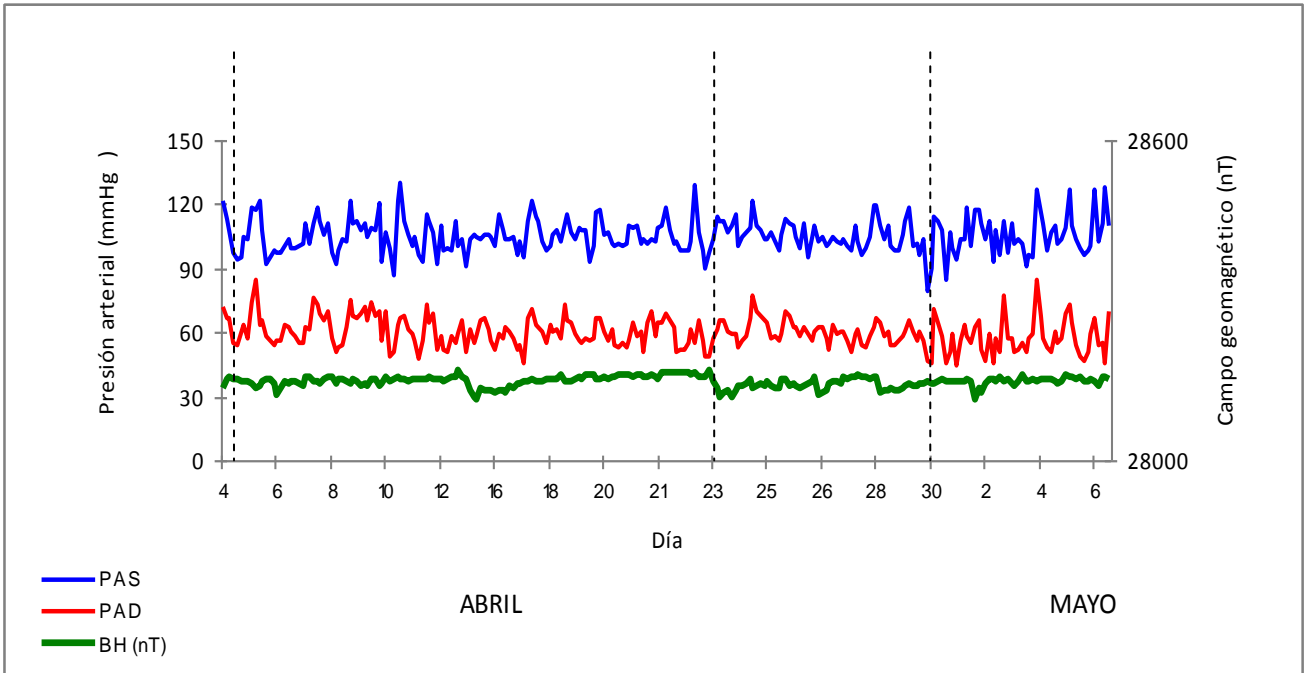


Figura 3.11 Comportamiento temporal de las componentes de la presión arterial (PAS y PAD) y BH durante la noche, para el grupo de los hombres.

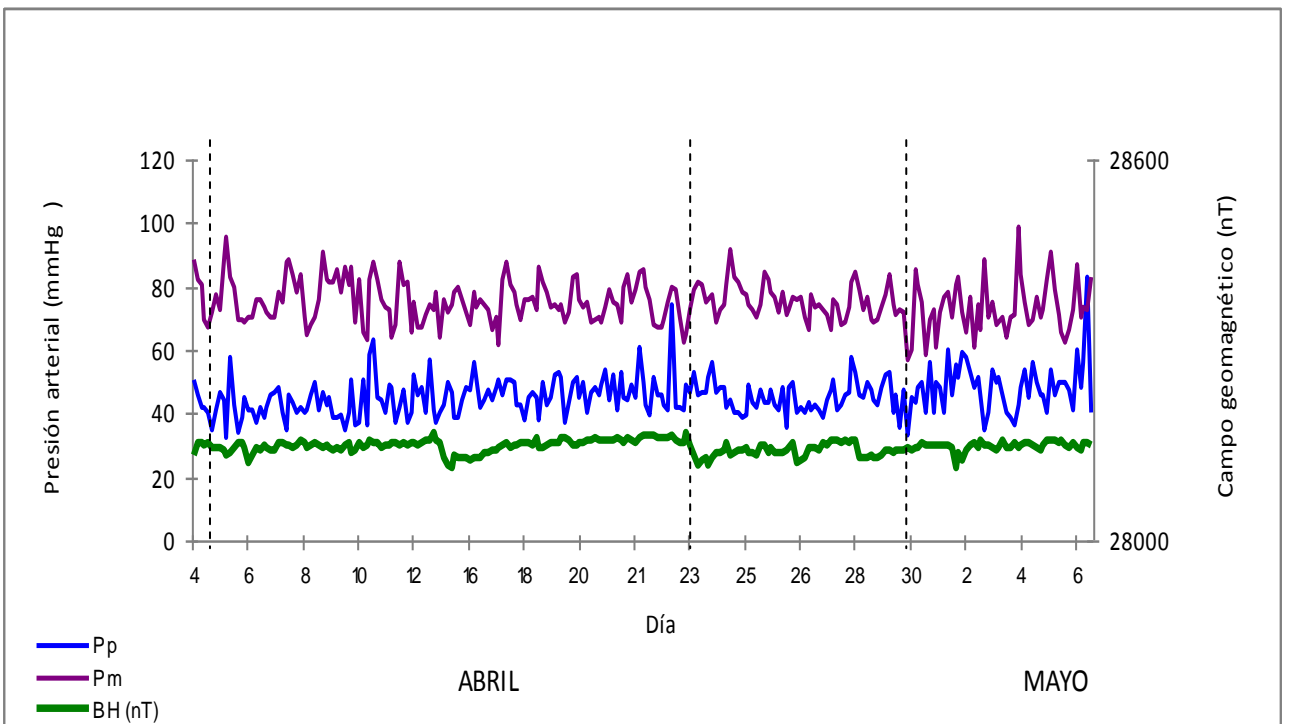


Figura 3.12 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y BH durante la noche, para el grupo de los hombres.

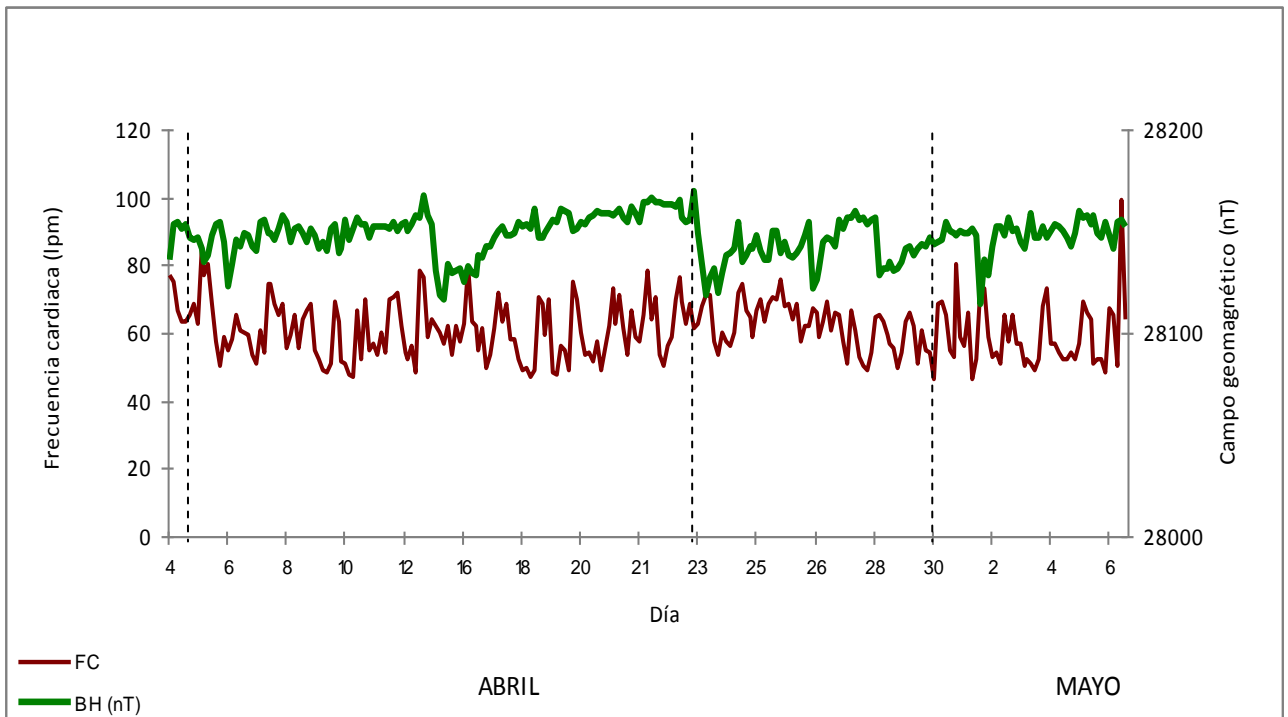


Figura 3.13 Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante la noche, para el grupo de los hombres.

### 3. MUESTRA COMPLETA

Para realizar este análisis se considera al total de los estudiantes de la muestra, 51 personas.

a) *Día*

Tabla 3.5 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y la BH en el caso de la muestra completa durante el día.

VARIABLE	MÍN	MÁX	MEDIA	DE
BH(nT) <sup>(a)</sup>	28119.0	28198.5	28157.3	12.2
PAS <sup>(b)</sup>	82.8	127.5	107.6	6.3
PAD <sup>(c)</sup>	41.0	84.0	66.0	5.6
Pp <sup>(d)</sup>	18.0	65.5	41.4	5.0
PAM <sup>(e)</sup>	58.6	97.0	79.8	5.3
FC <sup>(f)</sup>	50.5	119.5	77.4	8.9

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Pp en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto.

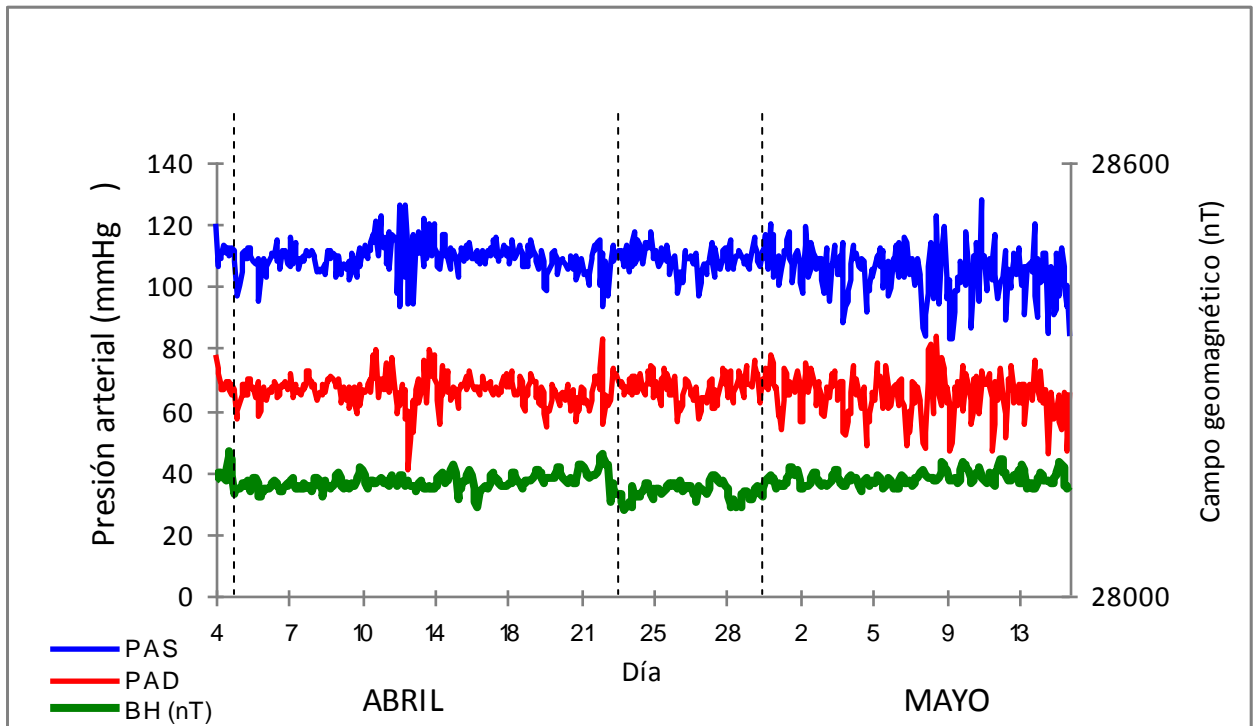


Figura 3.14. Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y BH durante el día, para la muestra completa.

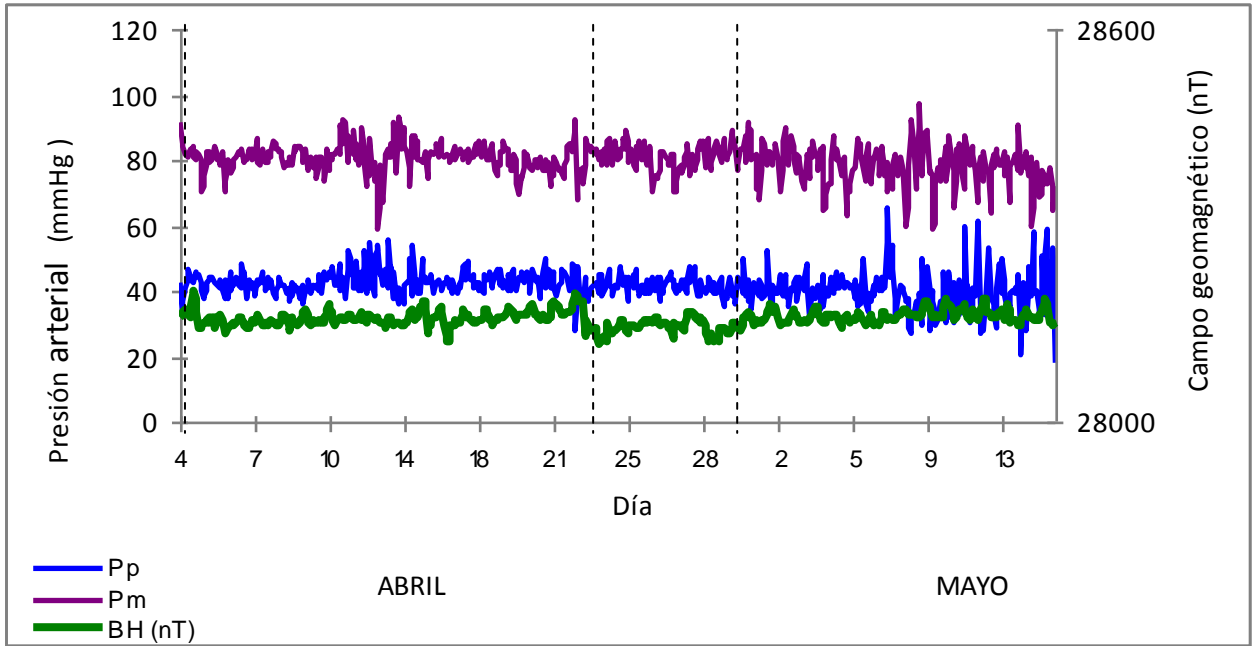


Figura 3.15. Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y BH durante el día, para la muestra completa.

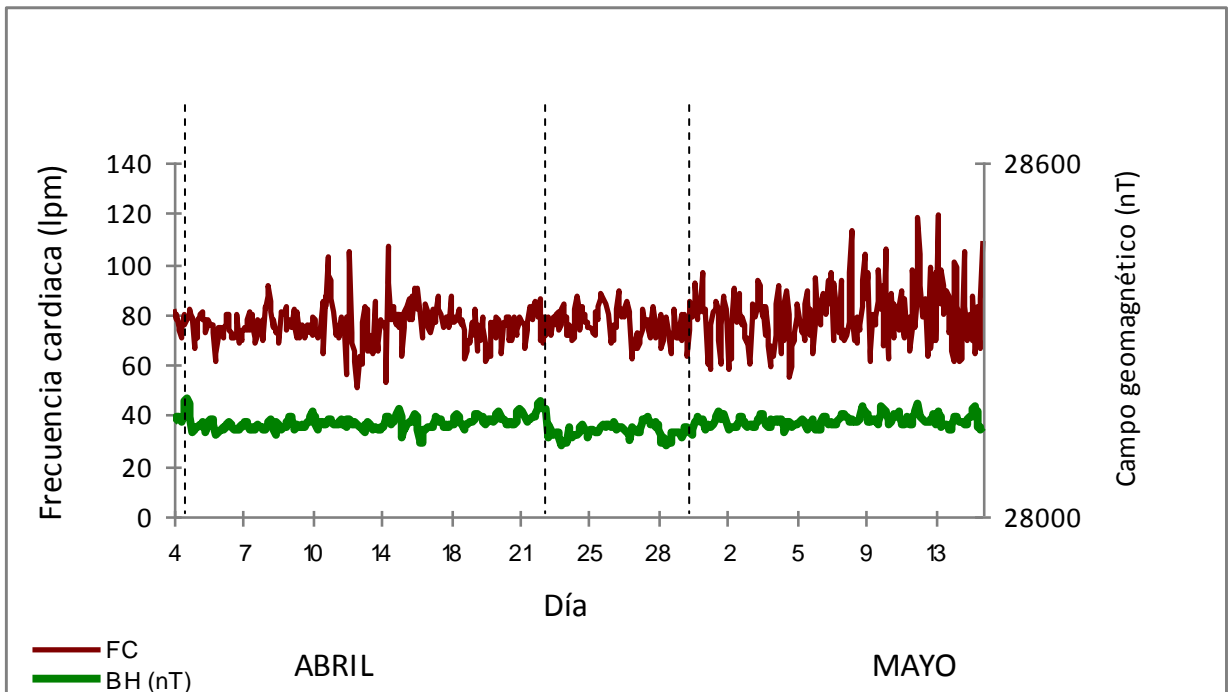


Figura 3.16. Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante el día, para la muestra completa.

b) Noche

Tabla 3.6 Comportamiento de los principales parámetros de la presión arterial y el campo geomagnético en el caso de la muestra completa durante la noche.

VARIABLE	MÍN	MÁX	MEDIA	DE
BH (nT <sup>(a)</sup> )	28114.3	28173.5	28149.9	10.5
PAS <sup>(b)</sup>	74.0	126.0	100.5	7.1
PAD <sup>(c)</sup>	40.0	80.0	59.3	6.5
Pp <sup>(d)</sup>	26.0	55.0	41.2	4.5
PAM <sup>(e)</sup>	51.3	95.3	73.1	6.3
FC <sup>(f)</sup>	50.0	99.0	65.2	7.9

(a) Componente horizontal del campo geomagnético en nanoteslas (nT). (b) PAS en mmHg. (c) PAD en mmHg. (d) Pp en mmHg. (e) PAM en mmHg. (f) FC en latidos por minuto.

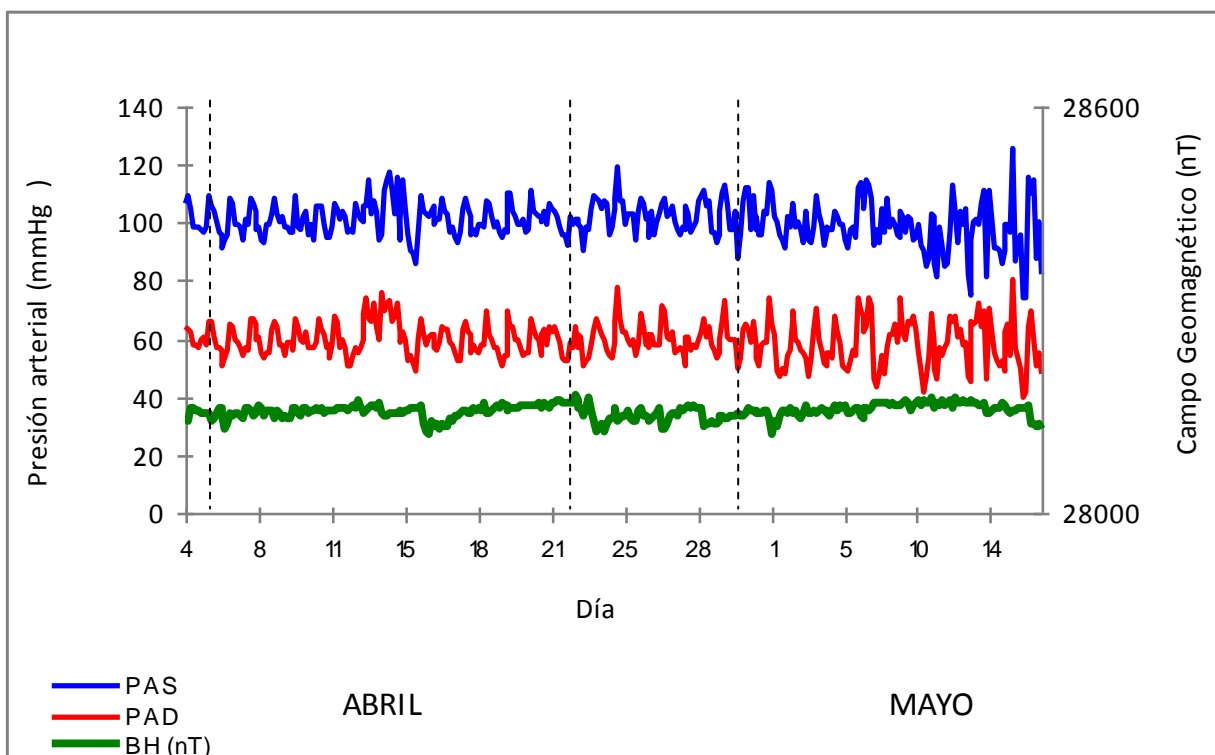


Figura 3.17. Comportamiento temporal de las componentes PAS y PAD y BH durante la noche, para la muestra completa.

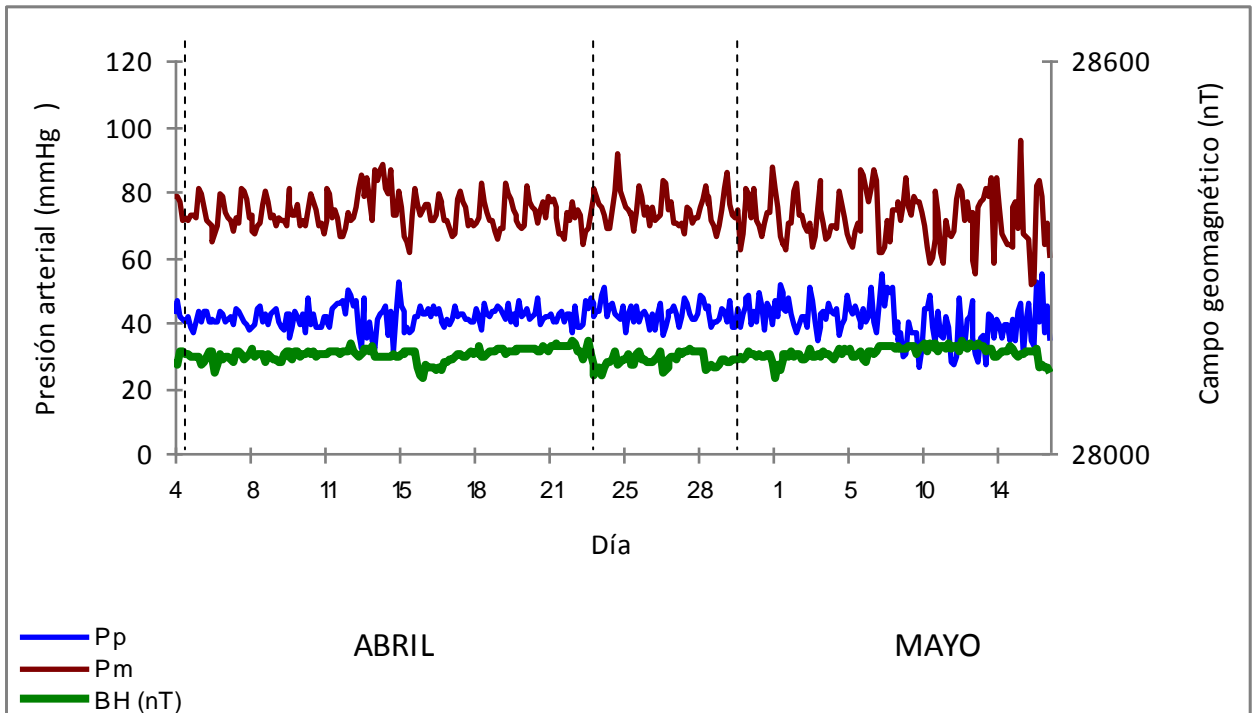


Figura 3.18 Comportamiento temporal de las componentes de la Pp y la PAM y BH durante la noche, para la muestra completa.

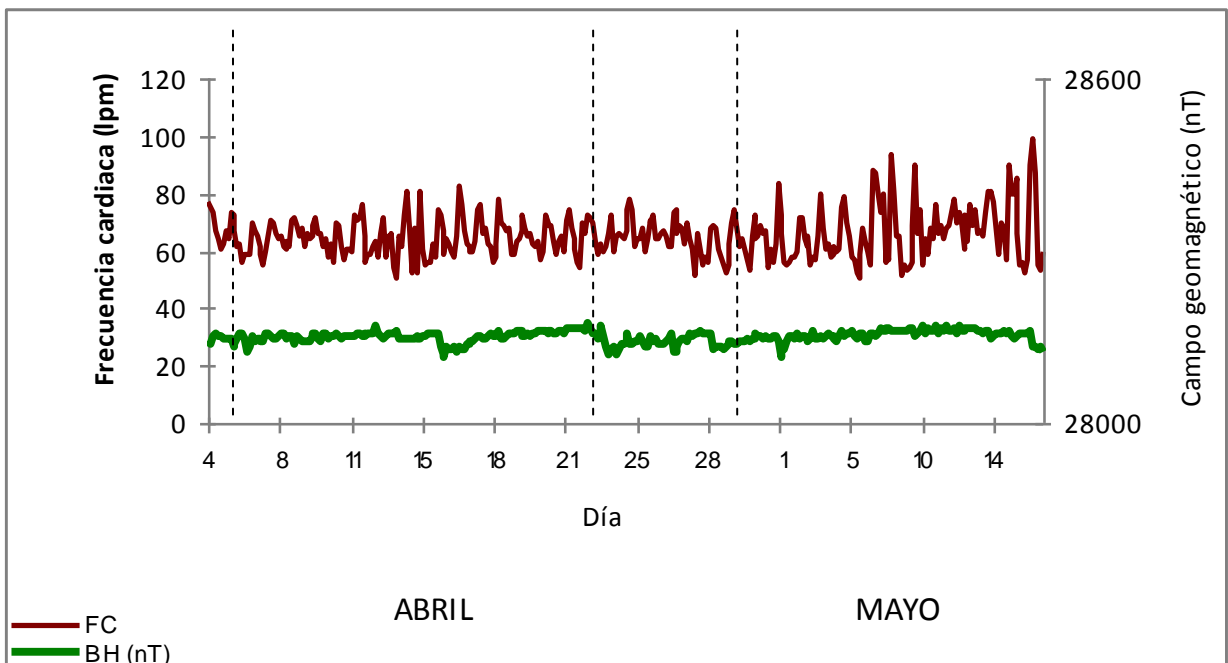


Figura 3.19. Comportamiento temporal de las componentes de la FC y BH durante la noche, para la muestra completa.

De las Tablas 3.1 a 3.6 se observa que los valores de las componentes de la presión (PAS y PAD) según el sexo son mayores en los hombres que en las mujeres. Para ambos sexos, estos valores son mayores durante el día que durante la noche. Ambos resultados son acordes con lo que se registra en libros y artículos especializados en el tema [4, 5, 8, 13, 16, 21, 32, 33, 38, 45, 63, 78,109 111 113, 125].

En el apartado 3.3 se muestran los resultados obtenidos al aplicar cada uno de los métodos de análisis.

### **3.3 RELACIÓN PRESIÓN ARTERIAL-CAMPO GEOMAGNÉTICO**

#### **3.3.1 PRUEBA Kolmogorov-Smirnov (KS)**

La prueba K-S es una prueba no paramétrica que se utiliza para determinar la bondad de ajuste entre dos distribuciones (Ver Apéndice A). Para realizar el análisis estadístico de las muestras se usa el software MATLAB 7.0, donde se aplica la prueba K-S para obtener el grado de concordancia que existe entre la BH y los parámetros de la presión arterial.

Para obtener los resultados fue necesaria la elaboración de un programa en el MATLAB versión 7.0 que mostrara si existía concordancia en las distribuciones dado un nivel de significancia  $\alpha$ , cuyo valor esta entre 0 y 1. Se usaron los siguientes valores para  $\alpha$ : 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.31, 0.32 y 0.33, por ser los niveles permitidos para que podamos aceptar la hipótesis de que las distribuciones no difieren de forma significativa (hipótesis nula  $H_0$ ). Recordando que el nivel de significancia  $\alpha$  es la máxima probabilidad de error que estamos dispuestos aceptar para dar como válida nuestra hipótesis. De tal forma que entre menor sea este valor es mayor la confianza para aceptar la hipótesis  $H_0$  (Ledolter, 2010; Navidi, 2007).

En nuestro caso la prueba se aplicó de acuerdo al sexo y en relación al ciclo día-noche, para la BH y las componentes de la presión arterial PAS y PAD así como la PAM para todo el conjunto de datos obtenidos durante los meses de abril y mayo



del 2008, se incluyen los días de la tormenta. Las Tablas 3.7 a 3.10 nos muestran los valores de  $\alpha$  para los cuales existe concordancia en las distribuciones.

### **MUJERES**

Tabla 3.7 Valores de  $\alpha$  para los cuales existe relación entre la BH y la presión arterial en el caso de las mujeres.

<b>VARIABLE</b>	<b>DÍA</b>	<b>NOCHE</b>	<b>CICLO DÍA-NOCHE (24 HRS)</b>
PAS	0.15	0.25	0.25
PAD	0.25	0.3	0.3
PAM	0.25	0.25	0.3

### **HOMBRES**

Tabla 3.8 Valores de  $\alpha$  para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial en el caso de los hombres.

<b>VARIABLE</b>	<b>DÍA</b>	<b>NOCHE</b>	<b>CICLO DÍA-NOCHE (24 HRS)</b>
PAS	0.2	0.15	0.25
PAD	0.25	0.25	0.3
PAM	0.25	0.3	0.33

### **MUESTRA TOTAL**

Tabla 3.9 Valores de  $\alpha$  para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial en la muestra total (hombres y mujeres).

<b>VARIABLE</b>	<b>DÍA</b>	<b>NOCHE</b>	<b>CICLO DÍA-NOCHE (24 HRS)</b>
PAS	0.2	0.25	0.25
PAD	0.3	0.2	0.3
PAM	0.32	0.3	0.32

## **HOMBRES-MUJERES**

Tabla 3.10 Valores de  $\alpha$  para los cuales existe relación entre el campo geomagnético y la presión arterial al contrastar las variables para hombres y mujeres.

<b>VARIABLE</b>	<b>DÍA</b>	<b>NOCHE</b>	<b>CICLO DÍA-NOCHE (24 HRS)</b>
PAS	0.2	0.2	0.25
PAD	0.25	0.3	0.3
PAM	0.25	0.32	0.32

De las tablas anteriores se obtienen las siguientes conclusiones:

- En el caso de las mujeres (ver Tabla 3.7) la mayor similitud del campo geomagnético se tiene con la PAS durante el día, mientras que la menor se observa con la PAD en la noche, en el ciclo de 24 hrs y para la PAM en el ciclo de 24 hrs.
- En el caso de los hombres (ver Tabla 3.8) la mayor similitud del campo geomagnético se tiene con la PAS durante la noche y la menor correlación es con la PAM durante el ciclo de 24 hrs.
- Al analizar las variables usando el total de la muestra (ver Tabla 3.9) la mayor correlación se tiene durante el día con la componente PAS, mientras que la menor correlación se observa con la PAM (día y el ciclo de 24 hrs).
- Al comparar hombres y mujeres (ver Tabla 3.10) observamos que la PAS durante el día y la noche se comportan igual y son las más similares con el campo, mientras que la mayor diferencia se observa en la PAM durante la noche y para el ciclo de 24 hrs.

### 3.3.2 MÉTODO DE ÉPOCAS SUPERPUESTAS

Para determinar el impacto de fluctuaciones importantes del campo geomagnético sobre el comportamiento de las componentes de la presión se usa el método de épocas superpuestas respecto a los días en que ocurrieron tormentas geomagnéticas. En nuestro estudio ocurrieron tres tormentas moderadas: los días 6 ( $K_p=5$ ), 23 ( $K_p=5$ ) y 30 ( $K_p=5$ ) de abril de 2008, se eligió el día 23 de abril para aplicar la prueba ya que en torno a esta fecha se tenía el mayor número de datos.

La ventana temporal considerada va de los -3 a +3 días (ciclo día-noche) teniendo al día de la tormenta registrada el 23 de abril como día cero en cada caso. En las Figuras 3.20 a 3.22 se muestra el comportamiento de las componentes PAS y PAD, se presenta el promedio de los valores de éstas componentes con el método antes descrito, ya que como vimos en la sección anterior la PAM es la menos similar al campo geomagnético.

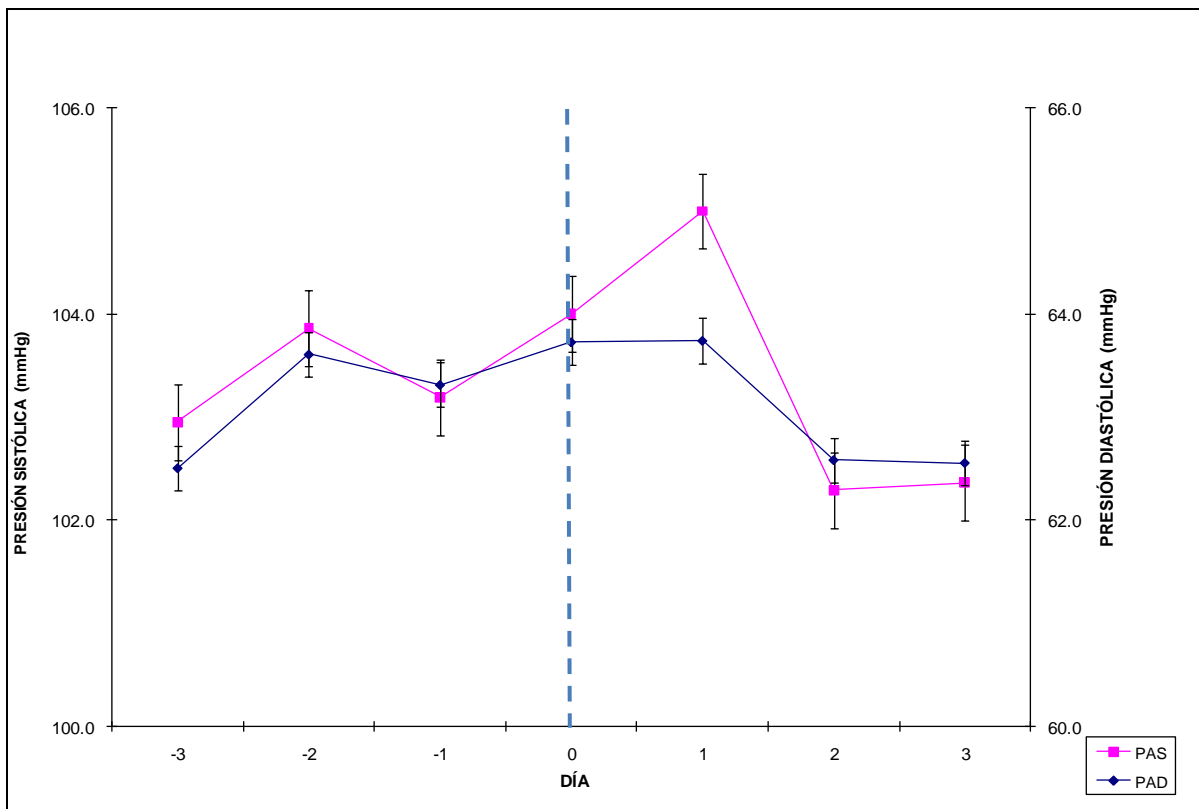


Figura 3.20. Comportamiento de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en mujeres. Las barras de error corresponden a la desviación estándar ( $1\sigma$ ) asociada con los datos.

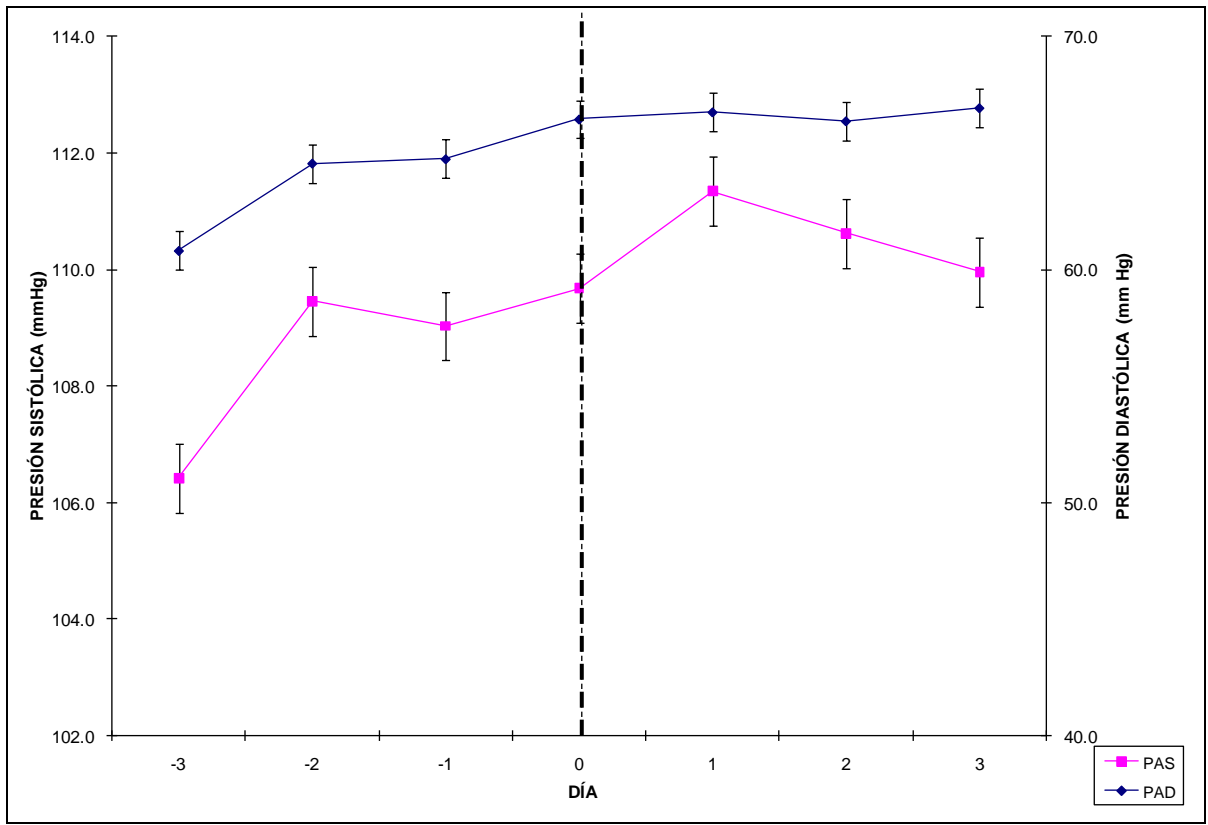


Figura 3.21. Comportamiento de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en hombres. Las barras de error corresponden a la desviación estándar ( $1\sigma$ ) asociada con los datos.

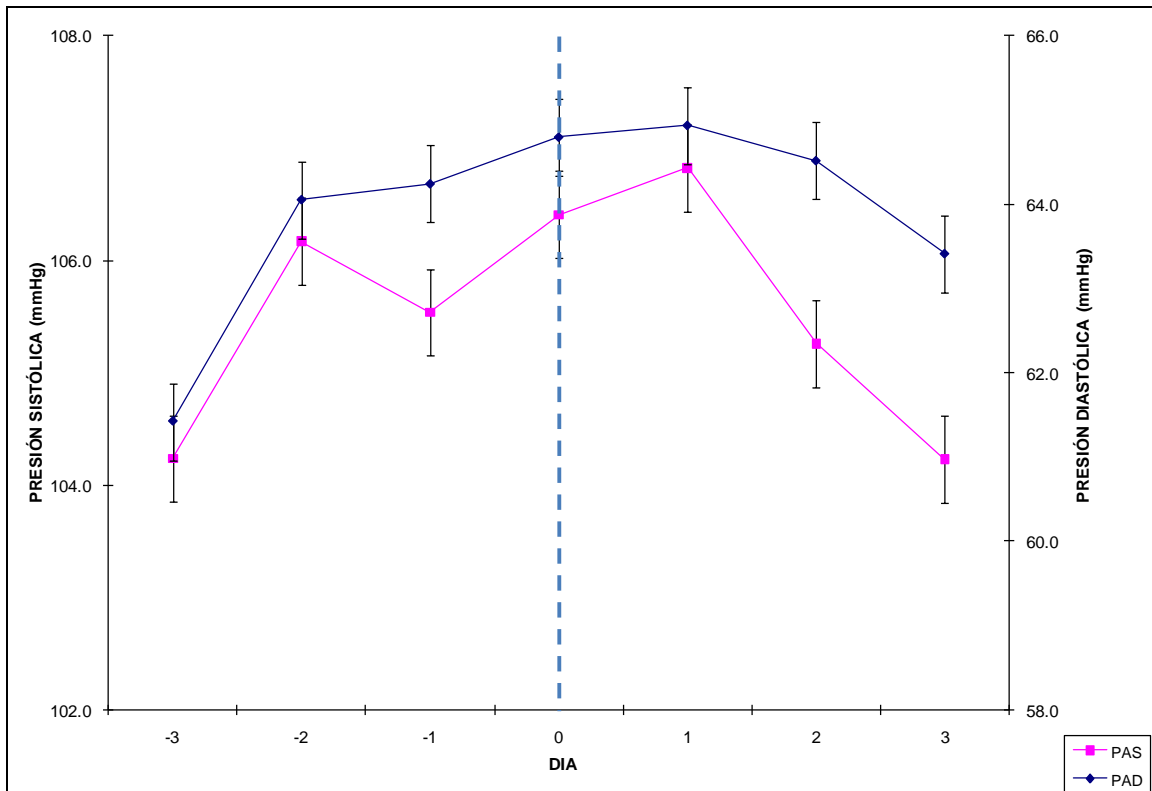


Figura 3.22 Comportamiento de las componentes de la PAD y PAS respecto a la presencia de tormentas geomagnéticas en la muestra completa. Las barras de error corresponden a la desviación estándar ( $1\sigma$ ) asociada con los datos.

Las variaciones en los valores de las componentes de la PA observadas en las Fig. 3.20 a 3.22 están en el rango característico de una presión normal. En forma general, las fluctuaciones más importantes corresponden a un 10 % en el caso de la PAS y 7% en el caso de la PAD de las que se presentan dentro del rango observado de variación. Cabe mencionar que los datos graficados corresponden al promedio del promedio de los valores de la PAS y la PAD durante los días señalados, por lo que su incertidumbre se hace más pequeña en relación a los valores originales.

Tabla 3.11 Variación porcentual en los valores de las componentes PAS y PAD durante los días correspondientes a la ventana temporal -3 a +3 días en torno a la tormenta del 23 de abril del 2008.

Días	Mujeres		Hombres		Todos	
	PAS	PAD	PAS	PAD	PAS	PAD
3 a 2 días antes de la tormenta	0.9	2.9	1.8	6.2	1.9	4.3
2 a 1 días antes de la tormenta	-0.6	-0.4	-0.5	-0.3	-0.6	-0.3
1 día antes de la tormenta	0.8	0.6	0.7	2.6	0.8	0.9
Día de la tormenta a 1 día después de ésta	1.0	1.5	0.0	0.5	0.4	0.2
Día 1 al día 2 después	-2.6	-0.6	-1.8	-0.6	-1.5	-0.6
Día 2 al día 3 después	0.1	-0.6	0.0	0.9	-1.0	-1.7

De acuerdo a la Tabla 3.11 y las figuras 3.20-3.22, según el sexo y de acuerdo a los ciclos de día-noche se obtienen los siguientes comportamientos de las muestras estudiadas:

- Tres días antes del inicio de la tormenta se observa un incremento en los valores de la PAS (para toda la muestra: 1.9%) y la PAD (para toda la muestra: 4.3%).
- Dos días antes se observa un descenso en dichos valores PAS (para toda la muestra: -0.6 %) y la PAD (para toda la muestra: -0.3%).
- Un día previo al inicio de la tormenta y hasta un día después de ésta, se observa un incremento en los valores de la PAS (para toda la muestra: 0.8%) y la PAD (para toda la muestra: 0.9%).
- El máximo cambio para la PAS y PAD es para 3 a 2 días antes de la tormenta (1.9% y 4.3%) para toda la muestra.
- Después del segundo día los valores tienden a regresar a sus valores iniciales.
- En todos los casos la PAD muestra variaciones mayores que la PAS.

### 3.3.3 PRUEBA ANOVA

Para reforzar los resultados del análisis de épocas superpuestas, se aplicó la prueba ANOVA con el fin de obtener la significancia estadística de la influencia de una tormenta geomagnética sobre la PAS y la PAD en la ventana temporal de -3 días a +3 días en torno a la tormenta registrada el 23 de abril del 2008. En las Tablas 4.1-4.3 se presentan los niveles de significancia (p-valores) que se obtuvieron en el caso de las muestras de mujeres, hombres y la muestra total (hombres y mujeres).

Tabla 3.12 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en mujeres tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma. Los valores señalados (\*) denotan que existe significancia estadística.

DÍA	p-valor	
	PAS	PAD
-3, -2	0.341	0.348
-2, -1	0.252	0.320
-1, 0	0.076*	0.013*
0,1	0.000*	0.000*
1,2	0.192	0.028*
2,3	0.220	0.200
3 en adelante	0.132	0.107

Tabla 3.13 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en hombres tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma. Los valores señalados (\*) denotan que existe significancia estadística.

DÍA	p-valor	
	PAS	PAD
-3,-2	0.266	0.310
-2,-1	0.230	0.270
-1,0	0.079*	0.014*
0,1	0.008*	0.019*
1,2	0.042*	0.025*
2,3	0.912	0.675
3 en adelante	0.567	0.968

Tabla 3.14 Niveles de significancia (p-valores) del efecto de una tormenta geomagnética en la PA (PAS y PAD) en la muestra total (hombres y mujeres) tres días antes (-), durante (0) y después (+) de la ocurrencia de la misma. Los valores señalados (\*) denotan que existe significancia estadística.

DÍA	p-valor	
	PAS	PAD
-3,-2	0.171	0.002*
-2,-1	0.000*	0.573
-1,0	0.098	0.027*
0,1	0.000*	0.001*
1,2	0.051	0.001*
2,3	0.169	0.003*
3 en adelante	0.003*	0.024*

De las Tablas 4.1 a 4.3 se observa que existe significancia estadística en la PAS y la PAD un día antes, durante y un día después de la ocurrencia de la tormenta geomagnética tanto para hombres como para mujeres. Mientras que cuando se estudia la muestra completa, la significancia estadística en la PAD ocurre prácticamente durante toda la ventana temporal, y en la PAS dos días antes durante y tres días después de la tormenta.



## CAPÍTULO 4

### DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El efecto de los campos electromagnéticos en la salud de los humanos es un tema ampliamente discutido en la actualidad y abordado por diversos grupos de investigadores en todo el mundo. Sin embargo, aún cuando cada vez son más los estudios que muestran que existe una relación entre la salud humana y la actividad solar, todavía no es claro el mecanismo mediante el cual se lleva a cabo tal relación. Para el caso específico de la PA, diversos estudios dan resultados discrepantes, lo que ha originado polémica sobre el tema. Algunos ejemplos son las investigaciones de Okano (2005) y Gmitrov (1994) en los que la PA presenta un efecto hipotensivo durante la exposición a la variación de campo geomagnético, mientras que Dimitrova et al. (2008) demostraron que existe un efecto hipertensivo.

Actualmente, los estudios que se realizan sobre este tema se llevan a cabo predominantemente a altas latitudes y tienen como principales propuestas de mecanismos los que se refieren a la acción de los campos electromagnéticos estáticos y variables (campo geomagnético) sobre la glándula pineal y los barorreceptores, y los que estudian el comportamiento general de la PA.

Los estudios de la influencia de los campos magnéticos sobre sistemas biológicos sugieren que la respuesta de estos sistemas está en función de las reacciones de los radicales libres y especies reactivas de N y O ante estos campos. En el caso de la PA se vincula con el óxido nítrico (Okano, 2008; McKay et al, 2007).

En lo que se refiere a la acción de los campos magnéticos variables, los estudios sobre la exposición de la glándula pineal a campos magnéticos externos débiles han demostrado que la acción de dichos campos es la de inhibir la secreción de melatonina. Se reporta que la PA varía según la producción de melatonina mediante el análisis en la concentración de 6-hydroximelatonin sulfato, que es un metabolito urinario de la melatonina. Se observa que un incremento en la

producción de melatonina trae consigo un descenso en la PA (Cherry, 2002, Sandyk, 1993, Stoilova, 2008; Reiter, 2009).

En cuanto a la acción sobre los microcomponentes involucrados en la PA, autores tales como Okano (2005) y Gmitrov(2004), sugieren que dichos efectos están relacionados con los barorreceptores que son pequeñas terminales nerviosas situadas en las venas sensibles a los cambios de presión. La respuesta asociada dependerá de las condiciones iniciales o tono de los vasos sanguíneos (McKay, 2006).

En cuanto a correlaciones, investigaciones tales como las de Stoilova (2002) estudiando el comportamiento de la PA durante una tormenta geomagnética, encontró que hay un incremento en los valores de la PAS y la PAD. Mientras que Gravryuseva et al. (2002) al estudiar a un grupo de personas de distintas edades encuentran que las componentes de la presión cambian bajo la acción de la actividad solar-geomagnética. Por otra parte Dimitrova et al. (2008) al estudiar el comportamiento de la PA en un grupo de adultos sanos durante la ocurrencia de una tormenta geomagnética intensa, mostraron mediante un análisis de épocas superpuestas y la prueba ANOVA, que hay variaciones estadísticamente significativas en los valores de la PA. Los autores reportan un incremento de dichos valores dos días antes y hasta tres días después de la ocurrencia del evento.

Durante el periodo de tiempo en que se realizó el estudio reportado en esta tesis, se presentaron tres tormentas geomagnéticas moderadas ( $K_p=5$ ), llevándose a cabo el análisis de épocas superpuestas en torno a los días de ocurrencia de las mismas. Debido a que la intensidad de las tormentas registradas era moderada, es posible que influyeran poco en las medidas de las PAS y PAD pues las fluctuaciones observadas en estas variables son pequeñas.

En lo que respecta a los valores del campo geomagnético, el Observatorio Magnético de Teoloyucan se encuentra situado lejos de influencia de radiación electromagnética ambiental que pudiera alterar las lecturas.

Referente a los instrumentos de medición para la PA, este tipo de instrumentos ha sido aprobado por diferentes asociaciones, entre las que destaca la American Medical Instrumentation (AMI). De hecho, en la tesis de licenciatura en Medicina y Homeopatía (IPN) "Valoración de Tensión Arterial con Metodología Oscilométrica y Auscultatoria en Operadores de Autobús" elaborada por la estudiante Jessica González y dirigida por el Dr. Sánchez de la Peña, (González; 2007), se probó que tanto la exactitud como la calibración de tales instrumentos son buenas. Dadas sus características, este tipo de instrumentos son además utilizados por 94 investigadores de 22 países en el grupo denominado de Bisofera y Comos o BIOCOS.

Como ya se mencionó, en los trabajos de Okano (2005) y Gmitrov (1994), la PA presenta un efecto hipotensivo durante la exposición a la variación de campo geomagnético. Mientras que Dimitrova et al. (2008), demostraron que existe un efecto hipertensivo. En el presente trabajo, coincidiendo con Dimitrova et al. (2008), observamos un efecto hipertensivo y además que la PAS es la componente de la presión arterial más sensible a las variaciones del campo geomagnético. Como ya se mencionó, en nuestro caso las variaciones observadas son muy pequeñas probablemente porque las tormentas geomagnéticas durante las cuales se realizó el estudio fueron moderadas.

Nuestro estudio mostró que un día antes de la tormenta, un día antes y un día después de que ésta ocurrió hubo un aumento en la PAS y la PAD. En el estudio realizado por Dimitrova et al. (2008) también se encontró un incremento en los valores de la PA, pero dos días antes y hasta tres días después de la ocurrencia del evento. Los cambios observados de la PA antes del día de la tormenta pueden deberse a la ocurrencia de una EMC, que en muchas ocasiones está antecedida por una ráfaga y en otras ésta ocurre casi simultáneamente con la EMC. Las ráfagas o la combinación EMC/ráfaga produce partículas energéticas que son capaces de generar perturbaciones en la densidad ionosférica terrestre, lo cual a su vez produce alteraciones de la componente horizontal del campo geomagnético. Estas partículas arriban a la ionosfera varias horas después de que son generadas.

Las ráfagas además producen emisiones electromagnéticas en todo el espectro, las cuales llegan a la ionosfera minutos después de ser generadas, en particular los rayos X y UV tienen un efecto sobre la ionosfera parecido al de las partículas energéticas. Hay que recordar que la EMC impacta a la magnetosfera produciendo una tormenta, tres o más días después de haberse originado en el Sol. Entonces, las alteraciones que aparecen en la PA uno o dos días antes de la manifestación de la tormenta magnética pudieran estar asociadas a estas partículas energéticas y emisiones de onda corta.

En cuanto al diferente comportamiento observado según el sexo en el presente trabajo, éste es de esperarse, ya que se ha reportado que las hormonas juegan un papel importante en la variación de la PA (Girdler, 1993; Smolensky, 1996; Oelkers, 1996; Pechere-Bertschi, 2004). Cabe puntualizar que el nuestro, es uno de los primeros trabajos en que se estudia la respuesta de la PA ante la actividad solar-geomagnética de acuerdo con el sexo.

Dada la importancia que tiene el conocer los factores ambientales que pueden influir en la salud humana, es obvia la importancia que tiene el seguir desarrollando investigaciones que nos permitan tener un conocimiento más amplio sobre este tema.

## CONCLUSIONES

Este trabajo se basa en el estudio de la relación que existe entre las variaciones del campo geomagnético y las componentes de la presión arterial (PAS y PAD), así como otros parámetros relacionados con éstas durante los meses de abril y mayo de 2008. La aportación de este trabajo respecto a los que se han realizado con anterioridad es que: i) se hace una división por sexo, ii) de acuerdo a ciclo día-noche, iii) por componentes de la PA y iv) se realizó a una latitud geomagnética media. De los análisis efectuados se obtienen las siguientes conclusiones.

1. Los valores de la PAS y PAD son mayores en los hombres que en las mujeres. Para ambos sexos son mayores durante el día que durante la noche. Estos resultados están acordes con estudios anteriores.
2. Al comparar los ciclos día-noche encontramos que las mujeres muestran mayores variaciones en el día, mientras que en los hombres las variaciones más importantes se observan durante la noche.
3. Respecto a la similitud entre las series temporales de la BH y la presión: la PAS durante el día para mujeres y en noche para hombres presenta la mayor similitud. La menor se encuentra en la PAM durante el ciclo de 24 hrs.
4. El mayor incremento en los valores de la PAS y la PAD se observa de 3 a 2 días antes del inicio de la tormenta.
5. Después del segundo día los valores tienden a regresar a sus valores iniciales.
6. En todos los casos la PAD muestra variaciones mayores que la PAS.

## ANEXO I

En las siguientes gráficas A.1, A.2 y A.3 se muestran el perfil circadiano de la PA de tres pacientes del Dr. Salvador Sánchez de la Peña (ENM yH-IPN), las cuales corresponden a los valores obtenidos mediante el monitoreo de la PA, durante una semana en el año 2007 usando el método de Korotkoff y oscilatorio usando un Blood Pressure Monitor modelo TM-2421, como el que se usó en el presente estudio.

Dos de estas personas son hipertensas con edades de 46 y 61 años, mientras que la tercera es normotensa de 69 años.

En ellas se puede ver que existe diferencia en el comportamiento de las variables monitoreadas entre las personas hipertensas y la normotensa. Cabe señalar que las gráficas originales fueron editadas con el fin de tener más calidad en las imágenes.

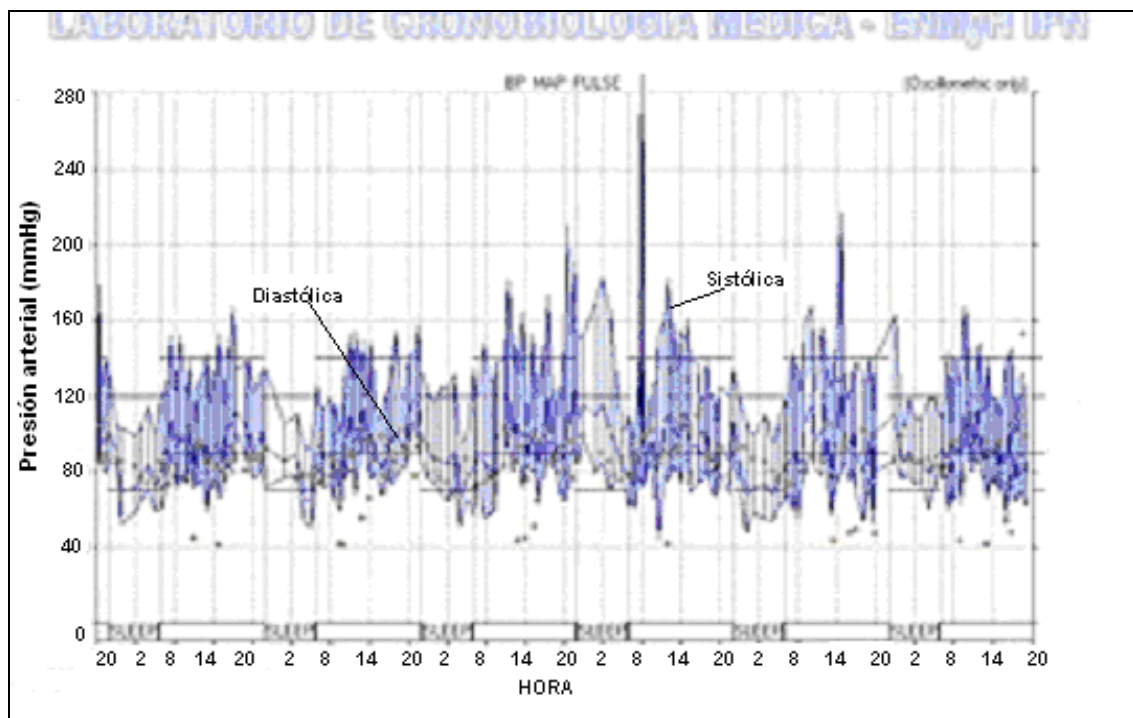


Figura A.1. Perfil de la PA semanal de una mujer hipertensa (46 años de edad).

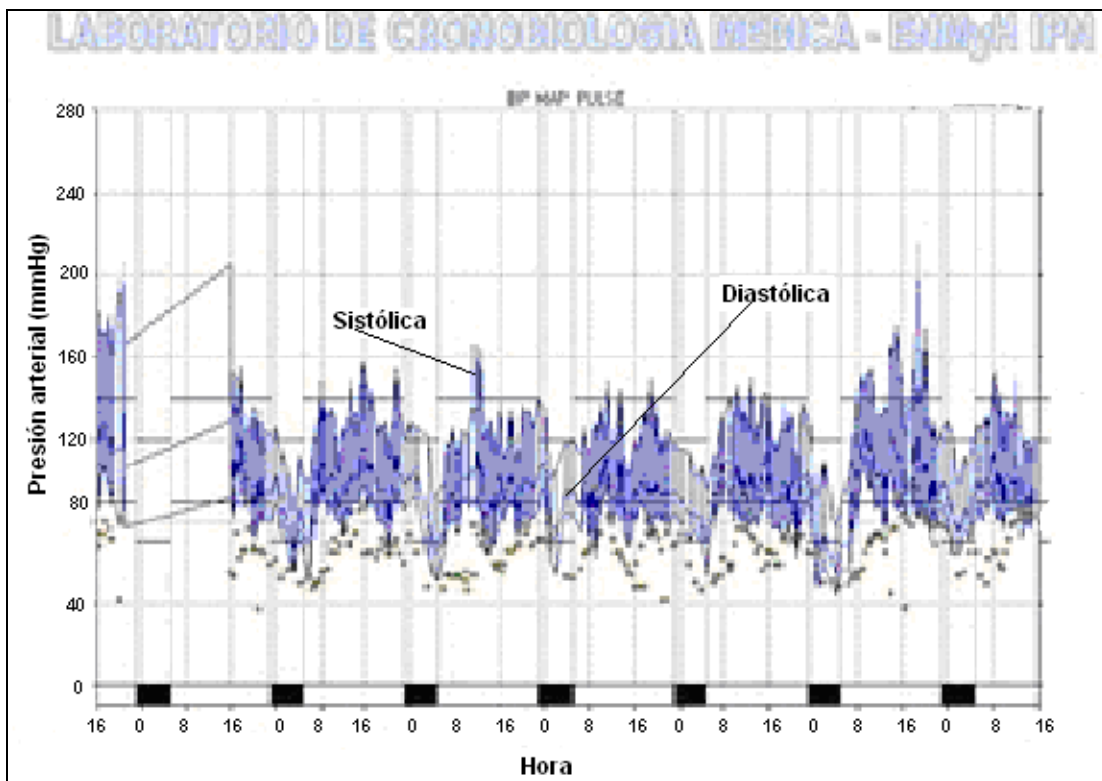


Figura A.2. Perfil de la PA semanal de un hombre hipertenso (61 años de edad).

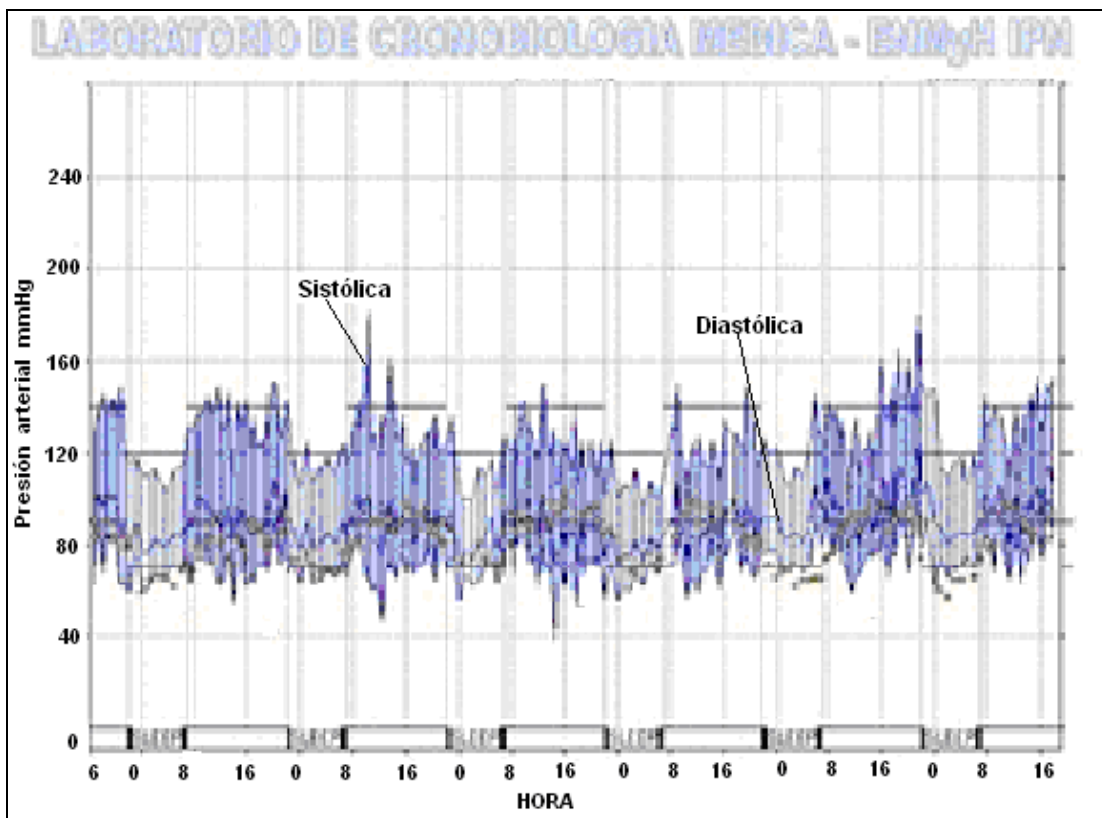


Figura A.3. Perfil de la PA semanal de una mujer hipertenso (69 años de edad).

## APÉNDICE A

### MÉTODO KOLMOGOROV-SMIRNOV

Cuando se requiere realizar un análisis estadístico a muestras de las que no es posible presuponer su distribución de probabilidad se cuenta con dos mecanismos para realizar dicho análisis: i) se normalizan los datos y ii) se emplean pruebas no paramétricas, también llamadas de distribución libre. Tal es el caso de la prueba Kolmogorov-Smirnov, se trata de un test no paramétrico que se usa para verificar si dos muestras independientes han sido extraídas de dos grupos poblacionales distintos y nos da una medida del grado de acuerdo entre las distribuciones estudiadas, además se puede determinar el punto en el que estas dos distribuciones muestran la mayor divergencia. Este método puede ser incluso más confiable que su prueba alternativa (ji-cuadrada). Se usa con frecuencia en las ciencias sociales y biológicas (Sidney, 2001).

En la prueba se comparan las distribuciones de frecuencia acumulativa de las muestras estudiadas bajo la hipótesis nula ( $H_0$ ) de que no hay diferencia significativa en su comportamiento. Se requiere que dichas distribuciones sean continuas. Se puede realizar para valores sin agrupar o agrupados en intervalos de clase.

Para **muestras pequeñas ( $n \leq 25$ )** tiene una eficacia de alrededor del 95%, mientras que en **muestras grandes ( $n \geq 25$ )** disminuye levemente, en cualquiera de los dos casos podemos aplicar la prueba uni o bidireccionalmente.

#### ***Prueba bidireccional***

Es el método general usado cuando se desea determinar si las muestras fueron extraídas de la misma población. Es sensible a las diferencias que puedan existir en los parámetros de tendencia central.



### ***Prueba unidireccional***

Sirve para determinar si las medidas de un grupo experimental son mayores que las de un grupo control.

Si las muestras fueron extraídas de la misma distribución poblacional las distribuciones acumulativas tienen valores muy cercanos, si las muestras pertenecen a poblaciones distintas, las distribuciones están lejanas entre sí en cualquier punto, de tal forma que una desviación suficientemente grande entre las distribuciones acumulativas de las dos muestras es suficiente para determinar que hay discordancia entre las distribuciones y así rechazar  $H_0$  (prueba nula).

Mediante las siguientes relaciones es posible obtener las distribuciones acumulativas  $S(X)$ , para las dos muestras de tamaños  $m$  y  $n$  respectivamente:

$$S_m(X) = K/m;$$

con  $K$  = número de datos iguales o menores que  $X$  y

$$S_n(X) = K/n \text{ para la segunda muestra,}$$

Para las muestras así definidas tenemos la prueba de Kolmogorov-Smirnov para:

pruebas unidireccionales:

$$D_{m,n} = \text{máx} [S_m(X) - S_n(X)] \text{ y}$$

$$D_{m,n} = \text{máx} [S_m(X) - S_n(X)] \text{ para pruebas bidireccionales}$$

En ambos casos las distribuciones  $D_{m,n}$  son conocidas y dependen del número de observaciones ( $m$  y  $n$ ), para obtener una mejor prueba es necesario tener un número suficiente de intervalos para poder aceptar o rechazar la  $H_0$ . Se acepta la  $H_0$  de que no existe diferencia significativa entre las distribuciones teóricas y empíricas si el valor de  $D_{\text{máx}}$  es menor o igual a un valor crítico predeterminado.

Resumen del procedimiento:

1. Debemos clasificar los datos de cada una de las muestras en una distribución de frecuencias acumuladas, el número de intervalos debe ser igual en las muestras y entre más sean, mejor.
2. Encontrar la diferencia entre las distribuciones de frecuencias acumuladas restando  $S_m(X) - S_n(X)$  en cada intervalo.
3. Determinar cuál es la mayor de las diferencias  $D_{m,n}$ . Para pruebas unidireccionales,  $D_{m,n}$  es la diferencia mayor en la dirección predicha y para pruebas bidireccionales  $D_{m,n}$  es la diferencia mayor en cualquier dirección.
4. El método para determinar la significación de la  $D_{m,n}$  obtenida depende del tamaño de la muestra y de la naturaleza de la  $H_1$ .

Si el valor observado es igual o mayor que el proporcionado por la tabla apropiada para un nivel particular de significación, se puede rechazar  $H_0$  a favor de  $H_1$ .

## **APÉNDICE B**

### **MÉTODO DE ÉPOCAS SUPERPUESTAS**

Es una técnica no-paramétrica, que puede ser usada para probar significancias estadísticas de asociaciones entre eventos discretos autocorrelacionados como fenómenos ambientales extremos. En esta prueba se analiza el comportamiento de una variable durante un periodo de tiempo. Para ello se fija el día del evento a estudiar, estableciéndolo como día cero y se compara con los días contiguos. El análisis se realiza usando los promedios de la variable obtenidos durante el periodo de tiempo que se desea estudiar. La prueba es análoga a la t de Student y no requiere de consideraciones iniciales.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aguilar-Roblero R. (1994), "En la búsqueda del tiempo: sobre los mecanismos que regulan el orden temporal en los mamíferos", *Ciencia y desarrollo*, **20**, pp. 30-45.
- [2] Aguilar-Roblero R, Escobar C. (2002), *Ritmos biológicos y mecanismos generales de regulación*, El Manual Moderno, pp. 57-77.
- [3] Amory - Mazaudier, C., (2008), *Sun Earth's System : The transient variations of the Earth's Magnetic Field*, International Astronomical Union, pp. 236-270, doi: 10.1017/97740330200173.
- [4] Anderson RH, Becker AE. (1994), *En el corazón. Estructura normal y patológica*. Ed. Mosbi.
- [5] Anderson RH, Wilcox BR, Baker AE. (1988), *Anatomy of normal heart*. N. Y. McGraw-Hill and Gowe medical Publisng, pp. 11-18.
- [6] Arias F. (1995), *Guía práctica para el embarazo y el parto de alto riesgo. Preeclamsia-eclamsia, hipertensión y embarazo*, 2ª ed. Madrid España, Ed. Mosbi y Doyma.
- [7] *Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. **64**; pp. 707-720.
- [8] Assman G. (1993), *Lipid metabolism disorders and coronary heart disease*. Ed. Munich.
- [9] Babayev S, Aysel A, (2007), *Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: Some results of Azerbaijani studies*. *Advances in Space Res*, **40**, pp. 1941-1951, doi:10.1016/j.asr.2007.02.099.
- [10] Baevsky, RM., Petrov, VM., Chernikova, G., (1987), *Regulation of autonomic nervous system in space and magnetic storms*, *Advances in space Res.*, **22**(2), pp. 227-234, doi:10.1016/S0273-1177(98)80014-8.
- [11] Bartsch H, Bartsch C, Mecke D, Lippert TH. (1994), *Seasonality of pineal melatonin production in the rat: possible synchronization by the geomagnetic field*, *Chronobiol. Int.*, **11** pp. 21-26, doi: 10.3109/07420529409057227.
- [12] Bear M, Connors B, Paradiso M. (2001), *Neuroscience, Exploring the Brain*, 2a. Ed. Lippincott Williams and Wilkins.
- [13] Birkenhager WH, Schalekamp (1976), *In control mechanisms in essential hypertension*. N.Y., Elsevier.
- [14] Blackett, P. M. S. (1949), *The magnetic field of massive rotating bodies*, *Phil. Mag.*, serie 7, vol. XI, doi :10.1038/159658a0

- [15] Boyd, T.J.M. (2003), *The Physics of Plasmas*. Cambridge University Press, 523 pp.
- [16] Braunwald (1998), *Tratado de cardiología Vol. I y II*. 5ª. ed. McGraw-Hill Interamericana.
- [17] Bravo S. (1987), *Encuentro con una estrella*. La ciencia para todos, **38**.
- [18] Brendel, H., Niehaus, M., Lerchl, A. (2000), Direct suppression effects of weak magnetic fields (50 Hz and 16 2/3 Hz) on melatonin synthesis in the pineal gland of Djungarian hamsters (*Phodopus sungorus*), *J. Pineal. Res.* **29**(4), pp. 228-233, doi: 10.1034/j.1600-0633.2002.290405.
- [19] Breus TK, Peimenov Y., Cornelissen G, Halberg F., Syuntkina EV. (1996), The biological effects of solar activity, 497-498, doi: 10.1007/BF02459892.
- [20] Breus, T.D., Baevskii, R. M., Nikulina, G. A., Chibisov, S. M., Chernikova, A. G., Pukhlianko, M., Oraevskii, V.N., Halberg, F., Cornelissen, G., and Petrov, V.M. (1998), Effect of geomagnetic activity on the human body in extreme conditions and correlation with data from laboratory observations, *Biofizika* **43** (5), pp. 811-818.
- [21] Burnstock, G., Hoyle, C., (1992), *Autonomic neuroeffector mechanism*. Vol. 1, Ed. Informa Health Care, 546 pp.
- [22] Burch, J., Reifa, JS., Yostb MG., (1999), Geomagnetic disturbances are associated with reduced nocturnal excretion of a melatonin metabolite in humans., *Neuroscience Letters*, 266: 3, pp. 209-212, doi:10.1016/S0304-3940(99)00308-0.
- [23] Caballero-López, R. A., Moraal, H. (2003), Limitations of the Force-Field Equation to Describe Cosmic Ray Modulation. *Journal of Geophysical Res.*
- [24] Cahill, LJ. (1964), Preliminary results of magnetic field measurements in the tail of the geomagnetic cavity, *EOS Trans. AGU*, 45, 231.
- [25] Campbell W.H. (1997), *Introduction to geomagnetic Fields*, Cambridge University Press.
- [26] Canavos, G., Koutrouvelis J., *Introduction to the Design & Analysis of Experiments*, University of Patras, Pearson, 2009.
- [27] Cardinalli D, Golombek D, Rey R. (1992), *Relojes y calendarios biológicos. La sincronía del hombre con el medio ambiente*, Buenos Aires. Fondo de Cultura Económica.
- [28] Chen, F. (1974), *Introduction to Plasma Physics*. Plenum Press. N. Y., 327 pp.

- [29] Cherry, N. (2002), Schumann Resonances, a plausible biophysical mechanism for the human health effects of solar/geomagnetic activity. *Natural Hazards*, **26** pp. 279-331, doi: 10.1023/A:10156371275004.
- [30] Chibisov, SM, Breus TK, Levitin AE, Drogova GM. (1995). Biological effects of planetary magnetic storms in Russian. *Biofizik*, **40** pp. 959-968.
- [31] Chibisov, SM., Cornélissen G., Halberg, F., (2004) Magnetic storm effect on the circulation of rabbits, Elsevier, doi: 10.1016/S0753-3322(04)80003-9.
- [32] Collins T, Gimbrone MA. *Molecular biology of the cardiovascular system*. Chien S. Ed. Philadelphia.
- [33] Conde A., Zamorano J.L. (1996), *Cardiologia*.
- [34] Cornélissen G, Halberg F, Obridko VN, Breus TK. (1998), Quasi-eleven year modulation of global and espectral features of geomagnetic disturbances. *Biofisika*, **43**, pp. 677-680.
- [35] Cornelissen G, Halberg F, Breus T, Syutkina E, Baevsky R. (2002) Non-photoc solar associations of heart rate variability and myocardial infarction. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, **64**, pp. 707-720, doi: 10.1016/51364-6826(02)00032-9.
- [36] Cranmer, S. (2004), *Coronal Heating versus Solar Wind Acceleration*, Astrophysics, St. Andrews, Scotland, ESA.
- [37] Cravens, T. (1997), *Physics of Solar System Plasmas*, Cambridge University Press, 477 pp.
- [38] Cruz A. (1998), *Cationes e hipertensión arterial*. 1<sup>a</sup> ed., Méx. Interamericana-McGraw-Hill, pp. 73-81.
- [39] Dasso S, Perazzo CA, Romanelli L. (2004), Dynamical analysis of erythrocytes under the assumption of cross-spectral coherence between blood cell counts and the Dst index, *Geofísica Internacional*, **43**(2), pp. 259-264.
- [40] Dimitrova S., Mustafa, F.R., Stoilova, I., Babayev, E.S., Kazimov E.A., (2008), Possible influence of solar extreme events and related geomagnetic disturbances on human cardio-vascular state: Results of collaborative Bulgarian-Azerbaijani studies. *Advances in Space Research*, **43**, pp. 641-648. doi:10.1016/j.asr.2008.09.006.
- [41] Dunlap, J, Loros J., De Coursey P. (2003), *Chronobiology Biological Timekeeping*. Sinauer Associates Publishers, Sunderland, MA, 406 pp
- [42] Elsasser, W. M. (1950), The earth's interior and geomagnetism, *Review of Modern Physics*, vol. XXII, doi: 10.1103/RevModPhys.22.1.
- [43] European Society of Hipertension. European Society of Cardiology guidelines for the Management of hipertensión. *J. Hypertens*, (2003), **21**, pp. 1011-1053.

- [44] Fowler, CMR. (1990), *The Solid earth. An introduction to global geophysics*. Cambridge Univ. Press, 472 pp.
- [45] García D, *Hipertensión Arterial* (2000), Fondo de Cultura Económica, *La ciencia para todos*, **179**.
- [46] Gibbins, D. (2008), Geomagnetic reversals, *Nature*, **452**, pp. 165-167.
- [47] Girdler, S., Pedersen, CA, Stern, RA, Light, KC., (1993). Menstrual cycle and premenstrual syndrome: modifiers of cardiovascular reactivity in women. *Health Psychol.* **12**(3):180-92.
- [48] Gimitrov, J (2002), Artificial static and geomagnetic field interrelated impact on cardiovascular regulation, *Bioelectromagnetics* **23**, pp. 329–338, doi: 10.1002/bem.10020.
- [49] Gimitrov, J., Gimitrova, A., (2004), Geomagnetic field effect on cardiovascular regulation, *Bioelectromagnetics* **25**, pp. 92–101.
- [50] Gmitrov, J., (2006), Geomagnetic field modulates artificial static magnetic field effect on arterial baroreflex and on microcirculation, *International Journal of Biometeorology*, **51**(4), pp. 335-344.
- [51] Golombek D. (2002), *Cronobiología humana: ritmos y relojes biológicos en la salud y en la enfermedad*, Argentina, Ed. Universitaria de Quilmes.
- [52] Gombosi T. (1988), *Physics of the space environment*, Cambridge University.
- [53] González J., (2007), *Valoración de Tensión Arterial con Metodología Oscilométrica y Auscultatoria en Operadores de Autobús*. Tesis de licenciatura en la ENMyH (IPN).
- [54] Gruart A, Delgado JM, Escobar C, Aguilar-Roblero R. (2002), *Los relojes que gobiernan la vida*, México, Fondo de Cultura Económica, *La ciencia para todos*, **188**.
- [55] Haisch, (1995), Springer-Verlag, New York, in press.
- [56] Halberg, F., Cornélissen, G., Katinas, G., Siegelova, J., Yoshihiko, W., Sánchez, S., (2008-a), Introduction: Internet - and self-help-based, scientific, preventive and curative chronobiologic health care: much more for less. *Intl. J. of Geronto-Geriatrics*, 11(14):110-118.
- [57] Halberg, F., Cornélissen, G., Kuniaki O., Siegelova, J., Bohumil, F., Dusek, J., Homolka, P., Sánchez, S., R.B. Singh and the BIOCOS project (2008-b), Extended consensus on need and means to detect vascular variability disorders (VVDs) and vascular variability syndromes (VVSs). *Intl. J. of Geronto-Geriatrics*, 11(14):119-146.

- [58] Halberg, F., Cornélissen, Sánchez, S., (2008-c), Continued self-surveillance for treating a frequent vascular variability syndrome. *Intl. J. of Geronto-Geriatrics*, 11(14):147-154.
- [59] Halberg, F., Cornélissen, Beaty, L., (2008-c), Pre-habilitation by women to save the cost of rehabilitation by detecting and treating a premetabolic syndrome. *Intl. J. of Geronto-Geriatrics*, 11(14):159-183.
- [60] Heppner, JP.; Ness, NF.; Searce, CS.; Skillman, TL. (1963), Explorer 10 Magnetic field measurements, *Journal of Geophysical Research*, **68**; pp. 1-46.
- [61] Houghton, J. T., Rycroft, M.J., A. J. Dessler (1994), *Physics of the Space Environment* Cambridge University Press, 567 pp.
- [62] Hundhausen, A. J. (1995), Coronal mass ejections: A summary of SMM observations from 1980 and 1984-1989, in the *Many Faces of the sun*, ed. K.T. Strong, J. Saba and B.
- [63] Hurst JW, Anderson RH, Becker AE, Wilcox BR, (1989), *Atlas del corazón*. Ed. Interamericana.
- [64] *Introduction to Geophysics*, G. D. Garland, W. B. Saunders Company, 1971, 417pp.
- [65] Jacobs, J. (1970), *Geomagnetic Micropulsations*, Springer-verlag, N.Y., H. Berlin.
- [66] Jozsa R, Halberg H, Cornelissen G, (2005), Chronomics, neuroendocrine feedsedwards and the recording and consulting of newcasts-forecsasts of geomagnetics. *Biomedicine and Circadian Rhythms and Clinical Chronotherapy*, pp. s24-s30, doi: 50753-3322(05)80006-x.
- [67] Kawano H, Kawai S, Shirai T, Okada R., (1993), Morphologycal study on vagal innervation in human atrioventricular valves using histochemical method. *Jpn Circ Journal*.
- [68] Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE., (2001), Magnetite-based magnetoreception. *Curr. Opin Neurobiol*, **11**, 462-467, doi: 10.1016/50959-4388(00)00235.
- [69] Kivelson, M., Russell, CT., (1995). *Introduction to Space Physics*, Cambridge University Press.
- [70] Kolesnik AG, Borodin AS, Kolesnik SA, Pobachenko SV., (2005), Discussion paper: An electromagnetic mechanism of solar-terrestrial relations, *International Journal of geomagnetism and aeronomy*, **6**:G11004p1- G11004 p8, doi: 10.1029/2004GI000096.



- [71] Kononenko, V., Ilyina, TA., (1999), Optical Diagnostic of Mechanical Properties of Red Blood Cells on the Deformation by High Frequency Electric Field, *J. Biomed. Optics* **4**(1), 85.
- [72] Langel, RA., Schnetzler, CC., Phillips JD., Horner, RJ., (1982), Initial vector magnetic anomaly map from MAGSAT, *Geophys. Res. Lett.*, **9**(4), 273–276.
- [73] Ledolter, J., Hogg, R., (2010), *Applied Statistics for Engineers and Physical Scientists*, Pearson, 608 pp.
- [74] Lewis T, Fell HS, Stroud WD. (1920), Observations upon flutter and fibrillation. II. The nature of auricular flutter. *Heart*, **7**, pp. 191–233.
- [75] McKay, JC., Prato FS., Thomas AW., (2007), A literature review: the effects of magnetic field exposure on blood flow and blood vessels in the microvasculature. *Bioelectromagnetics*. **28**(2):81-98.
- [76] Melander O., (2001), Genetic factors in hipertensión, what is know and what does it mean? *Blood Pressure*, **10**, pp. 254-270.
- [77] Mendoza B., Sánchez S., (2009), Solar activity and human health at middle and low geomagnetic latitudes in Central America. *Advances in Space Research* **46**, 4, pp 449-459. doi:10.1016/j.asr.2009.06.021.
- [78] Mendez F., (1990) *Introducción a la cardiología*.
- [79] Miller FN, Sims DE., (1996), Contractile elements in the regulation of macromolecular permeability. *Fed Proc*.
- [80] Moore Y., Lenn L., (1972), A retinohypothalamic projection in the rat, *The Journal of comparative neurology*, **146**, 1-14, doi: 10.1002/cne.901460102.
- [81] Mitsutake G, Otsuka D, Hayakawa M, Sekiguchi M, Cornelissen G., (2005), Does Schumann resonance affect our blood pressure?, *Biomedicine and pharmacotherapy*, **59**, pp.S10-S14, doi:50753-332(05)80003-4.
- [82] Moncada S. Plamer RM, Higgs EA, (1991), Nitric oxide: physiology, pathophysiology and pharmacology. *Pharmacol Rev*. **43**, pp. 109-142.
- [83] Murria E., Rumantir M., (2001), Sympathetic nervous system and insulina resistance: from obesity to diabetes, *Am J. Hipertens* **14**, pp. 304-309.
- [84] Navidi, W., (2007), *Estadística para ingenieros y científicos*. Mc Graw Hill, 868 pp.
- [85] Noyes, R. W.(1985), *El Sol, nuestra estrella*, EDAMEX, 354pp.
- [86] Oelkers, W., (1996), Effects of estrogens and progestogens on the rennin-aldosterone system and blood pressure. *Steroids*. **61**(4):166-171.

- [87] Okano, H., (2005), Exposure to a moderate intensity static magnetic field enhances the hypotensive effect of a calcium channel blocker in spontaneously hypertensive rats. *Bioelectromagnetics*. **26**(8):611-623.
- [88] Okano, H., (2008), Effects of static magnetic fields in biology: role of free radicals. *Front Biosci*, **1**(13):6106-25.
- [89] Orapril S., Zaman A., (2003), Pathogenesis of hypertension. *Ann intern Med*, **139**, pp. 761-776.
- [90] Otaola J. A., B. Mendoza, R. Pérez, (1999), El Sol y la Tierra Una relación tormentosa. *La ciencia desde México*, **114**, 119 pp.
- [91] Otsuka K, Oinuma S, Cornelissen G., (2000), Alternating light darkness-influenced human electrocardiographic aegnetoreception in association with geomagnetic pulsations, *Biomedicine and Pharmacotherapy*, **55**(1) pp. s63-s75, doi: 10.1016/S0753-3322(01)90007-1.
- [92] Palmer SJ, Rycroft MJ, Cermack M., (2006), Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. *Surv Geophys*, **27**(5), pp. 557-595, doi: 10.1007/S10712-006-9010-7.
- [93] Phan, T.D., Gosling, J.T., Davis, M.S., Skoug, R.M., (2006), A magnetic reconnection X-line extending more than 390 Earth radii in the solar wind. *Nature letters*, **439**, pp. 175-178, doi: 10.1038/nature04393.
- [94] Parker, E. N. 1963). *Interplanetary Dynamical Processes*. New York: Wiley-Interscience.
- [95] Parks, G., (2004), *Physics of Space Plasmas, an Introduction*. Westview Press, 463 pp.
- [96] Pechere-Bertschi, A., Burnier M., (2004), Female sex hormones, salt and blood pressure regulation. *Am J. Hypertens*. **17**(10):994-1001.
- [97] Persinger M. A., (2004), Weak-to-moderate correlations between global geomagnetic activity and reports of diminished pleasantness: A nonspecific source for multiple behavioral correlates?, *Perceptual and motor skills*, **98**(1) pp. 78-80.
- [98] Persinger M. A., B. E. McKay, C. A. ODonovan, S. A. Koren, (2005), Sudden death in epileptic rats exposed to nocturnal magnetic fields that simulate the shape and the intensity of sudden changes in geomagnetic activity: an experiment in response to Schnabel, Beblo and May, *Journal of Biometeorology*, **49**(4), pp. 256-261, doi: 10.1007/500484-004-0234-2.
- [99] Picoli S, Mendes RS, Malacarne LC., (2007), Similarities between the dynamics of geomagnetic signal and of heartbeat intervals. *A letters Jorunal Exploring the frontiers of physics*, pp. 50006p1-50006p2, doi: 10.1209/0295-5075/80/50006.

- [100] Piddington, J. H. (1960), Geomagnetic storm theory, **65**, pp. 3 -106.
- [101] Priest. E., (1981). Solar magnetohydrodynamics, D. Reidel Publising Company, 465 pp.
- [102] Ptitsyna, N., Villaresi, G., Dorman, L., Iucci, N., Tyastoa, I., (1998), Natural and man-made low-frequency magnetic fields as a potential health hazard, **41(7)**, pp. 687-709.
- [103] Rasmus, E., (2002), Solar Activity and Earth's Climate. Springer, Praxis Publishing. 317 pp.
- [104] Reiter, RJ., (2004), Electromagnetic fields and melatonin production, Biomedecine & Pharmacotherapy, **47:10**, 1993, pp 439-444.
- [105] Reiter, RJ., Tan D., Korkmaz A., (2009), The circadian melatonina rhythm and its modulation:possible impacto on hypertension. J Hypertens, **6** S17-20.
- [106] Richter CP., (1967), Sleep and activity: their relation to the 24-hour clock. Res Publ. Assoc Res Nerv Ment Dis., 45:8-29.
- [107] Rishbeth H., I. Muller-Wodarg, L. Zou, T. Fuller-Rowell, G. Millward, R. Moffett, D. Idenden, and A. Aylward. (2000), Annual and semianual variations in the ionospheric F2-layer: li. physical discussion. Annals of geophysicae, **18**, pp.945–956, doi:10.1007/500585-000-0945-6.
- [108] Rubio AF., Lozano JJ., (1998), Aspectos recientes en la fisiopatología de la hipertensión arterial, 1ª ed., Méx Interamericana-McGraw-Hill, pp. 99-106.
- [109] Rubio AF., (1998), Concepto y clasificación de la hipertensión arterial. En: Rubio A. Hipertensión arterial, temas de medicina interna. AMIM. Interamericana. McGraw-Hill, Méx.
- [110] Rubio AF, Lozano JJ (1999), Apego al tratamiento, un aspecto olvidado en el manejo del paciente hipertenso. Med Int. Méx, **15** pp. 260-263.
- [111] Rubio AF.,(2006), Hipertensión Arterial, Ed. Manual Moderno, S.A. DE C.V.
- [112] Ruegg JC., (1998), Cardiac contractility: How calcium activate the myofilaments. Naturwissenschaften, **85**, pp. 575-582.
- [113] Ruesga E.A., Jaúregui R, Aguilar G, Chiu S., (2005), Manual Moderno.
- [114] Russell, C. T., Khurana, K.K., Arridge, C.S., Dougherty, M.K., (2008), The magnetospheres of Jupiter and Saturn and their lessons for the Earth. 2007. Advances in Space Research, **41**, pp. 1310-1318.

- [115] Sandyk, R., (1993), Weak Magnetic Fields Antagonize the effects of melatonin on blood glucose levels in parkinson's disease, *International Journal of Neuroscience*, **68**, pp. 85-91.
- [116] Scheer, F., Van Montfrans, Van Someren E., Mairuhu G., Buijs R., (2004). Daily Nighttime Melatonin Reduces Blood Pressure in Male Patients With Essential Hypertension. *Hypertension*. **43**:192-197. doi: 10.1161/01.HYP.0000113293.15186.3b
- [117] Semm, P., Schneider, T., Vollrath, L., (1980), Effects of an Earth-strength magnetic field on electrical activity of pineal cells, *Nature*, **288**, pp. 607-608, doi: 10.1038/288607a0.
- [118] Simko, F., Paulis, L., (2007). Melatonin as a potential antihypertensive treatment. *Journal of Pineal Research*. **42**(4):319–322.
- [119] Smolensky, M., (1996), Chronobiology and chronotherapeutics. Applications to cardiovascular medicine. *Am J. Hypertens*. **9**(Pt3):11S-21S.
- [120] Sidney, S., Castellan, N., (2001), Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta. Trillas.
- [121] Steenbeck, M., Krause, F., (1969), *Astron. Nachr*, 291, 49.
- [122] Sydney P., Clarck, Jr., (1982), *La estructura de la Tierra*, Prentice Hall, Inc., 138pp.
- [123] Stoilova I, Dimitrova, S. (2008). Geophysical variables and human health and behavior. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 70 pp. 428-435.
- [124] Suess S. T., Tsurutani B. T., (1998), *From the Sun*. American Geophysical Union, Washington, D.C., 171 pp.
- [125] *Tratado de Anatomía Humana*, (1972), Tomo I. Aparato Circulatorio. Ed. Porrúa.
- [126] The Seven Report of the Joint National Committee on Detection, evaluation and treatment of high blood pressure. *JAMMA* (2003), **289**, pp. 2560-2572.
- [127] Ulmer W., (2005) On the role of the interactions of ions with external magnetic fields in physiologic processes and their importance in chonobiology. *In Vivo* **16**, pp. 32-36.
- [128] Van Ballegooijen, AA., Martens, PCH. (1989), Formation and eruption of solar prominences, *Journal: Astrophysical Journal, Part 1*, **343**, pp. 971-984, doi: 10.1086/167766.
- [129] Vargas G., Rubio AF., (1997), El óxido nítrico, más que un factor relajante endotelial. *Med. Int. Méx.*, **13**, pp. 294-300.

- [130] Velázquez O., Rosas M., Lara AE., Pastelin G., (2002), Hipertensión arterial en México: Resultados de ENSA 2000. Arch Cardio Méx., **72**, pp. 71-84.
- [131] Wiggers CJ., (1921), Studies on the consecutive phases of the cardiac cycle. Am J Physiol, **56**, pp. 415-459.
- [132] Wood, W. P., Muffatt, H. K., (1985), Geophys. Astrophys. Fluid Mechanics, **32**, 135.
- [133] Rikitake, T., (1966). Electromagnetism and the Earth's interior. Elsevier Amsterdam.
- [134] Yashiro, S., N. Gopalswamy, G. Michalek, O. C. St. Cyr, S. P. Plunkett, N. B. Rich, and R. A. Howard (2004), A catalog of white light coronal mass ejections observed by the SOHO spacecraft, J. Geophys. Res., 109, A07105, doi:10.1029/2003JA010282.
- [135] Yoshimura, H., (1975), Astrophys. J. Suppl., **29**, 467.
- [136] Van Ballegooijen, A. A., Martens, P. C. H. (1989), Astrophys. J. **343**, pp. 971-984.
- [137] Zhadin MN., (2001), Review of Russian Literature on Biological Action of DC and Low-Frequency AC Magnetic Fields. Bioelectromagnetics, pp. 27-45, doi: 10.1002/1521-186x(200101)22:1