



# UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias  
División de Ciencias Biológicas  
Departamento de Ciencias Ambientales

## INSTITUTO DE NEUROCIENCIAS

Correlación electroencefalográfica  
prefronto-parietal durante la ejecución  
de Torres de Hanoi en niños,  
adolescentes y adultos jóvenes

Tesis

que para obtener el grado de

**MAESTRA EN CIENCIAS DEL COMPORTAMIENTO  
(OPCIÓN NEUROCIENCIAS)**

presenta

***Lucía Ester Rizo Martínez***

Comité tutorial

**Dr. Miguel Angel Guevara Pérez (Director)**

Dra. Marisela Hernández González

Dra. Araceli Sanz Martín

Dra. Olga Inozemtseva

A Dios por la vida y la oportunidad de evolucionar.

A mis papás por sus cuidados, por estar conmigo, por su apoyo incondicional, por la libertad que siempre me han brindado para tomar mis decisiones y la confianza que siempre han tenido en mí.

A mis hermanos Miguel, Juan, Elsa, Blanca y Francisco, por su presencia, por su compañía y por compartir conmigo los buenos y malos momentos a lo largo de mi vida.

A Jesús Miguel, por su compañía y apoyo incondicional, por su paciencia, perseverancia y por impulsarme a ser mejor como persona.

A mis amigos de siempre: Peque, Yolanda, Gera, Alejandra, Germán, Enrique, Lupita, Ibeeth, Martha, Estela, Rosa y René, por las experiencias inolvidables.

A Rodrigo, Jaqueline, Oscar y Naum, por su valiosa aunque breve presencia en mi vida y por recordarme lo corta que es ésta para realizar nuestros sueños.

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a la Universidad de Guadalajara, al Instituto de Neurociencias y al CONACYT por darme la oportunidad de ingresar a la aventura del conocimiento científico.

Gracias a mi tutor: el Dr. Miguel Ángel Guevara, por su confianza, conocimientos, apoyo, comprensión y estímulo para seguir en el difícil mundo científico y vencer las inseguridades y crisis que se nos presentan a cada momento en este ámbito.

Gracias a mi otra tutora: la Dra. Marisela Hernández González, por sus exigencias que obligan a crecer, por sus oportunas y excelentes sugerencias, por su comprensión, su atención, tiempo y dedicación hacia mi trabajo en esta institución.

Gracias a la Dra. Araceli Sanz, por sus conocimientos y sugerencias que me ayudaron a ordenar más mis ideas y por su pasión por las Neurociencias, que motiva a seguir amando más ésta área.

Gracias a la Dra. Olga Inozemtseva, por sus conocimientos, por su ética y por su apoyo incondicional que me ayudaron a aprender y comprender áreas de las Neurociencias que me ayudaron a ampliar mis conocimientos y perspectivas.

Gracias a todos mis compañeros de generación, por sus conocimientos, compañía y apoyo.

A los Doctores del Instituto de Neurociencias que compartieron conmigo un poco de sus conocimientos a través de sus materias: Dr. Sergio, Dr. Daniel, Dra. Julieta, Dra. Esmeralda, Dr. Andrés, Dr. Jorge y al Dr. Emilio.

Gracias a mis compañeros de laboratorio: a la Dra. Claudia Amezcua por su apoyo y sencillez; a Rocío Barajas por enseñarme las técnicas necesarias para llevar a cabo mi experimento; a Juan José, a Paulina, a Francisco, a Koral, a Blanca, a Ricardo, a Marina, a Mayra I y a Mayra II, por su apoyo, sugerencias y su compañerismo.

A todos los niños (sus mamás y maestros), adolescentes y adultos jóvenes que, de manera generosa, me brindaron su tiempo y esfuerzo para participar en este estudio, así como a las instituciones que me brindaron la confianza y facilidades necesarias para apoyarme en mis actividades.

El presente trabajo fue realizado en el laboratorio de Correlación Electroencefalográfica y Conducta del Instituto de Neurociencias de la Universidad de Guadalajara.

## RESUMEN

Recientes estudios han mostrado patrones de maduración cerebral, tales como incrementos en la mielinización, así como cambios morfológicos específicos entre la infancia, adolescencia y adultez temprana. Asimismo, se han reportado también patrones estándares electroencefalográficos propios de cada edad mencionada. A la fecha, existen evidencias que apoyan la afirmación de que los más altos procesos cognitivos, incluyendo el término “funciones ejecutivas”, dependen en gran medida del funcionamiento adecuado de la corteza prefrontal y su conexión con zonas posteriores, y que tales funciones siguen un proceso de desarrollo y maduración a través de la edad. Para la evaluación de tales procesos, se han utilizado diversas pruebas, tal es el caso de las Torres de Hanoi, la cual es una prueba de organización y programación visoespacial que requiere para su ejecución de procesos relacionados con las funciones ejecutivas y, por tanto, de la adecuada funcionalidad prefronto-parietal y de estructuras cerebrales relacionadas.

El objetivo del presente estudio fue caracterizar, a través del electroencefalograma (EEG), el grado de acoplamiento funcional o correlación prefronto-parietal durante la ejecución de Torres de Hanoi y determinar si el grado de acoplamiento difiere en relación a la edad de sujetos masculinos: niños, adolescentes y adultos.

Participaron 51 sujetos masculinos sanos clasificados en tres grupos (17 en cada grupo): grupo 1, de 11 - 13 años; grupo 2, de 18 - 20 años y grupo 3, de 26 - 30 años. Se efectuó el registro electroencefalográfico en las derivaciones F3, F4, P3 y P4 (de acuerdo al Sistema Internacional 10-20 de Jasper, 1958), en dos condiciones: basal (5 minutos de EEG con ojos abiertos) y Hanoi (registro EEG durante la ejecución de Torres de Hanoi, en versión computarizada durante 7 minutos).

Se comparó la correlación interhemisférica (entre zonas frontales y parietales) e intrahemisférica (derecha e izquierda) para las siguientes bandas: delta (de 1 a 3.5 Hz), theta (de 4 a 7.5 Hz), alfa1 (de 8 a 10.5 Hz.), alfa2 (de 11 a 13.5 Hz), beta1 (de 14 a 19.5 Hz) y beta2 (de 20 a 30.5 Hz). En los parámetros de ejecución de Torres de Hanoi no se encontraron diferencias significativas entre grupos, sin embargo, la mayoría de los sujetos del grupo 1 (13 de 17) no terminaron la tarea a comparación de los sujetos de mayor edad (grupos 2 y 3) que sí llegaron a completar la tarea en el tiempo asignado (7 minutos).

En términos generales, los sujetos de mayor edad (grupos 2 y 3) presentaron una mayor correlación en todas las derivaciones y bandas con respecto al grupo 1. En la

comparación entre condiciones, ninguno de los tres grupos presentó cambios en las derivaciones frontales (F3-F4) en la condición Hanoi con respecto a la basal, sin embargo, se encontró un patrón de acoplamiento fronto-parietal característico para cada edad durante la ejecución de Hanoi: el grupo 1 mostró una mayor correlación interparietal (P3-P4) en theta y alfa2; el grupo 2 mostró una alta correlación interparietal (P3-P4) de todas las bandas, así como un incremento de la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) de las frecuencias rápidas (alfa1, alfa2, beta1, beta2) y derecha (F4-P4) de todas las bandas, excepto en alfa2; el grupo 3 presentó un incremento de la correlación interparietal (P3-P4) en delta y theta, y un incremento de la correlación intrahemisférica derecha en alfa1. En su conjunto, los datos de ejecución de Hanoi como los patrones de correlación EEG característicos de cada edad, pudieran estar relacionados con la eficacia de la ejecución de esta prueba y por lo tanto con el grado de madurez cerebral subyacente a dicha ejecución.

## ABSTRACT

Recent studies have revealed patterns of cerebral maturation, such as increases in myelination, as well as specific morphological changes between infancy, adolescence and early adulthood. Also, there are reports of standard electroencephalographic patterns proper to each one of the aforementioned age groups. Today, there exists evidence to support the affirmation that the highest cognitive processes, including those known as the “executive functions”, depend to a great degree on the adequate functioning of the prefrontal cortex and its connection to posterior zones, and that such functions follow a process of development and maturation as age increases. A variety of tests have been utilized to evaluate these processes, including the Towers of Hanoi task, which probes visuospatial organization and programming, and whose execution requires processes related to the executive functions and, therefore, to the adequate functionality of the prefrontal-parietal area and related cerebral structures.

The objective of this study was to use electroencephalograms (EEGs) to characterize the degree of functional coupling or the prefrontal-parietal correlation during execution of Towers of Hanoi, and to determine if the degree of coupling differs in relation to the age of male subjects: including boys, adolescents and adults.

A total of 51 healthy male subjects participated; classified into three groups (17 individuals in each group): group 1, 11 - 13 years; group 2, 18 - 20 years; and group 3, 26 - 30 years. Electroencephalographic recording was carried out at the F3, F4, P3 and P4 derivations (in accordance with the International 10-20 Jasper System, 1958), and in two conditions: basal (5 minutes of EEG with eyes open), and Hanoi (EEG recording during execution of the Towers of Hanoi task, using a computerized version during a period of 7 minutes).

Interhemispheric (between frontal and parietal zones) and intrahemispheric (right and left) correlations were compared for the following bands: delta (from 1 to 3.5 Hz), theta (from 4 to 7.5 Hz), alpha1 (from 8 to 10.5 Hz.), alpha2 (from 11 to 13.5 Hz), beta1 (from 14 to 19.5 Hz) and beta2 (from 20 to 30.5 Hz). The execution parameters of the Towers of Hanoi task showed no significant differences among the groups; however, the majority of subjects in group 1 (13 out of 17) failed to finish the task, compared to the older subjects (groups 2 and 3) who succeeded in completing the test within the time allotted (7 minutes).

In general terms, the older subjects (groups 2 and 3) presented a higher correlation in all of the derivations and bands, when compared to group 1. In the comparison between the two conditions, none of the three groups presented changes in the frontal derivations (F3-F4)

during the Hanoi condition with respect to the basal condition; however, a characteristic frontal-parietal coupling pattern was found for each age group during execution of the Hanoi task: group 1 showed a higher interparietal correlation (P3-P4) in theta and alpha2; group 2 showed a high interparietal correlation (P3-P4) in all the bands, and an increase in the left intrahemispheric correlation (F3-P3) in the rapid frequencies (alpha1, alpha2, beta1, beta2) and right (F4-P4) of all the bands, except for alpha2; group 3 presented an increase in the interparietal correlation (P3-P4) in delta and theta, and an increase in the right intrahemispheric correlation in alpha1. Taken together, these data from the execution of the Hanoi task, and the EEG correlation patterns characteristic of each age group, could be related to the efficacy in the execution of this test and, therefore, to the degree of cerebral maturity underlying said execution.



## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES.....	5
2.1 <i>Corteza prefrontal</i> .....	5
2.1.1 Conexiones de la corteza prefrontal.....	7
2.1.2 Subdivisiones de la corteza prefrontal.....	8
2.1.3 Circuitos fronto-subcorticales.....	10
2.1.4 Circuitos prefrontales.....	11
2.1.5 Corteza prefrontal dorsolateral.....	13
2.1.6 Funciones de la corteza prefrontal dorsolateral.....	14
2.1.7 Funciones ejecutivas.....	17
2.2 <i>Corteza parietal</i> .....	23
2.2.1 Funciones de la corteza parietal.....	24
2.2.2 Conexiones del área 7.....	26
2.2.3 Funciones del área 7.....	27
2.3 Relación entre la corteza prefrontal y la corteza parietal.....	27
2.4 Desarrollo de la corteza prefrontal del nacimiento a la adultez temprana.....	32
2.4.1 Estudios realizados sobre madurez cerebral en niños, adolescentes y adultos.....	33
2.4.2 Desarrollo de la corteza prefrontal dorsolateral en humanos.....	37
2.4.3 Desarrollo de las funciones ejecutivas a través de la edad.....	40
2.5 Tareas que evalúan las funciones ejecutivas y la funcionalidad prefrontal.....	46
2.5.1 Test de clasificación de tarjetas de Wisconsin (WCST) .....	46
2.5.2 Test stroop de colores y palabras.....	47
2.5.3 Torres de Londres .....	48
2.5.4 Torres de Hanoi.....	49
2.5.4.1 Investigaciones de inteligencia artificial con Torres de Hanoi.....	54
2.5.4.2 Funciones ejecutivas implicadas en la resolución de las Torres de Hanoi.....	56
2.6 <i>Electroencefalograma (EEG)</i> .....	62
2.6.1 Factores que afectan al EEG.....	64
2.6.2 Cambios observados en el EEG durante la realización de tareas mentales.....	65
2.6.3 Modificaciones del EEG a través de la edad.....	66

2.6.4	Correlación.....	67
2.6.5	Coherencia.....	68
2.6.6	Estudios sobre correlación electroencefalográfica, efectos de la edad y actividad mental.....	68
3.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	73
4.	OBJETIVO GENERAL.....	74
4.1	Objetivos específicos.....	74
5.	HIPÓTESIS.....	74
5.1	Hipótesis específicas.....	74
6.	VARIABLES.....	75
7.	MÉTODO.....	75
7.1	Procedimiento.....	76
7.1.1	Instrucciones previas al experimento.....	77
7.2	Registro Electroencefalográfico.....	78
7.3	Aplicación de la prueba Torres de Hanoi.....	79
7.4	Parámetros a medir en la prueba de Torres de Hanoi.....	81
8.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	82
9.	RESULTADOS.....	83
9.1	Resultados de la ejecución de Torres de Hanoi.....	83
9.2	Resultados electroencefalográficos de las bandas.....	86
9.2.1	Resultados de la comparación entre grupos.....	86
9.2.2	Resultados de la comparación entre condiciones.....	91
10.	DISCUSIÓN.....	98
11.	CONCLUSIONES.....	113
12.	REFERENCIAS.....	115
	APÉNDICE.....	132

## 1. INTRODUCCION

La corteza prefrontal ha sido definida como el principal receptor cortical de las proyecciones del núcleo mediodorsal del tálamo (Rose & Woolsey, 1948). La principal y más general función de la corteza prefrontal es la organización temporal de las acciones hacia metas biológicas y cognitivas (Luria, 1966; Fuster, 1997). De forma particular, la corteza prefrontal dorsolateral humana esta involucrada en procesos cognitivos complejos que han sido descritos como funciones ejecutivas, tales como la memoria de trabajo y el procesamiento de información relevante, control de la atención, razonamiento y toma de decisiones, así como la organización temporal de la conducta (Brown & Bowman, 2002). Así mismo se sabe que las conexiones recíprocas de esta región con el hipocampo y con las cortezas de asociación posterior son de especial importancia para los aspectos cognitivos y conductuales regulados por esta área cerebral (Fuster, 2002).

Por otro lado, tanto en la investigación científica como en la evaluación neuropsicológica se han aplicado diversos tipos de pruebas para medir funciones prefrontales, tales como: Wisconsin Card Sorting Test (WCST), Stroop, Torres de Londres y Torres de Hanoi (THO) entre otras. Torres de Hanoi es una prueba que tiene componentes de tipo visoespacial y de funciones ejecutivas tales como la memoria de trabajo, inhibición, planeación, etc. Actualmente, se han encontrado deficiencias en la realización de TOH en mujeres con síndrome de X frágil (Mazzocco, Hagerman, Cronister & Pennington., 1992), en patologías como el autismo (Ozonoff, Pennington, & Rogers, 1991), desorden obsesivo compulsivo (Cavedini, Cisima, Riboldi, D'Annucci & Bellodi, 2001) y esquizofrenia (Goldberg, Cyr, & Weinberger, 1990). Asimismo, un importante número de estudios han demostrado que, entre pacientes con lesiones del lóbulo frontal, existe deterioro en la ejecución de Torres de Hanoi (Goel & Grafman, 1995).

Por otro lado, existen varios trabajos en los cuales se ha mostrado que la región prefrontal es el área cortical que más tardíamente alcanza su completo desarrollo y maduración. En el individuo humano normal, la maduración prefrontal total no es alcanzada sino hasta después de la adolescencia (Fuster, 1999). Se sabe también que las habilidades ejecutivas presentan un proceso de desarrollo y maduración con la edad, tal que a través de la infancia, la adolescencia y hasta la edad adulta se adquiere gradualmente una

capacidad de procesamiento más efectiva favorecida por procesos de poda sináptica y mielinización de los tractos nerviosos, la cual permite una transmisión más rápida de los impulsos nerviosos. Así pues, el presente estudio tiene como objetivo principal determinar, a través de registro electroencefalográfico, la relación entre la madurez cerebral y la funcionalidad inter e intrahemisférica de los lóbulos frontales y parietales durante la ejecución de Torres de Hanoi (THO), en sujetos masculinos púberes, adolescentes y adultos jóvenes.

La importancia de estudiar la población antes mencionada, radica en la poca información que se tiene acerca de la funcionalidad cerebral a través del desarrollo, y de los cambios maduracionales en el aspecto cognitivo humano.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Corteza prefrontal

Los lóbulos frontales son la porción más anterior de la corteza, son los mayores en extensión en la especie humana y sus funciones son consideradas como aquellas que más fuertemente nos caracterizan e identifican como humanos (Portellano, 2005). En la especie humana, los lóbulos frontales constituyen la tercera parte del total de la corteza cerebral. Se dividen en dos grandes áreas: la corteza motora (parte posterior) y la corteza prefrontal (parte anterior). Por otro lado, existen tres divisiones principales citoarquitectónicas en los lóbulos frontales. La corteza agranular se refiere al área motora (áreas 4 y 6 de Brodmann), en la tanto la capa piramidal externa (III) como la capa piramidal interna (V) son grandes, y provienen de una capa profunda, virtualmente sin capa granular interna (IV). En la corteza prefrontal, por otro lado, la capa IV, la capa granular interna, reaparece produciendo una corteza granular distinta. El campo frontal de los ojos está entre las cortezas granular y agranular como una tercera corteza llamada disgranular (Stuss & Benson, 1984). A diferencia de la corteza motora, la corteza prefrontal no tiene conexiones con las áreas motoras primarias, sino con las áreas asociativas temporales, parietales y occipitales, por lo que sus lesiones no producen parálisis (Portellano, 2005).

Anatómicamente, los lóbulos frontales son el área de la corteza cerebral anterior a la cisura de Rolando y sobre la cisura de Silvio. Los dos hemisferios pueden ser divididos en tres áreas principales: dorsal-lateral, medial y basilar orbital. Actualmente, existen diversas formas de división de los lóbulos frontales. Basándonos en la numeración de Brodmann, hay tres subdivisiones: el área 4 o giro precentral, es el área motora primaria, junto con el área 6 y la parte posterior del área 8 llamada área premotora. Las áreas 44 y 45, también conocidas como área de Broca, son consideradas parte del área premotora (Jouandet & Gazzaniga, 1979). El área 8 representa también el área frontal de los ojos. El resto, que incluye las áreas: 9, 10, 11, 12, 13, 14, 24, 32, 46 y 47 de Brodmann corresponde a la corteza prefrontal (Garey, 1999).

La corteza prefrontal (CPF) fue definida clásicamente por Brodmann en 1913 basándose en la citoarquitectura del cerebro primate, mientras que la neurobiología

moderna se basa en sus conexiones con estructuras corticales y subcorticales. Hay variaciones entre especies en estas características y hay polémica en su definición (Krasnegor Lyon & Goldman-Rakic, 1997).

En el cerebro mamífero la CPF está convencionalmente definida por dos criterios básicos: citoarquitectura y conectividad. Tales criterios delimitan aproximadamente el mismo territorio, caracterizado en todas las especies de mamíferos por una prominente capa IV celular o capa granular (Fuster, 2002) y una firme conectividad con el núcleo mediodorsal del tálamo (Rose & Woolsey, 1948)

Los neurobiólogos describen convencionalmente a la CPF como una adquisición evolutiva reciente. Ésta data, al menos, de mediados del periodo jurásico (alrededor de 175 millones de años) y está presente en todos los mamíferos (Krasnegor, Lyon & Goldman-Rakic, 1997). La CPF es considerada la corteza motora de orden superior, en la que se sustentan las funciones cognoscitivas que coordinan la ejecución de las más elaboradas y novedosas acciones del organismo. Por una buena razón ha sido llamada el órgano de la creatividad (Fuster, 1999). Además, se ha considerado que la principal y más general función de la corteza prefrontal es la organización temporal de las acciones hacia metas biológicas y cognitivas (Luria, 1966; Fuster 1997).

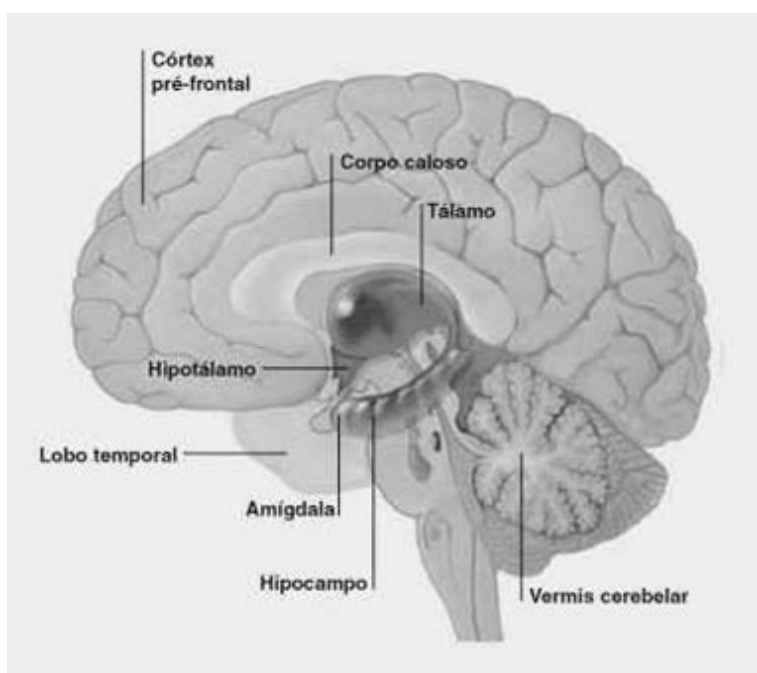
Filogenéticamente además de ontogenéticamente, la corteza prefrontal es una de las últimas regiones de la neocorteza en completar su total desarrollo y maduración; muestra una madurez tardía citoarquitectónica en parámetros como: el número de células, volumen del soma celular y el tamaño y número de espinas dendríticas de sus neuronas, así como en el proceso de mielinización de sus fibras aferentes y eferentes. En el individuo humano normal, la maduración prefrontal total no es alcanzada sino hasta después de la adolescencia (Fuster, 1999).

El crecimiento evolutivo desproporcionado de la corteza prefrontal es paralelo al de las regiones temporales y parietales. Por lo que es legítimo inferir que la expansión evolutiva de la corteza de asociación, tanto posterior como prefrontal, está íntimamente relacionada con la evolución de las funciones cognitivas. La región prefrontal lateral incluye proyecciones más lejanas y más tardías que otras regiones prefrontales (Fuster, 2002).

### 2.1.1 Conexiones de la corteza prefrontal

Se ha argumentado que la corteza prefrontal es la mejor conectada de todas las estructuras corticales. Las 3 regiones prefrontales (dorsolateral, orbital y medial) están recíprocamente conectadas entre ellas, así como con el núcleo del tálamo anterior y mediodorsal, la máxima estación de integración neural dentro del tálamo (Goldberg, 2002).

La corteza prefrontal está conectada con la corteza de asociación posterior (la máxima estación de integración perceptual), con la corteza premotora, con los ganglios basales y con el cerebelo. Además, está conectada con el hipocampo y otras estructuras relacionadas que se sabe son críticas para la memoria; con la corteza cingulada, que se dice es crítica para la emoción; y con la amígdala, el hipotálamo y los núcleos del tallo cerebral, encargados de la activación cerebral y de llevar información del medio interno a la corteza prefrontal (Goldberg, 2002) (ver figura 1).



**Figura 1.** Conexiones subcorticales de la corteza prefrontal

### **2.1.2 Subdivisiones de la corteza prefrontal**

La corteza prefrontal comprende las áreas: 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 24, 32, 46 y 47 de Brodmann (Garey, 1999).

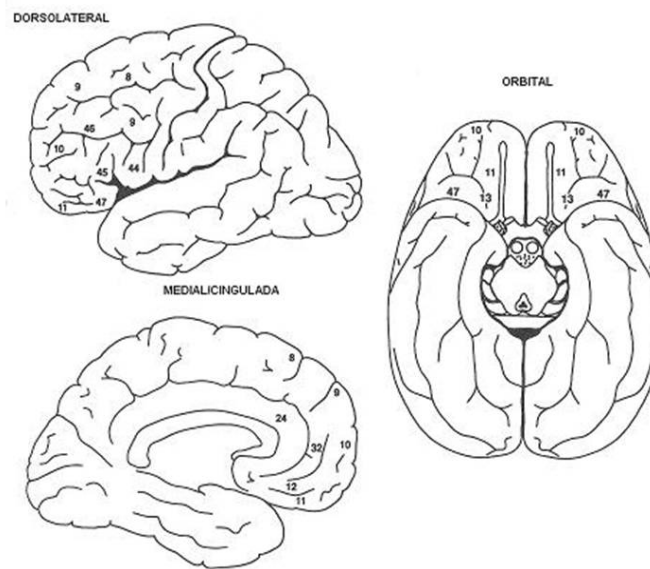
En primates y en humanos, la corteza prefrontal puede subdividirse en tres regiones principales (Fuster, 2001): orbital, medial y dorsolateral (ver Figura 2):

La región orbital prefrontal (también llamada prefrontal ventral) comprende las áreas 10-15, 25 y 47 de Brodmann. Ésta a su vez se divide en área lateral y área medial. Las funciones de la primera están relacionadas con las emociones y la conducta social, mientras que las del área medial están implicadas en el procesamiento apetitivo y en el control del estado interno del organismo (Tekin & Cummings, 2002).

La región medial de la corteza prefrontal comprende las áreas 9-13, 24 y 32 de Brodmann, además incluye la corteza anterior del cíngulo, la cual parece involucrada en la motilidad general, motivación, atención y emoción (Tekin & Cummings, 2002).

La región dorsolateral incluye las áreas: 8-12, 46 y 47 de Brodmann. Provee el soporte cognitivo a la organización temporal del comportamiento, habla y razonamiento. Se relaciona con funciones ejecutivas tales como la memoria de trabajo y la planeación (Tekin & Cummings, 2002).



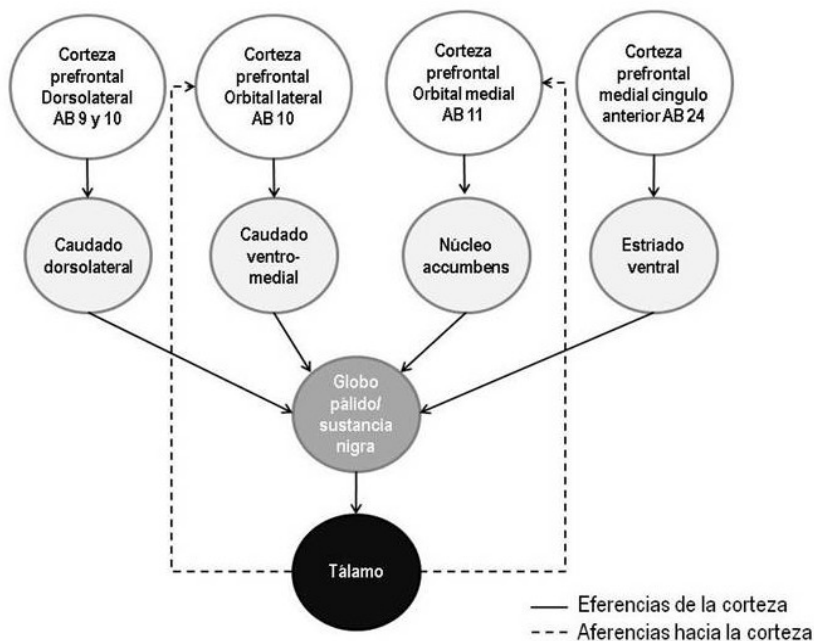


**Figura 2.** Vistas lateral, ventral (orbital) y medial de la corteza prefrontal indicando las áreas (en números) de la clasificación de Brodmann (tomado de Fuster, 1997).

En años recientes se ha considerado, en primates, otra región prefrontal anatómica y funcionalmente distinta a las anteriormente mencionadas: la corteza frontopolar, también conocida como polo frontal o corteza frontal rostral (corresponde a una parte del área 10 de Brodmann), la cual comprende la parte más anterior del lóbulo frontal y, a pesar de muchos datos de estudios de neuroimagen funcional, ha sido difícil definir su descripción funcional. Actualmente no hay estudios en los cuales la actividad de neuronas frontopolares haya sido registrada, posiblemente porque esta área es difícil de acceder y estudiar electrofisiológicamente. Además, los estudios neuroanatómicos esenciales de conexiones neuronales y citoarquitectura de esta región, en primates no humanos, son muy recientes. Entre las aportaciones sobre las funciones que se han relacionado con esta región están por ejemplo la de Christoff y Gabrieli (2000), quienes sugirieron que el área 10 en humanos debe estar especializada “para el procesamiento explícito de estados mentales internos y eventos – o evaluación introspectiva de sentimientos y pensamientos de uno mismo”; mientras que Koechlin, Basso, Peitri, Panzer & Grafman (1999) han sugerido que la corteza frontopolar media la “ramificación cognitiva” o “la habilidad humana para mantener en mente metas mientras explora y procesa metas secundarias, un proceso generalmente requerido en la planeación y razonamiento.”

### 2.1.3 Circuitos fronto-subcorticales

La actividad cortical de los lóbulos frontales está regulada por varios circuitos frontosubcorticales paralelos y segregados. Alexander, De Long & Strick (1986) introdujeron el concepto de “circuitos frontosubcorticales” para designar a los diferentes circuitos implicados en diferentes procesos: *un circuito motor*, que se origina en el área motora suplementaria, *un circuito oculomotor*, que se origina en los campos visuales frontales; el circuito *dorsolateral prefrontal*, que se origina en las áreas 9 y 10 de la región prefrontal encargándose de mediar las funciones ejecutivas; el del *cíngulo anterior*, que se origina en el área 24 de Brodmann (corteza anterior del cíngulo), involucrado en los mecanismos motivacionales; y el *circuito orbitofrontal*, originado en la corteza orbital frontal y que consta de una división medial encargada de los aspectos apetitivos e información interna del organismo, y otra lateral, encargada de aspectos emocionales y sociales de la conducta (ver Figura 3).



**Figura 3.** Representación esquemática de los circuitos frontosubcorticales prefrontales (Tekin & Cummings, 2002).

Todos los circuitos de la corteza prefrontal contienen la siguiente secuencia general de conexiones entre las estructuras que los componen: *Corteza prefrontal – estriado – globo pálido/sustancia negra – tálamo* (Tekin & Cummings, 2002). Sin embargo, aunque todos los circuitos comparten estructuras en común, éstos se mantienen separados anatómicamente.

Por otro lado, en tales circuitos intervienen varios neurotransmisores. Por ejemplo, la proyección corticoestriatal está constituida por neuronas glutaminérgicas excitadoras. El GABA es el neurotransmisor inhibitorio de la proyección entre el estriado y el pálido y entre el pálido y el tálamo. Finalmente, la proyección talamocortical es excitatoria. Otros transmisores como la acetilcolina, la dopamina y la serotonina también están presentes en el circuito forman un papel muy importante en su funcionalidad.

#### **2.1.4 Circuitos Prefrontales**

I. Circuito Dorsolateral Prefrontal: la corteza dentro y alrededor del surco principal y en la convexidad prefrontal dorsal (áreas 9 y 10 de Brodmann) son el origen del circuito dorsolateral prefrontal. La proyección de esta área cortical termina en la región dorsolateral del núcleo caudado (Goldman & Nauta, 1976). Importantes proyecciones corticoestriadas a este mismo sector surgen de la corteza parietal posterior (área 7) y el área premotora arcuata (Selemon & Goldman Rakic, 1985). Las porciones rostrales del núcleo caudado proyectan al globo pálido dorsomedial y a las porciones rostrales de la sustancia nigra reticulata (SNr) (Szabo, 1962). El globo pálido dorsomedial proyecta a la porción parvocelular del núcleo talámico anterior ventral (Kuo & Carpenter, 1973), en tanto que la SNr proyecta al tálamo mediodorsal (Ilinsky, Jouandet & Goldman Rakic, 1985) proyectando de regreso a la corteza prefrontal dorsolateral en y alrededor del surco principal (Jacobson, Butters & Tovsky, 1978). Las lesiones en este circuito producen deficiencias en una serie de funciones cognitivas superiores tales como planificación, secuenciación, flexibilidad, memoria de trabajo espacial y verbal y auto-conciencia, entre otras (Tekin & Cummings, 2002).

II. Circuito Orbitofrontal lateral y medial: el circuito orbitofrontal está comprendido por dos subcircuitos paralelos que se originan en las áreas 10 y 11 de Brodmann (Chow &

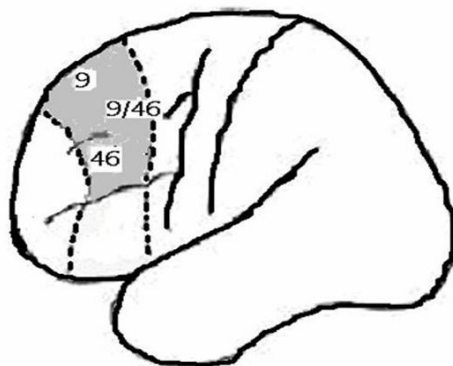
Cummings, 1999). La corteza lateral orbitofrontal (área 10 de Brodmann) proyecta al sector ventromedial del núcleo caudado. Esta parte del núcleo caudado también recibe entradas de las áreas de asociación auditivas y visuales del giro temporal inferior y superior, respectivamente y también recibe entradas de las áreas de asociación auditivas y visuales del giro temporal inferior y superior, respectivamente (Selemon & Goldman-Rakic, 1985). Por otro lado, la corteza medial orbitofrontal (área 11 de Brodman) envía proyecciones al estriado ventral, específicamente al núcleo accumbens (Chow & Cummings, 1999). Ambas porciones proyectan al sector dorsomedial del globo pálido interno y a la porción rostromedial de la sustancia nigra pars reticulata (SNr) (Szabo, 1962). Esta última proyecta al núcleo del tálamo anteroventral y al núcleo del tálamo dorsomedial (Carpenter, Nakano & Kim, 1976). El “circuito cerrado” de los circuitos orbitofrontal lateral y orbitofrontal medial se completa con la regresión de las proyecciones de esas dos regiones talámicas a las cortezas orbitofrontal lateral y medial respectivamente (Ilinsky, Jouandet & Goldman Rakic, 1985). Este circuito está involucrado en la iniciación de las conductas sociales y en la inhibición de las conductas inapropiadas. Las funciones orbitofrontales son relevantes en la evaluación de conductas riesgosas. Las lesiones en esta área producen conductas tales como la dependencia ambiental y conductas sociales inapropiadas, así como alteración en la percepción o procesamiento de modalidades sensoriales.

III. Circuito del Cíngulo Anterior: las neuronas del cíngulo anterior son el origen del circuito cíngulo-subcortical. Desde el área 24 de Brodmann, estas neuronas proyectan hacia el caudado ventromedial y putamen ventral (que juntos construyen el estriado ventral), al núcleo accumbens y al tubérculo olfatorio, es decir, a las áreas que constituyen el estriado límbico (Selemon & Goldman Rakic, 1985). Las proyecciones de estas estructuras se dirigen hacia la porción rostromedial del globo pálido y región rostradorsal de la SNr (Haber, Lynd & Mitchells, 1990). El circuito se cierra con conexiones entre el pálido ventral y el núcleo talámico mediodorsal (Haber, Wolfe & Groenewegen, 1993) y desde la región dorsal de éste hacia la corteza cíngular anterior (Giguere & Goldman Rakic, 1988) El cíngulo anterior es importante en el monitoreo de las conductas, en la corrección de errores y en la motivación (Tekin & Cummings, 2002).

### 2.1.5 Corteza prefrontal dorsolateral

La región prefrontal lateral posee claras proyecciones que se desarrollan de forma tardía y más lejanas que otras regiones prefrontales (Fuster, 2002).

Dentro de la corteza prefrontal, la subregión medio-dorsolateral (áreas 9, 46 y 9/46 de Brodmann) (ver Figura 4) ha presentado un gran incremento de su tamaño a través de la evolución comparada a las otras regiones de la corteza prefrontal. La corteza prefrontal dorsolateral medial consiste de la mitad de la sección del giro frontal superior y medio, extendiéndose detrás del polo frontal (área 10) al área 8 (Petrides & Pandya, 1999) (ver Fig. 3). Asimismo, la CPF dorsolateral ha sido definida históricamente por sus conexiones recíprocas con la subdivisión parvocelular del núcleo mediodorsal del tálamo (Rose & Woolsey, 1948; Goldman-Rakic & Porrino, 1985). Este núcleo del tálamo ha presentado un incremento filogenéticamente proporcional al incremento en el tamaño de la corteza prefrontal dorsolateral y desproporcionadamente mayor al de otras regiones del núcleo mediodorsal (Khokhryakova, 1979).



**Figura 4.** Vista lateral de la corteza prefrontal, en la que se observan el área 9 y 46, consideradas como las principales áreas de la corteza prefrontal dorsolateral.

La CPF dorsolateral medial, a través de sus conexiones recíprocas con la corteza temporal superior (Seltzer & Pandya, 1989), la corteza parietal posterior (área 7; Goldman Rakic & Schwartz, 1982; Petrides & Pandya, 1984), el cíngulo posterior y anterior (Vogt & Pandya, 1987), la corteza premotora (Barbas & Mesulam, 1985), la corteza motora

suplementaria (Wiesendanger, 1981), la corteza retrosplenial (Petrides & Pandya, 1999), y el neocerebelo (Sasaki, Jinnay, Gemba, Hashimoto & Mizuno, 1979), modula la actividad de esas regiones y recibe información de ellas, por lo que también es modulada por éstas. Además, la CPF dorsolateral medial envía densas proyecciones al núcleo caudado (Kemp & Powell, 1970). Las proyecciones de la CPF dorsolateral, la corteza parietal posterior y la corteza temporal superior están intrínsecamente relacionadas, incluyendo al núcleo caudado, facilitando la posibilidad de que esas regiones neurales se intercomunicuen e influyan en la funcionalidad de unas y otras (Goldman-Rakic & Schwartz, 1982).

En cuanto a su evolución ontológica, la corteza CPF dorsolateral tiene un periodo extremadamente prolongado de maduración, extendiéndose hasta la adultez (Yakovlev & Lecours, 1967; Huttenlocher, 1990; Thatcher, Walker & Giudice, 1987). Algunos estudios afirman que ciertos avances cognitivos observados en el primer año de vida (6-12 meses) son posibles, en parte, por cambios tempranos en la CPF dorsolateral (ej: Fox & Bell, 1990; Diamond, 1991). Un cambio madurativo importante de esta región, es el incremento del neurotransmisor dopamina, el cual parece facilitar estos avances cognitivos tempranos (Diamond, 2002).

### **2.1.6 Funciones de la corteza prefrontal dorsolateral**

La CPF dorsolateral medial (área de Brodmann 9/46) ha sido implicada en muchas funciones cognitivas, incluyendo información espacial “en línea”, monitoreo y manipulación dentro de la memoria de trabajo, selección de respuestas, implementación de estrategias para facilitar la memoria, organización de material antes de la codificación y la verificación y evaluación de representaciones que han sido recuperadas de la memoria a largo plazo (Ramnani & Owen, 2004).

Así mismo, muchas de las capacidades de razonamiento consideradas como características únicamente de seres humanos, tales como la planificación a largo plazo, el razonamiento hipotético y la reorganización de conceptos complejos, requieren de la memoria de trabajo, la cual no es un proceso unitario y es probablemente una función esencial de muchas regiones no frontales del cerebro. Sin embargo, la CPF dorsolateral parece ser importante para la memoria de trabajo y tareas que implican un puente temporal

de elementos separados y la comparación o manipulación de varios segmentos de información (Fuster, 1995; Goldman- Rakic, 1984).

En humanos, las lesiones en la porción dorsolateral de la CPF, que incluye parte del área 10, están asociadas con el deterioro de altas habilidades cognitivas que facilitan la extracción de significados de experiencias prolongadas, la organización de contenidos mentales que controlan el pensamiento creativo y el lenguaje, la expresión artística y la planeación de acciones futuras (Damasio, 1985).

Además, los daños a la CPF dorsolateral pueden dar lugar a una multitud de deficiencias neuropsicológicas, incluyendo aspectos diversos de la cognición, tales como atención, lenguaje y funciones ejecutivas. Tales daños no causan amnesia dentro del sentido convencional, pero pueden interrumpir aspectos del aprendizaje y de la memoria en varias etapas de estos procesos y de la asignación básica de la atención a habilidades en la metamemoria. Los pacientes con lesiones en la CPF dorsolateral muestran creciente vulnerabilidad para distraerse ante estímulos de diversas modalidades, así como evidencia electrofisiológica de desinhibición en regiones sensoriales (Anderson & Tranel, 2002).

Por otro lado, los daños a la porción posterior de la corteza izquierda de la CPF dorsolateral pueden dar lugar a una variedad de defectos del discurso y del lenguaje (Anderson & Tranel, 2002). Además, la corteza prefrontal dorsolateral izquierda y las áreas premotoras se activan durante la recuperación léxica, con las demandas de la búsqueda mental y diversas categorías léxicas que contribuyen a la activación de varias subregiones (Grabowski, Damasio & Damasio, 1998). Los daños a ésta área no sólo afectan la expresión del lenguaje, sino también la comprensión y la lectura auditiva (Alexander et al., 1989). Además, los daños a la corteza prefrontal dorsolateral derecha pueden dar lugar a restricciones del discurso prosódico (Anderson & Tranel, 2002).

Por otro lado, Holmes (1938) afirmó que un papel importante de los lóbulos frontales era la supresión del comportamiento ocular reflexivo, y recientemente, el daño a la corteza inferior de la corteza prefrontal dorsolateral se ha asociado con deterioro en la realización de tareas correspondientes al paradigma antisacadas (el cual se refiere a los movimientos oculares necesarios y automáticos ante ciertos estímulos visuales y cognitivos, y que requieren la inhibición de vistazos reflexivos a estímulos periféricos) (Walker, Husain, Hodgson, Harrison & Kennard, 1998). Este tipo de tareas requieren la

actividad coordinada tanto anatómica como funcional de la CPF dorsolateral y las corteza parietal posterior, por lo que, se ha comprobado que éstas dos áreas cerebrales se interconectan y funcionan de manera coordinada en el funcionamiento de muchas tareas visoespaciales y visomotoras (Quintana & Fuster, 1999).

De forma general, las áreas que maduran tardíamente, en la convexidad prefrontal lateral, están involucradas principalmente en altas funciones ejecutivas. La función ejecutiva más general de la CPF lateral es la organización temporal de acciones dirigidas a metas en los dominios de la conducta, cognición y lenguaje; estos tres dominios constituyen la función global sustentada por una función fundamental de la CPF lateral en la integración temporal, esto es, la integración de percepciones discontinuas temporalmente y de entradas neurales dentro de estructuras coherentes de acción. La integración temporal se sirve de al menos 3 funciones cognitivas de topografía prefrontal diferente: memoria de trabajo (mantenimiento transitorio de representaciones en estado activado o accesible mientras que está ocurriendo el razonamiento), preparación de acciones o planeación (identificación y organización de los pasos y elementos necesarios para llevar a cabo una intención o lograr una meta) y control inhibitorio (habilidad para ignorar respuestas o estímulos automáticos o preponderantes irrelevantes para la tarea actual). Estas funciones comprometen a la CPF en una cooperación interactiva con otras regiones neocorticales. El uso del lenguaje sintetiza el desarrollo de las funciones cognitivas temporales integrativas en su substrato neural fundamental: notablemente la CPF lateral y otras regiones corticales desarrolladas tardíamente (Fuster, 2002). La integración temporal utiliza al menos 3 funciones cognitivas de topografía prefrontal diferente: memoria de trabajo, preparación de acciones, y control inhibitorio. Estas funciones comprometen a la corteza prefrontal en una cooperación interactiva con otras regiones neocorticales.



### 2.1.7 Funciones ejecutivas

Luria (1966) esboza el término de Funciones Ejecutivas (FE), en su libro *Las Funciones Corticales Superiores del Hombre*, considerando que la corteza prefrontal es crítica para la formulación de metas, planeación, y la secuencia y verificación de la conducta; pero Lezak (1982) es quien populariza el término, considerando que las FE incluyen esas capacidades mentales necesarias para la *formulación de metas*, la *planeación de cómo lograrlas* y *llevar a cabo los planes efectivamente*. Además, esta investigadora considera una distinción determinante entre las FE y las funciones cognitivas, argumentando lo siguiente:

Las funciones cognitivas conciernen a cómo y qué tanto conocimiento, habilidades, y equipamiento intelectual puede poseer una persona. Mientras que las FE incluyen esas capacidades mentales necesarias para la formulación de metas, la planeación de cómo lograrlas y llevar a cabo los planes efectivamente. Estas están en el núcleo de todo lo socialmente útil, personalmente mejorado, constructivo y actividades creativas. Con funciones ejecutivas intactas, una persona puede experimentar muchos tipos y combinaciones diferentes de funciones motoras, sensoriales y cognitivas, además de mantener la dirección de su propia vida y ser productiva. Deficiencia o pérdida de estas funciones comprometen la capacidad de una persona para mantener una vida independiente, constructivamente auto servible y socialmente productiva. De acuerdo a lo anterior, las FE son cruciales para la conducta humana normal.

Por otro lado, el primer intento sistemático para caracterizar las operaciones cognitivas de los lóbulos frontales y su arquitectura, viene del trabajo de Shallice (1982). Asimismo, Norman y Shallice (1986) propusieron un modelo que está basado en la dicotomía rutina/no rutina y asume que la regulación cognitiva depende de dos diferentes sistemas: “Programación de argumentos” (contention scheduling), los cuales operan en las situaciones rutina y el “Sistema Supervisor”, el cual controla las operaciones no rutina, por ejemplo: operaciones nuevas, conflictivas y complejas (Shallice, 1982). De acuerdo a este modelo, el Sistema Supervisor depende de los lóbulos frontales y es responsable de las operaciones relacionadas al control de procesos (Shallice, 1994). Más recientemente, Baddeley (1986 y 1996) ha sugerido que el componente ejecutivo central de la memoria de trabajo provee un adecuado marco para el análisis de las Funciones Ejecutivas (FE). La

memoria de trabajo es definida como un sistema para el mantenimiento temporal y manipulación de la información. El modelo compromete el ejecutivo central, un sistema de control atencional que coordina dos sistemas enlazados: el componente fonológico y el componente visoespacial. La coordinación entre dos tareas simultáneas, se asume que depende del ejecutivo central, al cual ha sido relacionado el papel que asumen las FE (Baddeley, Della, Papagno & Spinnler, 1997; Godefroy, Cabaret, Petit-Chenal, Pruvo & Rousseaux, 1999).

Algunas investigaciones realizadas por Godefroy et al. (1999), sugieren que las FE dependen de múltiples procesos que pueden ser separables unos de otros, los cuales son controlados principalmente, pero no exclusivamente, por la parte anterior del cerebro, y que sus operaciones pueden ser especificadas en términos cognitivos, tales como: creación y selección de asociaciones estímulo-respuesta, o preparación de la respuesta.

Por otro lado, Miyake et al. (2000) opinan que al menos en los estados tempranos del desarrollo teórico, tanto el ejecutivo Central como el Sistema Atencional Supervisor (SAS), tenía un emboque unitario sin incluir distinción entre subfunciones o subcomponentes. Además, algunas concepciones recientes de FE sugieren que existen algunas bases comunes o un mecanismo unitario que puede caracterizar la naturaleza de deficiencias en los pacientes frontales o las funciones de los lóbulos frontales (e.g. Duncan, Emslie, Williams, Johnson & Freer, 1996; Duncan, Johnson, Swales & Freer, 1997; Engle, Kane & Tuholski, 1999; Kimberg & Farah, 1993).

En contraste, existe también evidencia de la naturaleza no unitaria de la función de los lóbulos frontales o FE (Baddeley, 1996). Una línea de evidencia viene de observaciones clínicas, que indican algunas disociaciones de la ejecución de tareas ejecutivas. Por ejemplo, algunos pacientes fallan en el WCST, pero no en la TOH, mientras otros pueden mostrar el patrón opuesto, sugiriendo que las FE no deben ser completamente unitarias (e.g. Godefroy et al., 1999; Shallice, 1988). Otra línea de evidencia de naturaleza no unitaria de las FE viene de estudios de diferencias individuales, cuyos resultados son usados comúnmente para argumentar que las funciones de los lóbulos frontales o del ejecutivo central o SAS, no son unitarias y de aquí la necesidad de ser fraccionadas.

Por lo anterior, Miyake et al. (2000) realizaron un estudio de diferencias individuales examinando la posibilidad de separar tres funciones ejecutivas comúnmente

postuladas: cambio de organización mental (“shifting”), actualización de la información (“updating”), e inhibición de la respuesta preponderante (“inhibition”) y sus tres roles en tareas complejas de los “lóbulos frontales” o “ejecutivas”. Se eligieron estas tres tareas por las siguientes razones: primero, porque parecen estar relativamente circunscritas a funciones de nivel más bajo (en comparación con algunas otras comúnmente postuladas como FE como “planeación”), de aquí que pueden ser operacionalmente definidas en una forma bastante precisa. Segundo, para estas tres FE, estuvo disponible un número de tareas cognitivas relativamente simples, bien estudiadas, que se creyó, intervendrían de forma primaria en cada función objetivo. Tercero, y quizá, más importante, las tres funciones objetivo son probables a ser implicadas en la ejecución de pruebas ejecutivas convencionales más complejas. La muestra del presente estudio consistió de 137 estudiantes universitarios que ejecutaron un conjunto de tareas experimentales relativamente simples que se considera intervienen predominantemente en cada función ejecutiva objetivo, así como un grupo de tareas ejecutivas usadas frecuentemente: Test de Clasificación de Tarjetas de Wisconsin (WCST) y Torres de Hanoi (TOH), generación de números al azar (RNG), etc. El factor de análisis confirmatorio indicó que las tres funciones ejecutivas blanco están correlacionadas moderadamente unas con otras, pero son claramente separables. Además, la ecuación estructural modelada sugirió que las tres funciones contribuyen diferencialmente para realizar tareas ejecutivas complejas. Estos resultados sugieren que es importante reconocer tanto la unidad como la diversidad de las FE y que el análisis de variable latente es una aproximación útil para estudiar la organización y roles de las FE.

Otra aportación importante relacionada a las FE es realizada por Anderson (2002), el cual basándose en estudios analíticos y conocimientos neuropsicológicos actuales, propone un modelo de FE (ver Figura 5). De acuerdo con el punto de vista de Alexander & Stuss (2000), este modelo conceptualiza a las funciones ejecutivas como cuatro dominios distintos: a) control atencional, b) procesamiento de información, c) flexibilidad cognitiva, y d) ubicación de metas (goal setting, en inglés). Estos dominios ejecutivos están relacionados a sistemas frontales específicos. Sin embargo, todas operan de forma integrada para ejecutar ciertas tareas y se conceptualizan como un sistema de control total.

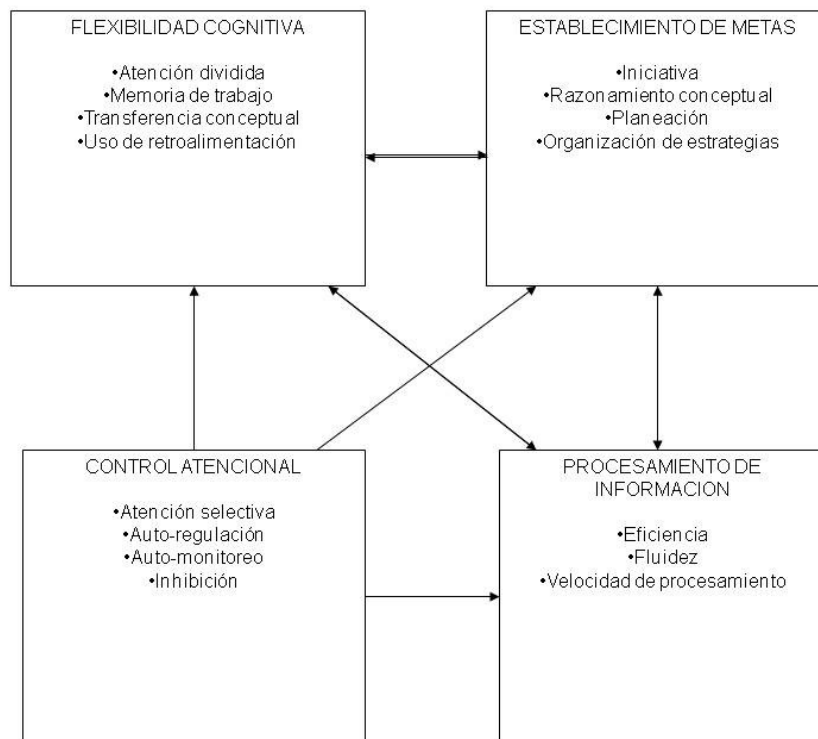
Cada dominio incluye una alta integración de procesos cognitivos y cada uno recibe y procesa estímulos de varias fuentes:

a) El *control atencional* incluye la capacidad de seleccionar un estímulo específico e inhibir otros y la habilidad para enfocar la atención en un tiempo prolongado. También incluye la regulación y monitoreo de las acciones para que sean ejecutadas en el orden correcto, identificación de errores y logro de metas.

b) El *procesamiento de información* se refiere a la fluidez, eficacia y rapidez de producción. El dominio de este procesamiento refleja la integridad de conexiones neuronales y la integración funcional de sistemas frontales.

c) La *flexibilidad cognitiva* se refiere a la habilidad para cambiar entre varias respuestas, aprender de errores, idear estrategias, dividir la atención y procesar múltiples fuentes de información al mismo tiempo. En este modelo, la memoria de trabajo es un elemento del dominio de la flexibilidad cognitiva.

d) *Establecimiento de metas (goal setting)* incorpora la habilidad de desarrollar nuevas iniciativas y conceptos, como la capacidad de planear acciones con antelación y tareas de aproximación de forma eficiente y estratégica.



**Figura 5.** Modelo de funciones ejecutivas propuesto por Anderson (2002).

Por otro lado, la teoría de la evolución de la arquitectura cortical indica dos principales disociaciones mayores anatómico-funcionales dentro de los lóbulos frontales (Pandya & Yeterian, 1996; Sanides, 1970; Stuss & Levine, 2002): una *corteza prefrontal lateral* (CPFL), involucrando una dirección hipocampal, archicortical, implicado en procesos de razonamiento conceptual y espacial (ejecutiva cognitiva); y una *corteza prefrontal ventral (medial)* (VPFC) en dirección paleocortical, emergiendo de la corteza orbitofrontal caudal (olfatoria), e íntimamente conectada con el núcleo límbico involucrado en procesamiento emocional (autorregulatoria conductual-emocional) (Nauta, 1971; Pandya & Barnes, 1987), incluyendo la adquisición y asociación de estímulos-recompensa de inversión (Fuster, 1997). Además, se consideran dos disociaciones adicionales dentro de la región prefrontal: una (regulación de la energización) basada en la evidencia de 5 redes mayores frontales-subcorticales (Alexander et al., 1986) y la región frontal medial más superior; y la otra (metacognitiva), sugerida por investigaciones recientes en la funciones integrativas de alto orden: teoría de la mente y autoconciencia, apreciación del humor y memoria episódica (autoconocimiento) (Stuss & Alexander, 1999), está relacionada a la región fronto-polar (posiblemente de forma más particular en el hemisferio derecho).

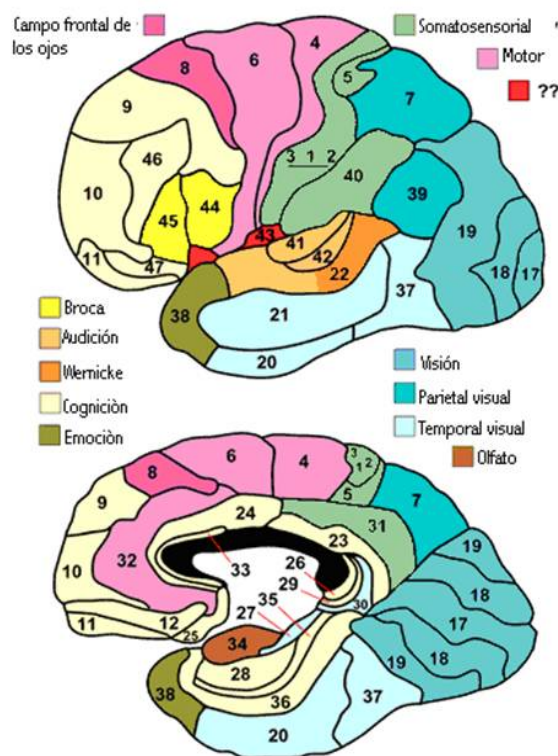
Por su parte, Stuss & Alexander (2000) consideran que la relación entre las funciones “ejecutivas” o “supervisoras” y las funciones de los lóbulos frontales todavía no está clara. La distinción entre tareas simples y complejas no puede explicar las diferencias funcionales entre los lóbulos frontales y otras regiones cerebrales. El daño en una tarea o proceso específico no debe ser relacionado a una sola región cerebral, sino a los sistemas neurales subyacentes a la tarea que es realizada. Sin embargo, la asociación constante entre funciones ejecutivas y frontales sugiere algún tipo de relación: no hay un homúnculo frontal - no hay funciones ejecutivas unitarias. Por lo que se ha considerado que el papel más importante de los lóbulos frontales debe ser la sensibilidad afectiva, el desarrollo de la personalidad social y la autoconciencia e inconciencia (Stuss & Alexander, 2000).

De acuerdo a lo anterior, Stuss (2007) considera que las FE son un constructo psicológico, no necesariamente con relación a una estructura anatómica. Por lo tanto, la evaluación de la función ejecutiva puede estar deteriorada después de un daño cerebral difuso (ejemplo: lesión cerebral traumática), funcionamiento integrativo ineficiente (tal como ocurre en estados confusionales) y después del daño a diferentes regiones cerebrales

no frontales. Es posible también que la disfunción ejecutiva después de un daño en regiones cerebrales no frontales se deba a algún deterioro en la conectividad de redes. Por consiguiente, deficiencias en una prueba de “función ejecutiva” no puede ser automáticamente interpretada como daño en los lóbulos frontales. Sin embargo es aceptado que las funciones ejecutivas deben estar mejor localizadas en los lóbulos frontales y en “sistemas frontales” (esas áreas con conexiones directas a los lóbulos frontales).

## 2.2 Corteza parietal

El lóbulo parietal se sitúa en la parte superior de los lóbulos temporal y occipital, situándose en la mitad posterior y superior de cada hemisferio. Este lóbulo recibe información sensorial de todas las partes del cuerpo: de los receptores sensoriales de la piel, los músculos, y las articulaciones. Los mensajes de estos receptores sensoriales se registran en las llamadas áreas de proyección sensorial. El lóbulo parietal contribuye a las habilidades espaciales, como la habilidad para leer un mapa ó para indicar a alguien como llegar a algún lugar. Interviene en la percepción espacial y en la memoria para la planeación de ejecución de secuencias motoras. Desde el punto de vista evolutivo la parte anterior y posterior de los lóbulos parietales difieren una de la otra (Hyvärinen, 1982) (ver Figura 6).



**Figura 6.** Mapa citoarquitectónico de las áreas de Brodmann donde se diferencian la división anterior y posterior de la corteza parietal.

El lóbulo parietal anterior consiste en las áreas 3,1 y 2 de Brodmann. El lóbulo parietal anterior es conocido también como corteza somatosensorial primaria (SI). La segunda corteza somatosensorial (SII) es el operculum parietal (área 5 de Brodmann). Además está establecido que la parte anterior del lóbulo parietal (giro postcentral), está involucrada en la orientación de movimientos somestésicos y somáticos. La corteza primaria somatosensorial (SI) recibe entradas principalmente del complejo talámico ventrobasal (Hyvärinen, 1982).

Brodmann en 1907 subdividió la parte superior posterior del lóbulo parietal en las áreas 5 y 7 y la parte inferior posterior del lóbulo parietal en las áreas 39 y 40. El lóbulo parietal posterior es también llamado “corteza de asociación”. Las conexiones neurales de ésta área son complejas. No hay entradas específicas a las áreas 5 y 7, éstas reciben una multitud de conexiones de varias regiones corticales y subcorticales. De la misma forma, sus proyecciones eferentes se dirigen a numerosas regiones cerebrales. La abundancia de conexiones neuronales directas del lóbulo parietal posterior sugiere que su funcionalidad es igual de compleja (Hyvärinen, 1982).

Las áreas parietales posteriores tienen sus principales conexiones (la mayor parte de ellas recíprocas) con regiones corticales sensoriales (somatosensorial y visual), con una gran parte del lóbulo frontal, el sulcus temporal superior, el cíngulo, las áreas homólogas del hemisferio opuesto, los ganglios basales, la parte pulvinar del tálamo, el núcleo pulvinar lateral y ventrolateral, los colículos superiores y con el núcleo pontino (Hyvärinen, 1982).

### **2.2.1 Funciones de la corteza parietal**

El término somestesia o somatoestesia significa capacidad sensorial para identificar las sensaciones corporales. El procesamiento somestésico se localiza en la zona anterior del lóbulo parietal y está integrado por áreas primarias y asociativas. Las áreas primarias se localizan en el giro postcentral y son el lugar de recepción de los estímulos procedentes de los núcleos ventrales del tálamo que transmiten información somatosensorial referente a las sensaciones de dolor, vibración, temperatura, tacto, presión, posición y movimiento procedentes de los receptores sensoriales situados en la piel, las articulaciones, los músculos y las vísceras. Las áreas somestésicas de asociación están situadas en la zona



posterior del lóbulo parietal, en la convergencia con los lóbulos occipitales y temporales y son responsables de integrar los estímulos sensoriales somáticos, permitiendo dotarlos de significado así como tomar conciencia de la posición de nuestro cuerpo, de los objetos que nos rodean y su situación espacial. Si le pedimos a un sujeto que palpe un objeto sin verlo y posteriormente le pedimos que lo seleccione visualmente entre varios objetos presentados, la persona debe integrar la información visual y táctil para llegar a una única percepción del objeto. Esta función integradora de la corteza asociativa es una forma superior de análisis perceptivo relacionado con procesos cognitivos más sofisticados como pensamiento y razonamiento (Portellano, 2005).

Existe asimetría funcional entre ambos lóbulos parietales, ya que la región asociativa parietotemporal izquierda está más especializada en el procesamiento de la información simbólica-analítica que se relaciona con el lenguaje y la aritmética, mientras que la zona homóloga del lóbulo parietal derecho tiene una representación espacial integrada, especialmente visual y auditiva (Portellano, 2005). Los sectores posteriores de la sección parietal inferior (área 39 de Brodmann), constituyen una de las regiones corticales más antiguas del cerebro y unifican los aparatos centrales de los analizadores cinestésico vestibular y visual y la lesión de esta área conduce a una perturbación de las formas más complejas de las síntesis óptico-espaciales, a la pérdida de la orientación en el espacio y a la apraxia espacial (Luria, 1966).

Una peculiaridad esencial de la percepción de las relaciones espaciales en el hombre, consiste en que dicha percepción siempre parece asimétrica, manifestando claramente una lateralización. Percibimos el espacio en coordenadas geométricas fundamentales, las cuales no son equivalentes. Las representaciones “derecho” e “izquierdo” reciben posteriormente también su significado verbal. El individuo comienza a apoyarse en un sistema complejo de señales que le permite orientarse en el espacio. Dicha orientación se puede alterar por diferentes factores, pero las formas más evidentes de alteración de la orientación espacial surgen en los casos en que se lesionan las zonas de la corteza cerebral que aseguran el trabajo conjunto de todos los analizadores (sistema vestibular, sensación muscular, vista): en los sectores occipitoparietales (Luria, 1966).

Por otro lado, los enfermos con lesiones en las regiones parietooccipitales manifiestan serias perturbaciones en las formas complejas del habla. Por ejemplo, estas

personas tienen dificultades cuando se les presentan construcciones lógico-gramaticales complejas, para cuya comprensión, según Head, deben “coordinar los detalles y formar con ellos un todo único”, o “combinar mentalmente los detalles en una fórmula” (Head, 1926). De manera especial, las dificultades se presentan en las estructuras lógico-gramaticales de relación espacial (preposiciones “sobre” y “abajo”, etc.; y adverbios como “a la derecha de...” “a la izquierda de...” (Luria, 1966).

El cálculo es otra función que es perturbada después de una lesión en las regiones parietooccipitales, el cual está estrechamente relacionado con las operaciones y las representaciones espaciales. Esta perturbación puede aparecer también por diversas lesiones focales en el cerebro o por disminución de la actividad cerebral. Sin embargo, en las regiones parietooccipitales el síndrome de “acalculia” tiene un carácter preciso, lo cual se manifiesta especialmente en *la desintegración de la estructura jerárquica de los números*. Estas personas no pueden anotar ni leer cantidades complejas, además se manifiesta una incapacidad para realizar las operaciones relacionadas con el reconocimiento de los signos matemáticos. Sin embargo no presentan defectos de la atención ni perturbaciones de la función reguladora de la instrucción verbal, características en los lesionados frontales. Las principales dificultades de las personas lesionadas en las regiones parietooccipitales se manifiestan en la imposibilidad para efectuar las operaciones necesarias para resolver el problema propuesto, cuando estas operaciones requieren la identificación de símbolos visuales y su organización espacial. Estas personas tienen una idea clara del plan general para la solución de un problema, pero su principal problema es cuando pasan a las operaciones aritméticas concretas (Luria, 1966).

### **2.2.2 Conexiones del área 7**

Las principales conexiones aferentes del área 7 derivan de la parte ipsilateral de SI, SII, área 5, el área visual V2 y V4, la corteza frontal. También hay proyecciones de núcleos talámicos y del tallo cerebral.

Las principales conexiones eferentes corticales del área 7 se extienden ipsilateralmente al lóbulo frontal, al cíngulo, al giro pre y postcentral, área 5, el giro temporal, el sulcus temporal superior (STS), área 19 el área fusiforme y el giro

parahipocampal (Peele, 1942; Pandya & Kuypers, 1969; Petras, 1971; Chavis & Pandya, 1976). Las conexiones contralaterales se extienden a áreas 1, 2, 5 y 7 (Peele, 1942). Subcorticalmente, el área 7 proyecta a los ganglios basales, al tálamo y al tallo cerebral (Hyvärinen, 1982).

### **2.2.3 Funciones del área 7**

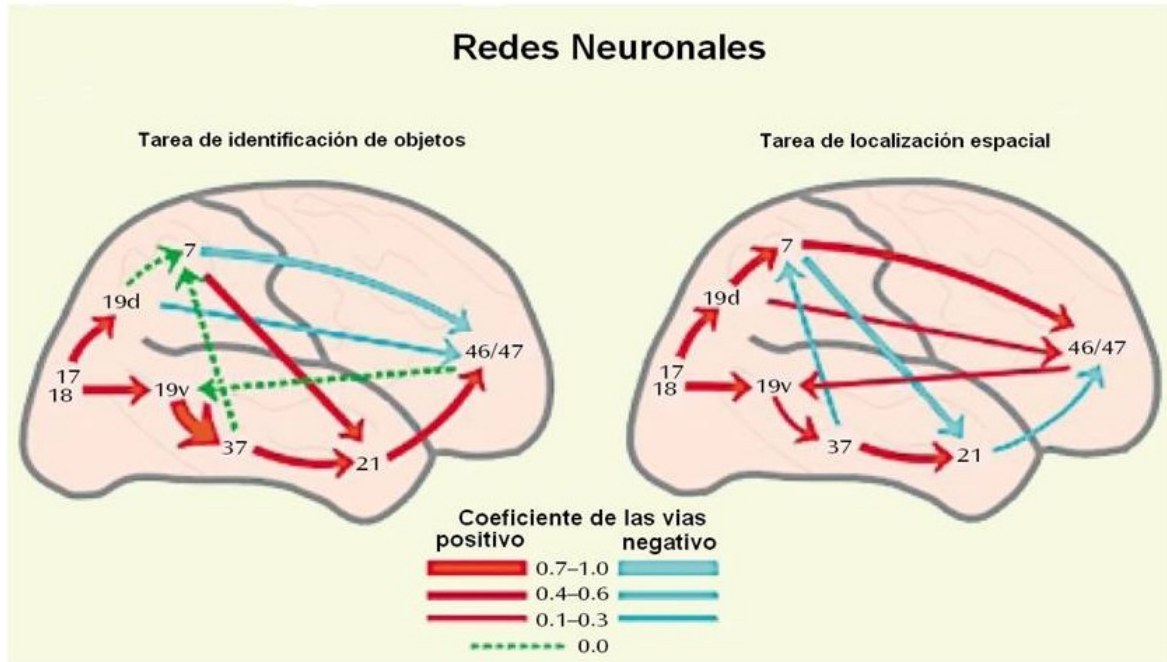
Se dice que, de forma general, el área 7 tiene funciones relacionadas con la visión. La abundancia de conexiones a las áreas prefrontales y al cíngulo, sugieren un rol en aspectos emocionales y atencionales de la conducta. Las conexiones con la corteza motora y premotora y los ganglios basales sugieren una participación en la programación motora. Las conexiones a la zona trimodal de proyección con el surco temporal superior podrían indicar que participa en altos niveles de integración de funciones sensoriales (Hyvärinen, 1982).

### **2.3 Relación entre la corteza prefrontal y la corteza parietal**

La corteza prefrontal dorsolateral y la corteza parietal posterior están anatómicamente y funcionalmente interconectadas y han sido implicadas en la memoria de trabajo y en la preparación para la realización de acciones (Quintana & Fuster, 1999).

De acuerdo a lo anterior, Medoff y McIntosh (2000) realizaron un análisis de mapeo estructural a través de Tomografía por Emisión de Positrones midiendo el flujo sanguíneo regional en dos tareas, una tarea que consistió en identificar objetos y otra de localización espacial. Se seleccionaron las regiones cerebrales para análisis en base a los cambios en la actividad dependientes de la tarea, correlaciones interregionales y vías neuroanatómicas conocidas. Los resultados demostraron que en la tarea de identificación de objetos, fueron dominantes las interacciones que incluyeron las siguientes áreas (de Brodmann): del área 19 (corteza de asociación visual) al área 37 (corteza temporal inferior), extendiéndose al área 46 (corteza frontal). Mientras que en la tarea de localización espacial, las interacciones a lo largo de la vía dorsal del área 19 a través del área 7 (corteza parietal superior) y el área 46 se incrementaron en relación a la tarea de identificación de objetos. Este estudio concluyó que las influencias de correlación inhibitorias (negativas) en la corteza frontal

durante la tarea de identificación de objetos corresponde a la vía dorsal, mientras que durante la tarea de localización espacial corresponde a la vía ventral (identificación de objetos versus localización espacial). La unión funcional de las regiones cerebrales que forman las vías de la corteza de asociación visual a la corteza frontal se presenta cuando se provee un procesamiento especializado de señales que facilitan la ejecución de tareas específicas (ver Figura 7).



**Figura 7.** Conexiones directas e indirectas de las áreas asociativas sensoriales a las áreas prefrontales 46 y 47 (tomado de Medoff & McIntosh, 2000).

Los procesos abstractos y cognoscitivos de control nos permiten ajustar nuestro comportamiento a las demandas ambientales. Aunque algunos estudios neuropsicológicos sugieren que la región cortical crítica para el control cognoscitivo es la corteza prefrontal, algunos estudios con neuroimagen funcional han enfatizado la interacción de las cortezas prefrontal y parietal. Esto propone que existen diversas contribuciones de áreas prefrontales y parietales en el control cognoscitivo. Se ha asumido que la corteza prefrontal predispone el proceso en regiones posteriores del cerebro. Lo anterior conduce a la hipótesis de que la actividad de las neuronas en la corteza prefrontal debe preceder a la actividad parietal en el control cognoscitivo. De acuerdo a lo anterior, en un estudio realizado por Brass et al. (2005), se probó esta aseveración combinando estudios de resonancia magnética funcional

(fMRI) (de alta resolución espacial) con potenciales relacionados a eventos (ERPs) (de alta resolución temporal). En este paradigma, se indicó la misma tarea a través de dos señales diversas y después se comparó con una situación en donde dos señales indicaron diversas tareas. Solamente la última condición requirió la actualización (o renovación de indicación) del sistema de la tarea. La actualización de la tarea estuvo asociada a una desviación negativa de la línea media del ERP que se elevó alrededor de los 470 milisegundos. Después realizaron otro registro con resonancia magnética funcional (fMRI) similar al anterior enfocado en las regiones activadas (parte izquierda de la corteza frontal inferior, parte del cerebro frontal inferior derecho y corteza parietal derecha) englobando sus direcciones y magnitudes al efecto del ERP. Los dipolos frontales contribuyeron más al efecto de ERP anterior que el dipolo parietal, llegando a la conclusión de que la corteza prefrontal está implicada en la actualización de las representaciones generales de la tarea y de las asociaciones relevantes de las tareas estímulo-respuesta en la corteza parietal (Brass, Ullsperger, Knoesche, Von Cramon & Phillips, 2005).

Algunos estudios de lesiones y de imagenología cerebral han encontrado que las cortezas prefrontal y parietal están implicadas en el proceso aritmético, sin excluir la posibilidad de que estas áreas también están implicadas en operaciones no aritméticas (Menon, Rivera, White, Glover & Reiss, 1999).

En otro estudio realizado con esquizofrénicos y sujetos sanos, se observó activación prefrontal dorsolateral alrededor del surco frontal superior en los sujetos sanos, y una activación prefrontal ventrolateral debajo del surco frontal inferior derecho en los pacientes esquizofrénicos. La activación en la corteza prefrontal lateral derecha estuvo correlacionada con la activación en la región parietal inferior bilateral en los sujetos sanos pero no estuvo correlacionada con ninguna otra activación en los pacientes esquizofrénicos (Jae-Jin Kim et al., 2003).

Por otro lado, en un estudio realizado por Barash (2003), se utilizó un sistema de movimientos sacádicos visuales en monos, el cual consistió en lo siguiente: basándose en la aseveración de que el procesamiento cortical del movimiento sacádico de los ojos necesita dos funciones principales: una función visual (corteza parietal) y una función motora (corteza prefrontal), la tarea consistió en presentarles una serie de estímulos visuales en movimiento, en donde se observaron movimientos sacádicos de los ojos. Los resultados

revelaron dos sistemas de datos paradójicos: en la corteza parietal la actividad tiene sincronización visual pero dirección motora; en corteza prefrontal la actividad tiene sincronización motora pero dirección visual. El análisis de los datos de la corteza prefrontal y de la corteza parietal, permiten realizar las siguientes aseveraciones: parece que existe un lazo parietal-prefrontal-parietal con un giro rápido y que una señal prefrontal, posiblemente circunstancial al contexto, hace transformaciones sensorimotoras en la corteza parietal.

Por otro lado, muchas decisiones se toman con información limitada sobre sus consecuencias potenciales, es decir, bajo un estado de incertidumbre. Algunos estudios de neuroimagen realizados sobre la toma de decisiones, han implicado regiones del lóbulo frontal en los procesos relacionados con la resolución de la incertidumbre. Sin embargo, un sistema diverso de regiones en las cortezas parietales, prefrontales y posteriores dorsales ha demostrado que son críticas para la selección de acciones a estímulos inesperados dentro de una secuencia. En un estudio realizado por Huettel, Song & McCarth (2005), se indujo incertidumbre en toma de decisiones usando una tarea novedosa que requirió basar las decisiones, sobre un tema, en una secuencia binaria de ocho estímulos de modo que la incertidumbre cambiara dinámicamente en un cierto plazo, correspondientes a los estímulos que fueron presentados. La activación de las cortezas prefrontal (dorsolateral), parietal (posterior) e insular, aumentó con el incremento de incertidumbre. En cambio, dentro de regiones frontales intermedias, así como motoras y las cortezas visuales, la activación no aumentó con el incremento de incertidumbre. Se concluyó que la respuesta del cerebro a la incertidumbre depende de las demandas de la tarea experimental. Cuando la incertidumbre depende de asociaciones entre los estímulos y las respuestas, esta modula la activación en los lóbulos frontales intermedios. Sin embargo, cuando la incertidumbre se desarrolla en escalas a corto plazo de forma excesiva mientras que la información se acumula hacia una decisión determinada, las contribuciones parietales, prefrontales y posteriores dorsales son críticas para su resolución (Huettel et al., 2005).

En otro estudio, realizado por Diwadkar, Carpenter & Just (1999), utilizaron resonancia magnética funcional para determinar cómo los componentes corticales que favorecen la red dinámica de la memoria de trabajo espacial responden a dos tipos de aumentos en la complejidad de la tarea. Los participantes mantuvieron mentalmente la localización más reciente de uno o tres objetos mientras los tres objetos se movían

discretamente dentro de dos o tres dimensiones. Hubo un aumento en la activación cortical prefrontal dorsolateral (DLPFC), y la activación de la corteza parietal aumentó en función del número de las localizaciones del objeto que se mantenía y de la dimensionalidad de la exhibición. En el análisis de imagenología cerebral se mostró activación solamente cuando se impuso alto nivel de la demanda. Una proporción más pequeña fue activada específicamente en respuesta a los aumentos en la demanda de la tarea asociada a cada uno de las variables independientes. Un segundo experimento reveló el mismo efecto de la dimensionalidad en la corteza parietal cuando el movimiento de objetos fue señalado auditivamente más que visualmente, indicando demandas adicionales de representación inducidas cerca del espacio tridimensional, el cual es independiente de la modalidad de la entrada. La modulación de la activación, en las áreas prefrontal y parietal, por la cantidad de demanda sugiere que la colaboración entre estas áreas es básica para la memoria de trabajo espacial.

## **2.4 Desarrollo de la corteza prefrontal del nacimiento a la adultez temprana**

La transición de la infancia a la adultez está caracterizada por cambios dramáticos en la identidad, autoconciencia y flexibilidad cognitiva (Rutter & Rutter, 1993). Las investigaciones empíricas en el desarrollo cognitivo y neuronal durante la pubertad y la adolescencia aún están en su etapa inicial. Algunos experimentos han demostrado un desarrollo anatómico del cerebro a través de técnicas de imagenología cerebral.

Filogenéticamente, algunas de las regiones corticales más antiguas están en la superficie cerebral inferior en el aspecto medial del lóbulo temporal (la parte posterior de la corteza piriforme y la corteza entorrinal por ejemplo) o en la parte inferior y medial del lóbulo frontal cerca del surco olfatorio (corteza piriforme anterior y la perialocorteza orbital). El proceso de maduración de estas áreas parece comenzar ontogenéticamente más temprano, aproximadamente a los 4 años de edad. Desde estas áreas, la maduración progresa de forma lenta lateralmente. En la corteza frontal inferior, las partes mediales y posteriores de la corteza olfatoria maduran temprano, mientras la corteza orbitofrontal madura más tarde. En el resto del lóbulo temporal inferior, la maduración parece más tardía y en una dirección lateral-medial (Gogtay et al., 2004).

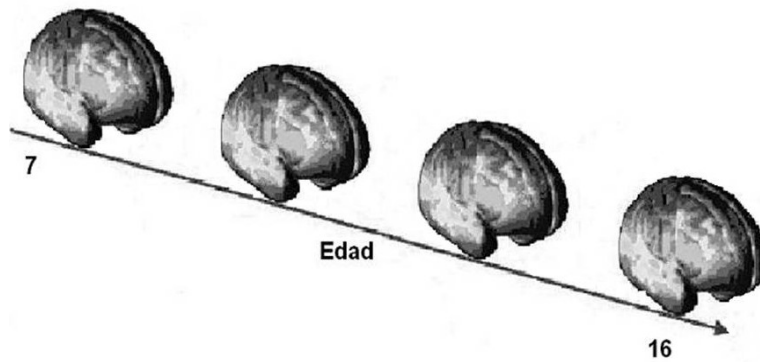
Por otro lado, la noción de que el cerebro continúa desarrollándose después de la adolescencia es relativamente nueva. En las décadas de 1960 y 1970, algunas investigaciones *post-mortem* en humanos revelaron que algunas áreas cerebrales, en particular la corteza prefrontal, continúa desarrollándose más allá de la infancia temprana. La corteza prefrontal es la región cortical con uno de los más largos periodos de desarrollo de las regiones del cerebro, tomando más de dos décadas para alcanzar su completa madurez en humanos (Diamond, 2002). Otros estudios llevados a cabo en los 70s y 80s demostraron que la corteza prefrontal tiene cambios significativos durante la pubertad y la adolescencia (Huttenlocher, 1979; Huttenlocher, de Courten, Garey & Van der Loos, 1982). Además se encontraron cambios importantes en el cerebro antes y después de la pubertad, por ejemplo el hecho de que los axones de la corteza prefrontal continúan mielinizándose hasta la adolescencia (Yakovlev & Lecours, 1967). Esto significa que la velocidad de la transmisión neuronal en la corteza prefrontal podría incrementarse a través de la infancia y la adolescencia aunado a cambios en la densidad sináptica de la corteza prefrontal



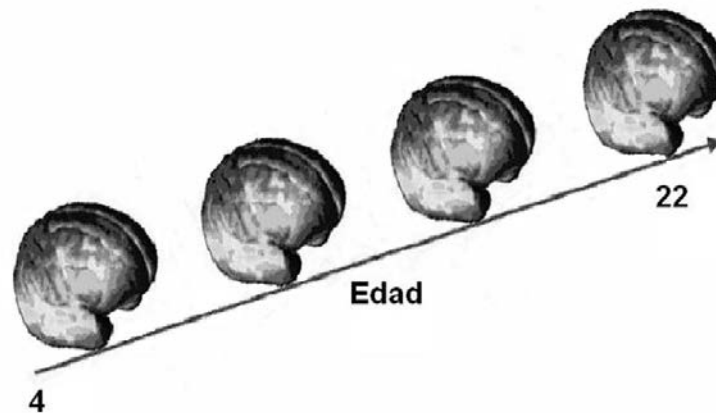
(Blakemore, Sarah-Jayne & Choudhury, 2006). Durante el primer año de vida, ocurren cambios significativos de maduración en la corteza prefrontal (CPF) que ayudan a consolidar importantes avances cognitivos en el transcurso del primer año de edad (Diamond, 2002).

#### **2.4.1 Estudios realizados sobre madurez cerebral en niños, adolescentes y adultos**

Giedd et al. (1999) realizaron un estudio longitudinal usando Resonancia Magnética y mostraron que la materia gris (la cual es una medida indirecta de una arquitectura compleja de glía, vasculatura y neuronas con procesos dendríticos y sinápticos) en la corteza frontal presentó un incremento hasta la adolescencia, alcanzando su máximo tamaño a los 12 años en niños y a los 11 años en niñas; en esta edad, crecen nuevas conexiones de las células del cerebro seguido por un proceso de poda y eliminación total de muchas células, eventos que determinarán a la materia gris cerebral. Esto sugiere que el cerebro presenta una segunda ola de producción de células nerviosas y eliminación durante la adolescencia, similar al proceso que ocurre durante los primeros 18 meses de vida. El proceso de pérdida de materia gris comienza en la corteza parietal dorsal, particularmente el área sensoriomotora primaria cerca del margen interhemisférico, después se extiende rostralmente sobre la corteza frontal y caudal y lateralmente sobre las cortezas parietal, occipital y finalmente sobre la corteza temporal. Los polos frontal y occipital tienen una pérdida temprana de materia gris; sin embargo, la última maduración de la materia gris se presenta en la corteza prefrontal dorsolateral, la cual se presenta al final de la adolescencia (Gogtay et al., 2004). Sowell, Thompson, Tessner & Toga (2001) relacionaron estos cambios en la materia gris con el funcionamiento cognitivo, y encontraron que, entre los 7 y los 16 años de edad, la materia gris en la corteza frontal decrementa (incluyendo en su análisis no sólo la CPF sino también la corteza motora, área motora suplementaria y la corteza premotora) (ver Figura 8). Con respecto a la materia blanca, Giedd et al. (1999) encontraron que esta aumentó linealmente, de los 4 a los 22 años de edad, en un 12.4% (ver Figura 9). Estos investigadores concluyen que la sinaptogénesis ocurre de manera concurrente con la mielinización y que los cambios en el desarrollo de la CPF continúan en la adolescencia.



**Figura 8.** Decremento de la materia gris de los 7 a los 16 años de edad (Sowell, Thompson, Tessner & Toga., 2001).



**Figura 9.** Incremento de la materia blanca de los 4 a los 22 años de edad (Giedd et al., 2001)

Por otro lado, y coincidiendo con algunas de las ideas estipuladas anteriormente, Restak (2001) considera que, dentro del cerebro adolescente ocurren grandes cambios en la anatomía, neuroquímica y hormonas. Las neuronas están estableciendo conexiones que determinarán aspectos importantes de la vida. Los genes están cambiando su expresión y por lo tanto, dictando la estructura proteica de células en el cerebro y en el cuerpo.

Algunas investigaciones han descubierto que el cerebro presenta una ola de crecimiento y poda sináptica. Entre la edad de los 7 a los 15 años, la ola de crecimiento ocurre en los lóbulos temporal y parietal. Mientras que entre los 16 y los 20 años de edad, la corteza frontal presenta poda sináptica. Por lo tanto, se considera que el adolescente logra

un mayor autocontrol, planea mejor y aprende como regular su conducta. En la adolescencia, los lóbulos frontales se encargan no sólo de mantener el disturbio biológico, sino también de adaptarse al ambiente como un adulto independiente. Es un tiempo en que las capacidades de la corteza prefrontal son probadas severamente. El cerebro adolescente presenta una tremenda plasticidad. Por lo tanto, podría decirse que el adolescente elige determinar la cualidad de su cerebro. “En esencia, en base a las actividades en las que se involucren los adolescentes se determinarán las células cerebrales y las conexiones que sobrevivirán para su vida adulta” (Giedd et al., 1999).

Con respecto a la edad adulta temprana, por muchos años se ha pensado que el cerebro en esta etapa de la vida es incapaz de regenerar neuronas. La idea de que el cerebro adulto tiene la capacidad de regenerar nuevas neuronas ha sido propuesta varias veces en los últimos 40 años llevándose a cabo varias investigaciones con el objetivo de comprobarlo. Una de las principales investigaciones que demuestran esta afirmación es la siguiente:

Gage & Van Praag (2002) usando un vector retroviral, expresaron proteínas verdes fluorescentes para marcar la división de células que pudieran ser visualizadas en una rebanada hipocampal viva; encontraron que las células generadas en el hipocampo del ratón adulto, tienen morfología neural y pueden exhibir propiedades de membrana pasivos, potenciales de acción, y entradas sinápticas funcionales similares a las encontradas en las células granulares del dentado maduro. Este hallazgo demostró que hay nueva generación de células maduras en las neuronas funcionales en el cerebro mamífero adulto.

Por otro lado, Barnea-Goraly et al. (2005) investigaron la maduración de la materia blanca, en 34 niños y adolescentes entre 6 y 19 años, a través de Resonancia Magnética. Se encontraron incrementos significativos a través de la edad en las regiones prefrontales, en la cápsula interna, así como en los ganglios basales y en las vías talámicas, vías visuales centrales y el cuerpo calloso. El miembro posterior de la cápsula interna, conexiones intratalámicas y el cuerpo calloso mostraron las más significativas coincidencias entre la densidad de materia blanca con la edad. Este estudio demuestra que durante la infancia y la adolescencia, la materia blanca cambia en las regiones cerebrales que son importantes para la atención, habilidades motrices, cognitivas y memoria. Esta trayectoria de desarrollo típico puede ser alterada en individuos con desórdenes del desarrollo, cognición y conducta.

Por otro lado, recientes estudios de imágenes estructurales *in vivo* muestran patrones temporales y espaciales de la maduración del cerebro entre la infancia, adolescencia y adultez temprana, que son generalmente consistentes con estudios *postmortem* de eventos de maduración celular, tales como incrementos en la mielinización y poda sináptica (Sowell, et al., 2001). Sowell et al. (2001) realizaron un análisis detallado de crecimiento y densidad de la materia gris en la superficie cortical del cerebro en un grupo de 35 niños, adolescentes y adultos (entre 7 y 30 años de edad) normales utilizando imágenes de resonancia magnética de alta resolución y nuevas técnicas de análisis de imágenes computacionales. Mapearon la continuidad del crecimiento del cerebro postadolescente que ocurre primeramente en la parte dorsal del lóbulo frontal bilateral y en la unión bilateral posterior temporo-occipital. Se encontró, de forma notable, una reducción en la densidad de la materia gris cortical, en postadolescentes, en el crecimiento del cerebro, que muestra una relación inversa entre la reducción de la densidad de la materia gris cortical y el crecimiento del cerebro; siendo más prominente en las regiones superiores frontales que controlan las funciones cognitivas ejecutivas. En la unión posterior temporo-occipital, la reducción de la densidad de la materia gris es mucho menos prominente a pesar del tardado crecimiento del cerebro en estas regiones entre la adolescencia y la adultez. El total crecimiento del cerebro no es significativo entre la infancia y la adolescencia, pero hay una relación estrecha entre la reducción de la densidad de la materia gris y el crecimiento del cerebro observado en la corteza parietal dorsal y la corteza prefrontal dorsolateral. Estos resultados sugieren que los eventos progresivos de maduración celular, tales como el incremento de la mielinización, así como eventos regresivos, tales como la poda sináptica, pueden jugar un papel prominente durante los años de postadolescencia en la determinación última de la densidad de la materia gris cortical y en la maduración del lóbulo frontal. Por otro lado, el volumen de materia blanca incrementó linealmente con la edad, siendo menor en mujeres que en hombres. El incremento neto a través de la edad de 4 a 22 años fue del 12.4 %. Las curvas del desarrollo de la materia blanca no difieren significativamente entre varios lóbulos. En contraste, los cambios en el volumen de materia gris cortical fueron no lineales y específicos corticalmente. La materia gris frontal y parietal alcanza su máximo desarrollo aproximadamente un año más temprano en mujeres, correspondiendo con el más

temprano inicio de la pubertad, sugiriendo una posible influencia de las hormonas gonadales (Giedd et al., 1999).

Por otro lado, como se vio anteriormente, la corteza prefrontal dorsolateral es el área de la corteza que, se ha considerado, madura más tardíamente en el ser humano (Fuster, 2002; Gogtay et al., 2004). Debido a que esta es la principal zona cortical de interés en nuestro estudio, a continuación se hace un resumen de su desarrollo ontológico en los seres humanos, así como las funciones cognitivas relacionadas a este desarrollo:

#### 2.4.2 Desarrollo de la corteza prefrontal dorsolateral en humanos

	<b>Desarrollo cortical</b>	<b>Desarrollo cognitivo</b>	<b>Neurotransmisores</b>	<b>Otros</b>
<b>Primer año de edad</b>	De los 7 ½ a los 12 meses de edad se da un crecimiento en longitud y extensión de las ramas dendríticas de las neuronas piramidales en la capa III de CPF-DL (Koenderink, Ulyings & Mrzljak, 1994). Las dendritas de estas neuronas piramidales y la superficie de sus cuerpos tienen una longitud corta a los 7½ meses de edad, alcanzando su mayor tamaño madurativo a los 12 meses de edad.	De los 7½ a los 8 meses de edad, los infantes alcanzan un objeto en un primer escondite con un retraso de 2-3 seg. Cuando la recompensa es escondida en otro lugar, los infantes se dirigen a la primera localización. A los 12 meses de edad, los niños aciertan con retrasos de casi 10 segundos (Gratch & Landers, 1971; Diamond, 1985).	Las proyecciones de dopamina a la CPF son críticas para las funciones cognitivas correspondientes a la CPF-DL. De los 6 a los 12 meses de edad, hay una cantidad reducida de dopamina en la CPF. Mientras que el patrón de presencia de acetilcolinesterasa en varias capas de la CPF-DL cambia dramáticamente durante el primer año de vida. (Kostovic, Shavic & Strinovic, 1988; Kostovic, 1990).	Cambios en los patrones de la actividad electroencefalo-gráfica sobre la corteza frontal y en la relación de la coherencia electroencefalográfica sobre las cortezas frontal y parietal
<b>Del 1er al</b>		Kochanska et al. (2000), usando	La reacción de la acetilcolinesterasa de las	

<b>3er año de edad</b>		una batería de pruebas, encontraron que la habilidad para inhibir una respuesta mejora intensamente de los 22 a 33 meses de edad.	neuronas piramidales de la capa III comienza a desarrollarse durante este periodo (Kostovic, 1990).	
<b>De los 3 a los 7 años de edad</b>	La densidad de las neuronas en humanos en la CPF-DL es más alta en los recién nacidos y declina después. A los 2 años de edad, la densidad está 55% por encima de la edad adulta, mientras que a los 7 años está 10% por encima de la edad adulta (Huttenlocher, 1990). La densidad sináptica de las células piramidales de la capa III incrementa después del nacimiento y alcanza su máximo alrededor del primer año de edad; a los 7 años, el decremento en la densidad sináptica es significativo, aunque no tan bajo como en los niveles adultos (Huttenlocher, 1979). Además se presenta una expansión de las ramas dendríticas de las células piramidales de la capa III en la corteza prefrontal dorsolateral en humanos de los 2 a los 5 años de edad (Mrzlijak, Uylings, Van Eden & Judas, 1990).	De los 3-7 años de edad hay una marcada mejoría en tareas cognitivas que requieren mantener información en mente e inhibición (como: “day – night”, “tapping” (golpeteo), “card sorting” (clasificación de cartas), “go/no go”, discriminación condicional, realidad-apariencia, teoría de la mente, falsas creencias, conservación de líquidos y retraso de gratificación) (Diamond, 2002). Por ejemplo, en la prueba de Clasificación de Cartas Wisconsin (WCST), los niños de 3 años de edad encuentran extremadamente difícil redirigir su atención a una nueva clasificación cuando los valores de la dimensión que ellos habían usado están todavía presentes. En general, se ha concluido que los niños que toman más tiempo para responder, realizan mejor la tarea (Gerdstadt, Hong & Diamond, 1994).	La densidad de neuropéptidos Y-inmunoreactivos neuronales en la corteza prefrontal dorsolateral incrementa entre los 2-4 años y 6-7 años de edad (DeLalle, Evers, Kostovic & Uylings, 1997).	
	Huttenlocher (1979) reportó	Se da un perfeccionamiento en		

<p><b>De los 7 años de edad a la edad adulta temprana</b></p>	<p>que la densidad sináptica de la capa III de las células piramidales en la CPF-DL, alcanza niveles adultos aproximadamente a los 16 años de edad. La eliminación sináptica de la CPF-DL ocurre en la infancia y se extiende a mediados de la adolescencia (Huttenlocher &amp; Dabholkar, 1997).</p>	<p>las funciones cognitivas, tales como: 1) velocidad de procesamiento, 2) habilidad de uso de estrategias, 3) habilidad para mantener información en mente y trabajar con ella (manipulando, monitoreando o transformándola) y 4) habilidad de mantener información en mente y controlar la inhibición (resistiendo interferencias, inercia atencional y la tendencia a respuestas previas). Estas 4 clases de habilidades parecen estar asociadas con la CPF, especialmente con la CPF-DL. De manera general, a medida que los niños crecen, van mejorando el uso de estrategias (Diamond, 2002). A partir de los 7 años de edad, los niños comienzan a ser capaces de combinar, separar, ordenar y reordenar, a ser más flexibles en su pensamiento y considerar más alternativas al resolver problemas. En la prueba WCST, los niños de 10 a 11 años de edad comienzan a alcanzar niveles adultos en la realización de esta tarea (Welsh, Pennington &amp; Groisser, 1991). Varios estudios indican que la habilidad de ejercer control inhibitorio continúa mejorando hasta la edad adulta temprana.</p>		
---	---	---	--	--

\* Datos tomados de Diamond (2002)

### 2.4.3 Desarrollo de las funciones ejecutivas a través de la edad

Aunque ha habido avances teóricos significativos en el campo de la neuropsicología infantil, las características del desarrollo en los infantes y adolescentes han recibido menor atención. Los progresos en la práctica clínica en este aspecto actualmente están restringidos por falta de técnicas de medición apropiadas y estandarizadas (Anderson, Anderson, Northam, Jacobs & Catroppa, 2001).

A pesar de la importancia para el desarrollo normal y habilidades eficientes para la vida, la medición de las FE es problemática debido a que tal medida es accesible sólo a través de pruebas que incorporan un orden bajo de funciones, además de la naturaleza multifactorial de las medidas propuestas para evaluarlas. Sin embargo, las habilidades ejecutivas proveen un excelente ejemplo de las dificultades que se presentan en la neuropsicología del desarrollo, ya que éstas son esenciales para un proceso eficiente en la infancia y la adolescencia (Anderson et al., 2001).

La maduración de las habilidades ejecutivas continúa a través de la infancia y la adolescencia temprana, lo cual enfatiza la necesidad de entender el proceso normal de tal desarrollo, con lo cual sería más fácil identificar y tratar las desviaciones de los patrones esperados de maduración (Anderson et al., 2001).

Por otro lado, Zelazo & Müller (2002) consideran que, aunque las FE pueden ser entendidas en términos de dominio bastante general, se puede hacer una distinción entre el desarrollo de los aspectos afectivos de las FE (*hot*) asociados con la corteza prefrontal orbitomedial, y el desarrollo de los más puramente aspectos cognitivos (*cool*) asociados con la corteza prefrontal dorsolateral. Los modelos de FE han estado basados tradicionalmente en la cognición (*cool*), y así una cuestión interesante para investigaciones futuras concierne al papel de aspectos afectivos (*hot*) en FE y su relación con la cognición (*cool*).

Algunas investigaciones del desarrollo en FE han revelado que: a) las funciones ejecutivas emergen temprano en el desarrollo, probablemente alrededor del final del primer año de vida; b) las funciones ejecutivas se desarrollan sobre un amplio rango de edades con importantes cambios que ocurren entre los 2 y los 5 años de edad, la ejecución a nivel adulto en muchas pruebas estandarizadas de FE se alcanzan alrededor de los 12 años de edad, y algunos procesos continúan cambiando hasta la edad adulta; c) algunos errores que se cometen en tareas que requieren la ejecución de funciones ejecutivas ocurren en



diferentes situaciones en edades diferentes, y esas situaciones pueden ser ordenadas de acuerdo a la complejidad de las inferencias requeridas; d) aunque las funciones ejecutivas pueden ser entendidas justo en términos de dominio general, se puede hacer una distinción entre el desarrollo de las funciones ejecutivas determinadas por aspectos afectivos (*hot*) asociadas con la corteza orbitofrontal (CFO) y el desarrollo de las más puramente cognitivas asociadas con la corteza prefrontal dorsolateral (*cool*) (c. f. Metcalfe & Mischel, 1999); e) Las dificultades en las funciones ejecutivas pueden ser una consecuencia común de perturbaciones diferentes de procesos epigenéticos; y f) diferentes desórdenes del desarrollo deben involucrar deterioros en diferentes aspectos de las FE (Zelazo & Müller, 2002).

Desde esta perspectiva, los incrementos en la complejidad relacionados con la edad, pueden ser entendidos en términos de la organización jerárquica de los concomitantes neurológicos de las FE, y dada esta organización, las lesiones en el desarrollo de la corteza prefrontal, tendrán consecuencias predecibles. El reto desde el punto de vista psicológico, es describir la organización jerárquica de las FE en términos de los procesos cognitivos y los sistemas cerebrales correspondientes (Zelazo & Müller, 2002).

De acuerdo a lo anterior, Anderson et al. (2001) evaluaron el desarrollo de las habilidades ejecutivas a través de la infancia tardía y la adolescencia temprana (138 niños de edades entre 11 y 17 años), e interpretaron los progresos en estas habilidades con referencia a la teoría neurológica y cognitiva actual; tales medidas correspondieron a la habilidad intelectual y medidas de FE, tales como: control atencional, flexibilidad cognitiva, fluidez verbal y ubicación de metas. Los resultados indicaron que en el grupo de 11 años las ejecuciones generales fueron más pobres en comparación con los de 15 años, lo cual indica una mejoría gradual en la planeación a través de la adolescencia. Además sugieren un decremento en la ejecución de las FE durante los últimos años de la infancia y los primeros años de la adolescencia. Se encontró también que cada componente de las FE no se desarrolla a la par; por ejemplo, la planeación tiene una aceleración de desarrollo a los 12 años, mientras que la flexibilidad cognitiva tiene un desarrollo más temprano. Además el procesamiento de información, flexibilidad cognitiva y ubicación de metas están relativamente maduras a los 12 años de edad, mientras que muchos procesos ejecutivos no

están completamente “establecidos” hasta la mitad de la adolescencia o la edad adulta temprana.

Otro dato importante considerando los cambios cognitivos importantes que se dan en el desarrollo, es que se han reportado regresiones en el desarrollo entre los 11 y los 13 años de edad, especialmente en las áreas de autorregulación y la realización de decisiones estratégicas (Anderson et al., 2001); de manera que el prolongado desarrollo del dominio ejecutivo está alineado con cambios neuropsicológicos, particularmente la sinaptogénesis y la mielinización de la corteza prefrontal.

De acuerdo a los últimos estudios realizados, el control atencional parece surgir en la infancia. En contraste, la flexibilidad cognitiva, ubicación de metas, y el procesamiento de información requieren un periodo crítico de desarrollo entre los 7 y los 9 años de edad, y su madurez relativa se alcanza aproximadamente a los 12 años de edad. Se piensa que ocurre un periodo transicional al inicio de la adolescencia y justo después surge el “control ejecutivo” (Anderson, 2002).

Por otro lado, De Luca et al. (2003) consideran que existe una discontinuidad en la literatura entre la exploración de la capacidad ejecutiva en niños pequeños y personas mayores. Debido a lo anterior, éste grupo realizó un estudio seleccionando 4 tareas del Cambridge Neuropsychological Test Automated Battery (CANTAB), destinadas a medir: aspectos espaciales, memoria de trabajo espacial, planeación (con las Torres de Londres) y el Intradimensional-Extradimensional Set Shifting ID-ED, todas éstas en versión computarizada. El grupo participante consistió de 194 sujetos, oscilando entre las edades de 8 a 64 años, divididos en bandas de edad de 8-10, 11-14, 15-19, 20-29, 30-49 y 50-64 para determinar cuando las habilidades ejecutivas se manifiestan “en línea”, se establecen y declinan. En este estudio se demostró que la planeación estratégica y la organización de la conducta dirigida a metas están en su punto más alto entre las edades de 20-29 años. Este mejoramiento es debido, en parte, al logro y mantenimiento de la máxima capacidad de memoria a corto plazo, que se presenta entre los 15 y 19 años de edad, ya que la maduración de esta capacidad contribuye a una gran habilidad para definir y ordenar un plan estratégico (Hitch, Towse & Hutton, 2001). Sin embargo, estas funciones alcanzadas en la adultez temprana, declinaron relativamente pronto en el proceso de envejecimiento, debido tal vez a la declinación natural en la capacidad de memoria para ordenamiento

temporal y localización de objetos (Brenan, Welsh & Fisher, 1997; Raz, Gunning-Dixon, Head, Dupuis & Acker, 1998). Por el contrario, los participantes más pequeños son considerados cognitivamente inmaduros en su habilidad para crear y ordenar un plan efectivo, llegando a la desorganización en sus respuestas y fallas en completar las tareas en los ensayos más complejos.

Tomando en cuenta la integridad de las regiones cerebrales, con el desarrollo de las conexiones cortico-corticales en la adolescencia tardía la eficiencia del sistema ejecutivo mejora con la edad, permitiendo a estos procesos cognitivos, ser más comprensivos, abstractos y flexibles, en la adultez temprana (Travis, 1998). Las fluctuaciones en la ejecución entre los 11-14 años de edad, en ausencia de mejoramiento significativo, se ha pensado que reflejan un incremento en la capacidad de los circuitos neurales durante este tiempo y la ignorancia relativa del adolescente en la forma de implementar y restringir sus nuevas habilidades encontradas (Klingberg, Vaidya, Gabrieli, Moseley & Hedehus, 1999).

De acuerdo a lo anterior, Luna, Garver, Urban, Lazar & Sweeney (2004) realizaron un estudio con el objetivo de caracterizar la maduración cognitiva a través de la infancia, adolescencia y adultez temprana, evaluando tareas de velocidad de procesamiento, supresión de la respuesta voluntaria y de memoria de trabajo espacial. Participaron 245 individuos sanos (93 mujeres y 152 hombres) de diferentes nacionalidades. Las edades fueron de los 8 a los 30 años. Los investigadores aplicaron diferentes tareas del paradigma antisácadas, evaluando tanto la velocidad como la eficacia de la ejecución. En los resultados se observó que la eficacia de la ejecución aumentaba conforme aumentaba la edad de los participantes, ya que se presentó una mejoría inicial seguida por una estabilidad en la adolescencia. La madurez del desempeño a nivel adulto se presentó de la siguiente manera: para el procesamiento de respuesta de inhibición a los 14 años, para la velocidad de procesamiento a los 15 años, y para la memoria de trabajo a los 19 años. Aunque la inhibición, la velocidad de procesamiento y la memoria de trabajo son procesos desarrollados de manera independiente, la velocidad de procesamiento influyó sobre la memoria de trabajo, mientras que el desarrollo de la supresión de la respuesta y memoria de trabajo fueron interdependientes. Estos resultados indican que la velocidad del procesamiento, la supresión voluntaria de la respuesta y la memoria de trabajo, aún cuando

exista influencia de unas a otras, maduran en diferentes etapas través de la infancia tardía y la adolescencia.

Por su parte, Braver et al. (1997) realizaron estudios en los que examinaron la actividad cerebral en adultos y en niños durante la ejecución de una tarea de memoria de trabajo espacial. La tarea consistió en monitorear un arreglo de cuatro cuadros para localizar un punto. El punto aparecía en una nueva ubicación cada dos segundos. Hubo tres condiciones diferentes: la primera era una condición visual, en la que los participantes no emitían ninguna respuesta, la segunda era una condición motora, en la que los participantes debían indicar la ubicación espacial actual del punto y por último, una condición de memoria, en la que los participantes debían indicar la ubicación en la cual había aparecido el punto dos ensayos previos. Con el fin de tratar de igualar la precisión de las respuestas conductuales, los participantes hicieron una prueba previa, fuera del escáner, para evaluar cuál carga de memoria era adecuada para que cada individuo tuviera una ejecución del 75 al 95%. Se compararon los resultados de los datos de seis niños (8 a 10 años de edad) y seis adultos (19 a 26 años de edad) (Thomas et al., 1999). La comparación de la condición motora con la de memoria reveló un incremento de la actividad en la circunvolución frontal superior derecha, la CPF dorsolateral derecha, la corteza parietal superior derecha y la corteza parietal inferior bilateral, tanto en los niños como en los adultos. Estos resultados sugirieron que las tareas de memoria de trabajo espacial activan regiones corticales similares en los niños y en los adultos. Sin embargo, es probable que la magnitud o intensidad de la activación difiera con la edad. En el citado estudio, a pesar de que no fue posible evaluar directamente esta diferencia, se encontró una tendencia a que los niños tuvieran un mayor volumen de activación prefrontal que los adultos y a que los adultos tuvieran mayores volúmenes de activación en el área parietal. De acuerdo con los autores, estas variaciones en los patrones de actividad pueden reflejar una maduración de las regiones corticales y diferencias estratégicas en la ejecución de la tarea de la memoria de trabajo. Por otro lado, un trabajo similar al anterior fue realizado por Kwon, Reiss & Menton (2002), los cuales realizaron un estudio en el que participaron sujetos con un rango de edad de 7 a 22 años, en la que también aplicaron una tarea de memoria de trabajo espacial. Utilizaron además Resonancia Magnética Funcional para observar la actividad funcional durante la ejecución de la tarea. Los resultados fueron los siguientes: se

observaron incrementos relacionados con la edad en la activación cerebral de la corteza prefrontal dorsolateral bilateral, la corteza ventrolateral izquierda, la corteza premotora izquierda y la corteza parietal posterior bilateral. Los resultados de estos autores, a diferencia del estudio de Braver et al. (1997) proveen evidencia de que las áreas frontales y parietales involucradas en la memoria de trabajo presentan un incremento en la activación relacionado con la edad.

Por su parte, Crone, Wendelken, Donohue, Van Leijenhorst. & Bunge (2006) realizaron un estudio para analizar el desarrollo de la memoria de trabajo comparando una condición de mantenimiento-manipulación de información con una condición de mantenimiento puro de información. Participaron tres grupos de edades (8-12, 13-17 y 18-25 años), los cuales realizaron una tarea de memoria de trabajo para objetos con condiciones separadas de mantenimiento y manipulación. En la tarea se presentaron 3 “estímulos de memoria” (objetos), después hubo un periodo de demora en el que se le pedía a las personas que memorizaran en el mismo orden (condición de mantenimiento), o en orden inverso (condición de manipulación), los tres estímulos. Finalmente, aparecía uno de los estímulos y el número 1, 2, ó 3 debajo de él y los individuos debían indicar si el estímulo correspondía al primero, segundo o tercer estímulo, según el orden recordado. Los autores encontraron que los niños de 8 a 12 años de edad tuvieron una ejecución pobre en la tarea, en comparación con los adolescentes o los adultos, particularmente en los ensayos que requerían la manipulación además del mantenimiento, apoyando la idea de que la habilidad de manipular estímulos en la memoria de trabajo se desarrolla de manera más lenta que la habilidad de simplemente mantener los estímulos en mente. Los patrones de actividad relacionados con el mantenimiento fueron similares en los tres grupos de edad. En contraste, cuando se requirió la manipulación, en los niños de 8 a 12 años no se activaron las regiones que se activaron en los adolescentes y los adultos para manipular la información. En particular, los datos revelaron que en los niños de 8 a 12 años se activa la corteza prefrontal ventrolateral para la memoria de trabajo de manera similar que en los adolescentes y los adultos, pero no se da un reclutamiento adicional de la corteza prefrontal dorsolateral derecha y la corteza parietal superior, evento requerido para la manipulación durante la demora. Estos resultados indican que el reclutamiento incrementado de la corteza prefrontal dorsolateral y la corteza parietal bilateral durante la adolescencia está asociado

con el perfeccionamiento en la habilidad para trabajar con representaciones de objetos. Los análisis reportados sugieren que los niños tienen dificultad con la manipulación de información porque no se da el reclutamiento de estas regiones de manera apropiada durante la demora. El estudio indica entonces que, durante el desarrollo, la actividad cerebral relacionada con el mantenimiento, y la relacionada con la manipulación, es diferente, ya que durante la manipulación de información en los niños pequeños (8 a 12 años) no se activan regiones de la corteza prefrontal y parietal como ocurre en las personas mayores (13 a 25 años). Los estudios anteriores indican pues, que la actividad cerebral subyacente a la ejecución de tareas que requieren funciones ejecutivas es diferente en niños, adolescentes y adultos, la cual se ha relacionado con la eficacia de la ejecución en dichas tareas.

## **2.5 Tareas que evalúan las funciones ejecutivas y la funcionalidad prefrontal**

Actualmente tanto a nivel neuropsicológico como de investigación se aplican diversos tipos de pruebas para medir la funcionalidad prefrontal y funciones ejecutivas, tales como: planeación, memoria de trabajo, etc. Para la evaluación de estas funciones ejecutivas se han propuesto varias pruebas como la de Stroop, la prueba de Clasificación de Cartas de Wisconsin (WCST), las Torres de Hanoi y las Torres de Londres entre muchas otras. A continuación se explican, de manera general, la forma de aplicación y algunas consideraciones sobre los parámetros de medición de las pruebas antes mencionadas:

### **2.5.1 Test de clasificación de tarjetas de Wisconsin (WCST) (Grant & Berg, 1948)**

Consiste en 4 tarjetas de muestra (patrón) y 128 tarjetas de respuestas que contienen figuras de varias formas (círculos, cruces, triángulos, estrellas), colores (verde, azul, rojo y amarillo), y distinto número de figuras (1, 2, 3, 4). El sujeto debe emparejar las tarjetas de respuesta con las tarjetas muestra, deduciendo los criterios para hacerlo correctamente de la información que le proporciona el examinador en cada ensayo. En esta prueba se obtienen múltiples puntuaciones de rendimiento ligadas a diferentes procesos cognitivos: número de categorías completas, fallos en mantener la categoría (incapacidad para mantener una estrategia adecuada), porcentaje de respuestas perseverativas (persistencia en responder

según un criterio que es incorrecto), porcentaje de errores perseverativos y no perseverativos, y porcentaje de respuestas de nivel conceptual (eficacia conceptual).

Esta prueba se desarrolló originalmente con el objeto de evaluar el razonamiento abstracto y la habilidad para cambiar las estrategias cognitivas como respuesta a eventuales modificaciones ambientales. Es en este sentido que el WCST puede considerarse como una medida de función ejecutiva, que requiere habilidad para desarrollar y mantener las estrategias de solución de problemas que resultan adecuadas para conseguir un objetivo a través de condiciones que implican cambios de estímulos. Además el WCST también se menciona frecuentemente como un test que evalúa el funcionamiento prefrontal (Soprano, 2003). Grant & Berg (1948) catalogaron a esta tarea como un índice de razonamiento abstracto, formación de conceptos y respuesta a estrategias para cambiar contingencias contextuales. Así mismo, Schuepbach et al. (2002) consideran que el WCST en sujetos normales evalúa procesos tales como la conceptualización, categorización y cambio de reglas. Además consideran que esta tarea requiere la categorización visual de los ítems de acuerdo con un principio de cambio temporal. El WCST mide no sólo la memoria de corto plazo sino también la habilidad de entender la interferencia de memorias inoportunas, así como la planeación y preparación de actos. Por otro lado, Barceló (2001) considera que los hallazgos de las investigaciones actuales sugieren que las puntuaciones del WCST no pueden ser consideradas como marcadores válidos ni específicos de disfunción prefrontal, debido a que las puntuaciones de esta tarea mezclan procesos cognitivos y neuronales muy heterogéneos; sin embargo sí proporcionan índices del funcionamiento adecuado de la corteza prefrontal y estructuras cerebrales relacionadas.

### **2.5.2 Test stroop de colores y palabras (Stroop, 1935)**

Se compone de tres láminas que el sujeto debe leer:

- En la primer lámina, debe leer las palabras rojo, verde y azul impresas en tinta negra, y dispuestas aleatoriamente en columnas.
- En la segunda debe nombrar el color de la tinta con que están impresos unos símbolos “xxx”.

- Finalmente, en la tercera lámina aparecen las palabras rojo, verde y azul escritas con tinta de estos colores, pero no correspondiente a la palabra. Y el sujeto debe decir el color de la tinta desatendiendo la palabra escrita.

Se obtiene una puntuación por cada lámina que consiste en el número de elementos leídos en 45 segundos. También se calcula una puntuación de interferencia con base en la puntuación obtenida en cada una de las láminas.

Esta prueba indaga la capacidad del sujeto para clasificar información de su entorno y para reaccionar selectivamente a esa información, por lo tanto, evalúa la capacidad de inhibir estímulos que desencadenan respuestas automáticas y la capacidad de adaptar la percepción y adaptarse a demandas nuevas inhibiendo una respuesta habitual a favor de una inusual (flexibilidad cognitiva) (Soprano, 2003). De la misma forma, Adleman et al. (2002) consideran que los procesos que evalúa esta prueba son: la lectura de palabras, nombramiento de colores y resolución de la interferencia. Además de los procesos mencionados, Vendrell, Junqué, Pujol, Jurado, Molet & Grafman (1995) consideran que esta prueba tiene un componente atencional muy importante, ya que encontraron, por medio de imagenología cerebral, que la corteza prefrontal derecha estuvo significativamente más involucrada que la izquierda en la resolución de esta tarea.

### **2.5.3 Torres de Londres (Shallice, 1982)**

Es una prueba neuropsicológica desarrollada por Shallice (1982) que se ha utilizado para detectar problemas, fundamentalmente en el área de la planeación. Torres de Londres (TOL) es una adaptación y simplificación del tipo de problema que se presenta en las Torres de Hanoi (TOH), y permite que la dificultad de los problemas sea gradual.

De forma general y en su versión clásica, las TOL, consisten en una base con tres soportes y tres piezas, en la cual se le solicita al sujeto ubicar las piezas en un cierto orden, siguiendo ciertas reglas. En función de la posición final a alcanzar, los problemas se dividen en 5 niveles (los de nivel 5 requieren de al menos 5 movimientos para lograr la posición final). La ejecución del sujeto es medida por el número de movimientos realizados para lograr la configuración final y por otros parámetros temporales, como tiempo total de solución del problema, tiempo de latencia del primer movimiento (tiempo entre la



presentación del problema y el primer movimiento ejecutado) y tiempo de ejecución total (tiempo entre el primer movimiento y el último movimiento).

Existen diferentes sistemas de aplicación, desde la versión clásica, fabricada en madera, hasta la versión computarizada. En los últimos años ha habido un creciente uso de las TOL como prueba para medir la planeación, tanto en sujetos con lesiones de los lóbulos frontales como en los que presentan trastornos mentales (Soprano, 2003).

En esta prueba se requiere hacer un análisis de medios y fines para resolver problemas cuya dificultad va aumentando (Soprano, 2003). Además, evalúa procesos de control atencional, de inhibición de acciones y representaciones, y de memoria de trabajo espacial, que contribuyen al logro de un plan (*logro de objetivos*).

Baker et al. (1996) verificaron la asociación de esta tarea con la activación de circuitos corticales que involucran entre otros a los de la corteza prefrontal dorsolateral. Además consideran que el complejo proceso involucrado en la ejecución de esta tarea puede subdividirse en 3 subprocesos: atención dirigida, definición de submetas y memoria de trabajo. Por otro lado, Newman et al. (2003) consideran que las TOL además requieren dos principales tipos de procesos cognitivos: ejecución de un plan y procesamiento visoespacial.

#### **2.5.4 Las Torres de Hanoi**

*Según una leyenda, un monasterio en Hanoi tiene un tablero con tres postes. El primer poste tiene 64 discos de oro en orden descendente de tamaño, el más grande en el fondo y el más pequeño en la parte superior. Los monjes tienen órdenes de Dios para mover todos los discos al tercer poste mientras los mantienen siempre en orden descendente. Un disco grande nunca debe colocarse sobre uno más pequeño. Pueden ser usados los tres postes. Cuando los monjes muevan el último disco, el mundo llegará a su fin. ¿Por qué?*

*El mundo debe terminar porque los monjes deben tomar  $2^{64} - 1$  movimientos para completar la tarea de movimientos de los discos estipulados. Si se realiza un movimiento por segundo (sin errores), la tarea requerirá  $5.849 \times 10^{11}$ , o 584,942,417,355 años para completarla (Danesi, 2004).*

Las Torres de Hanoi (TOH) son conocidas como uno de los más famosos y fascinantes de todos los juegos matemáticos. Fue inventado como un juego para niños en

1883 por el matemático francés Francois Edouard Anatole Lucas. Aunque la idea representante del patrón de las Torres de Hanoi se ha encontrado tiempo después en varias culturas a través del mundo. El acertijo es, en efecto, un modelo dentro del concepto de series de juegos geométricos. Dada su simplicidad, un hecho intrigante en nuestros días es que califica como uno de los diez grandes acertijos de todos los tiempos (Danesi, 2004).

Lucas fue educado en el École Normale en Amiens. Durante la guerra franco-prusiana (1870-1891), sirvió como oficial de artillería. Después de la guerra, fue contratado para enseñar matemáticas en el Lyceé Saint Louis en Paris. más tarde, Lucas enseñó en el Lyceé Charlemagne, también en Paris. Murió como resultado de un extraño accidente en un banquete, cuando un plato se cayó y una pieza voló y cortó su mejilla, infectándolo letalmente. Lucas es mejor conocido por su trabajo en teoría numérica (Danesi, 2004).

Las Torres de Hanoi actualmente son consideradas como una prueba de organización y programación visoespacial de una secuencia de movimientos y de memoria operativa que mide funciones ejecutivas, específicamente memoria de trabajo, planeación e inhibición.

Esta prueba consiste en lo siguiente: se tienen tres torres, en una de ellas hay  $n$  discos de diferentes tamaños, organizados de manera que el mayor esta debajo de los demás y así sucesivamente. El problema consiste en mover todos los discos a otra torre, pero con la condición de mover sólo uno cada vez, los discos siempre tienen que estar en una de las torres y nunca se puede colocar un disco mayor sobre uno menor.

Goel y Grafman (1995) realizaron un compendio de las cuatro estrategias para la solución de las Torres de Hanoi basados en la propuesta de Simon (1975) que consisten en lo siguiente:

1. *Estrategia de recurso-meta*: dado  $n$  discos en el poste inicial (poste 1), la estrategia es la siguiente: a) mover  $n-1$  discos al poste intermedio (poste 2), b) mover el  $n$ -th disco al poste meta, c) mover la torre (la cual está en el poste intermedio) al poste meta (poste 3). Pero dadas las restricciones del problema, solamente el paso b se considera un movimiento elemental legítimo; los pasos a y c son en sí mismos un problema de Torres de Hanoi con un disco menos que el problema original, el cual puede ser resuelto por descomposición en los mismos tres pasos. Todo puede ser

solucionado mediante el uso de estos tres pasos. Esta estrategia garantiza encontrar la vía más corta para llegar a la meta.

2. *Estrategia de patrones de movimiento:* si el número total de discos es impar, mover el disco más pequeño del poste inicial (poste 1) al poste meta (poste 3) al poste intermedio (poste 2), luego al poste inicial (poste 1), etc. Si el número total de discos es par, mover el disco más pequeño en la dirección opuesta, del poste inicial al poste intermedio, al poste meta, al poste inicial, etc. La estrategia requiere el concepto de movimientos impares/pares y la idea de movimientos cíclicos, de los discos, a través de los postes en un orden particular.
3. *Estrategia perceptual:* Hay dos estrategias perceptuales. La estrategia perceptual simple es la más obvia y es una estrategia “natural”. Puede ser aplicada en cualquier punto pero no lleva a la solución más corta. En su forma más simple hace pocas demandas de la memoria de trabajo y no requiere el descubrimiento de reglas de ejecución.

a) La estrategia más simple es la siguiente:

1. Si todos los  $n$  discos son colocados en el poste meta, finalizar; en caso contrario
2. Encuentre el siguiente disco ( $i$ ) a ser colocado en el poste meta
3. Si hay discos más pequeños encima del disco  $i$ , quitarlos,
4. Quitar los discos más pequeños que  $i$  del poste meta
5. Mueva el disco  $i$  al poste meta
6. Regresar al paso 1.

En esta forma la estrategia perceptual es transparente y fácil de ejecutar porque está al final de la configuración del disco actual en cada ciclo. No se generan demandas de la memoria de trabajo.

Esta estrategia tiene dos complicaciones: Si hay cuatro discos o más en el problema, cuando se libera el primer poste al mover el disco inicial, se bloqueará el poste meta y al liberar el poste meta, se bloqueará el poste inicial, resultando en un ciclo infinito. La manera de superar esta dificultad es retener un grupo de submetas en la memoria de trabajo, marcando ciertos movimientos temporales e interrumpiendo la estrategia, algunas veces para deshacerlas antes

de proceder. La segunda complicación es la resolución del conflicto meta submeta, un conteo intuitivo de movimientos hacia atrás, lo cual superficialmente aleja de la meta, pero se requiere para llegar a la meta. Se necesita diferenciar entre metas locales y la meta global y lograr resolver el conflicto entre ambas y algunas veces inhibir la meta global y ser guiado por las submetas.

- b) La estrategia perceptual sofisticada difiere de la anterior sólo en que, si en el paso 3, se mueve un disco obstructor al poste inicial, se establece una submeta de movimiento de éste disco al poste intermedio y entonces se procede del paso 1 al 3.

De acuerdo a Goel y Grafman (1995), el uso de determinado tipo de estrategia provee información acerca de si los sujetos utilizan o no el camino más corto para resolver la tarea. En este estudio se comparó la ejecución de las Torres de Hanoi (problema de 5 discos) entre pacientes con lesiones prefrontales y sujetos normales. Encontraron que no hubo diferencias en la utilización de estrategia (ambos grupos utilizaron la perceptual); sin embargo sí encontraron diferencias en la ejecución de la tarea, siendo mejor dicha ejecución en los controles.

Por su parte, Welsh y Huizinga (2001), realizaron una comparación entre las Torres de Londres y las Torres de Hanoi, encontrándose lo siguiente:

Tomando en cuenta la hipótesis de que las funciones ejecutivas usan mecanismos de selección de metas, planeación, mantenimiento de elementos (set en inglés), automonitoreo, inhibición, y flexibilidad de estrategias, las Torres de Hanoi y las Torres de Londres son consideradas como ejemplos de medidas de funciones ejecutivas (citado en Welsh y Huizinga, 2001). Estas pruebas requieren la habilidad de hacer frente adecuadamente a situaciones nuevas.

Estas tareas son similares en el sentido de que ellas requieren la transformación de un estado inicial de esferas o discos colocados en tres postes, hacia una configuración de meta de estos objetos con el menor número de movimientos. Ambas imponen una organización de reglas de las tareas que limitan la manera en la cual estos objetos deben ser movidos de poste a poste. Dado que la solución más eficiente es demandada por ambas tareas, una secuencia de movimientos debe ser planeada, ejecutada, monitoreada y revisada

antes de la acción. En la neuropsicología clínica y experimental, las TOH y las TOL, son consideradas esencialmente isomórficas.

Recientes estudios sugieren que la realización de ambas tareas es sensible al daño o disfunción prefrontal. Por ejemplo, han sido encontradas deficiencias en la realización de TOH en sujetos autistas (Ozonoff, Pennington & Rogers, 1991), sujetos con desorden obsesivo compulsivo (Cavedini, Cisima, Riboldi, D'Annuncci & Bellodi, 2001) y sujetos esquizofrénicos (Goldberg et al., 1990). Además, un importante número de estudios han demostrado que, entre pacientes con lesiones del lóbulo frontal, existe deterioro en la ejecución de Torres de Hanoi (por ejemplo: Goel & Grafman, 1995). De manera similar, se ha encontrado deterioro en la realización de TOL en grupos clínicos, tales como individuos con enfermedad de Parkinson (Hanes, Andrewes, Smith & Pantelis, 1996).

Algunas investigaciones han sugerido que ambas tareas son sensibles a las funciones del lóbulo frontal porque ellas intervienen en las funciones ejecutivas de memoria de trabajo (Goldman-Rakic, 1987) e inhibición (Goel & Grafman, 1995). Sin embargo, los soportes empíricos de la validez de construcción de estas tareas son todavía escasos (Welsh & Huizinga, 2001). Además, existen factores importantes, de diferencias, entre las TOH y TOL. A continuación se mencionan los principales:

- 1.- Existen diferentes demandas cognitivas para resolver las TOH y TOL.
- 2.- Tienen diferentes tipos de procedimientos de aplicación y diferencias en la puntuación.
- 3.- La baja potencialidad en la confiabilidad de una o ambas tareas contribuirá a cometer errores en los puntajes de una o de ambas.

Ha habido muy pocas investigaciones que citan la integridad psicométrica de la TOL (Culberston & Zillmer, 1998; Schnirman, Welsh & Retzlaff, 1998), y las investigaciones dirigidas a examinar las propiedades psicométricas de las TOH, son aún más raras.

Algunos estudios recientes indican que la realización de cada tarea requiere diferentes mecanismos cognitivos. Si es así, la realización de la TOH y TOL deben ser sensibles a circuitos diferentes dentro del sistema prefrontal cortical.

Por otro lado, y considerando el efecto de la edad en la realización de las Torres de Hanoi, Bull, Espy, & Senn (2004) realizaron un estudio con 118 niños de edades entre 3 años 7 meses a 6 años 9 meses, y encontraron lo siguiente: los niños de menor edad no

parecen planear abiertamente sus movimientos antes de realizarlos, pues no se detienen brevemente antes de mover los discos o las bolas y no parecen ejecutar secuencias sistemáticas del movimiento. Por lo que, los niños de menor edad confían más en una estrategia perceptiva de la secuencia del movimiento en línea; por lo tanto, la memoria de trabajo, a corto plazo o memoria visoespacial, no desempeña un papel tan crucial en su funcionamiento, particularmente en los ensayos donde se requieren solamente un pequeño número de submetas. Este estudio coincide con el realizado por Ahonniska, Ahonen, Aro; Tolvanen & Lyytinen (2000), donde se estudiaron niños de edades entre 7.7 y 11.6 años, en el cual se encontró que los niños de mayor edad perfeccionaron la ejecución de la prueba y disminuyeron el tiempo total de realización.

Considerando la importancia de las regiones cerebrales implicadas en esta tarea, Fincham, Carter, Vincent, Adrew & Anderson (2002) realizaron un estudio cuyo objetivo fue determinar las áreas cerebrales en las cuales cambiaba la actividad durante el procesamiento de metas (planeación) en una adaptación de las TOH. Utilizaron Resonancia Magnética Funcional (se registraron 8 sujetos, 4 hombres y 4 mujeres, de edades entre 18 y 32 años de edad). Se identificaron dos momentos de activación: uno en el que la activación varió paramétricamente con las operaciones del procesamiento de metas, y otro en que la activación se pronunció sólo durante el ensayo intensivo del procesamiento de metas. Se mostró una relación fronto-parietal que incluía la corteza prefrontal dorsolateral (área 9 de Brodmann) la corteza parietal bilateral (áreas 40 y 7 de Brodmann) y el área premotora bilateral (6 de Brodmann). La región preferentemente comprometida sólo durante el procesamiento intensivo de metas incluyó al giro frontal inferior (área 44 de Brodmann).

#### **2.5.4.1 Investigaciones de inteligencia artificial con TOH**

Las TOH fueron una de las tareas centrales en la investigación de Inteligencia Artificial dentro de la resolución de problemas (Anderson, 1993). Por ejemplo, el famoso programa *El Problema General Solucionador* (Newel, Shaw & Simon, 1958) simuló intentos de humanos para resolver las TOH (Anzai & Simon, 1979). El primer paso en esta investigación fue especificar totalmente el problema (por ejemplo: identificando el punto inicial, meta y reglas). Después se escribió un programa de computadora, el cual se considera que simula los pasos que una persona debería hacer para resolver el problema. La

mayor congruencia entre la producción de la computadora y las acciones actuales humanas (ambos en aciertos y errores), corresponde a la representación de procesos cognitivos (Rosser, 1994). Una parte integral de esta investigación especifica claramente todos los aspectos del problema. Esta especificación involucra construcción de *problemas espaciales*. El problema espacial se refiere a todos los posibles estados o posiciones que pueden ser logrados mientras se adhieren a las reglas de la tarea (Kahney, 1993). Newell y Simon (1972) encontraron evidencia de que, más que la formación de una representación mental del problema espacial completo, las personas eligen acciones que los guiarán a través de ciertos pasos en el problema espacial. Específicamente, las personas tienden a elegir acciones que reducen la discrepancia entre el estado inicial y el estado meta y se rehúsan a elegir acciones que temporalmente los lleven a estados menos similares al estado meta (Anderson, 1993).

Una de las mejores estrategias que las personas usan para elegir tales acciones es el *análisis medios-meta* (Newell et al., 1958). El primer paso en el *análisis medios-meta* es la comparación entre el inicio y la meta para identificar la mayor discrepancia entre las dos. Entonces se busca una acción que resuelva directamente esta discrepancia. Cuando una acción es encontrada, esta es emprendida, el ciclo comienza otra vez y continúa hasta que el problema es resuelto. De cualquier forma, si no hay una acción apropiada, el problema es reexaminado para identificar una submeta, esto es, un estado provisional que parcialmente reduce la discrepancia entre el inicio y la meta. Una vez más, si hay una acción conveniente para resolver la discrepancia submeta, esta es emprendida, y el proceso completo comienza otra vez. Si no hay una acción satisfactoria, otra submeta es identificada, la cual reduce la discrepancia incluso en mayor grado, se buscan acciones para ser implementadas si son convenientes hasta que la meta es lograda. En la resolución de TOH hay varias estrategias *medios-fin* diferentes que deben ser usadas (Simon, 1975).

Aunque, como ya se mencionó anteriormente, el *análisis medios-fin* es sólo una de muchas diferentes estrategias de solución de problemas, es el método que generalmente se usa para resolver nuevos problemas no comunes. Newel y Simon (1972) concluyeron que el análisis medios-fin describe en gran medida la manera en que los humanos resuelven problemas.

#### 2.5.4.2 Funciones ejecutivas implicadas en la resolución de las TOH

Finchman et al. (2002) utilizaron una versión de Torres de Hanoi como una medida de *planeación*, puesto que este proceso en la tarea es comparable con la planeación que se lleva a cabo en la vida diaria ya que, por ejemplo para ir a algún lugar, siempre elegimos la ruta más eficiente. De la misma forma, Cardoso y Parks (1998), consideran que la planeación es “la identificación y organización de los pasos y elementos necesarios para llevar a cabo una intención o lograr una meta”; tal definición constituye un elemento crítico en la exitosa ejecución de las Torres de Hanoi. Así mismo, Simon (1975) consideró a las Torres de Hanoi como una tarea prototipo en el estudio de cognición de alto nivel (*razonamiento complejo*), *solución de problemas*, y *aprendizaje por procedimientos*. Sin embargo, Goel y Grafman (1995) consideran que la habilidad de planeación no es suficiente para resolver la tarea de Torres de Hanoi, porque se puede ver hacia delante todo lo que se quiera, pero a menos que se vea el “truco”, el movimiento intuitivo hacia atrás, no se resolverá el problema. Estos investigadores sugieren que esta prueba evalúa más bien *memoria de trabajo* y la *resolución del conflicto meta-submeta*.

Por otro lado, Handley et al. (2002) consideran que en la ejecución de las Torres de Hanoi juega un papel fundamental la capacidad de la *memoria de trabajo espacial*, ya que la realización de la tarea requiere, más que un componente verbal, un componente espacial (Ahonniska et al., 2000, Welsh et al., 1991). Además, se dice que la memoria de trabajo es necesaria para la generación y almacenamiento provisional de submetas, lo cual es fundamental para planear y ejecutar una serie de respuestas (Goel & Grafman, 1995). En esta tarea, la planeación puede ser confundida con el conflicto meta-submeta. Las TOH también han sido implicadas en la *inhibición* de movimientos incorrectos (Krikorian, Bartok & Gay, 1994), monitoreo de la propia conducta y *revisión de planes (monitoreo)* cuando es necesario (Welsh, Cicerello, Cuneo & Brennan, 1994). Por otro lado, Cavedini et al. (2001) realizaron un estudio en el que compararon 122 sujetos diagnosticados con el síndrome obsesivo-compulsivo y 58 sujetos control pareados por edad. Estos autores tomaron en consideración que la corteza prefrontal juega un papel importante en las funciones “declarativas” y los ganglios basales lo hacen en funciones de “procedimiento”. Esto último incluye aspectos de habilidad de *solución de problemas*, *flexibilidad cognitiva*



y *planeación* (Heindel, Salmon & Shults, 1989), tal como la tarea de Torres de Hanoi (Shallice, 1982), la cual fue la tarea que se les aplicó en tres versiones con diferente grado de dificultad. Potencialmente las TOH pueden ser flexibles en su aplicación y, con algunos cambios en su metodología, puede ser usada para estudiar tanto áreas corticales como subcorticales y diferentes aspectos de solución de problemas, tales como la sensibilidad a la retroalimentación, conocimiento de reglas y observación; por lo tanto estos investigadores consideran que la diferencia en la ejecución y las áreas cerebrales involucradas en la tarea se deben a las instrucciones que el experimentador da al participante. Estos investigadores encontraron que los sujetos normales ejecutaron las tareas de TOH mejor que los pacientes y que a la vez, se pudo distinguir a los pacientes con problemas en la función declarativa de los pacientes con deficiencias en la función de procedimiento, de acuerdo a su ejecución en los diferentes grados de dificultad de las versiones de las Torres de Hanoi aplicadas. Con respecto a lo anterior, Goldberg et al. (1990) sugieren que es la versión de la tarea la que determina los procesos cognitivos y las áreas cerebrales implicadas; de esta forma consideran que la versión de 3 discos de las Torres de Hanoi, involucra de forma primaria la habilidad para resolver problemas y planeación, lo cual es sensible principalmente a las lesiones del lóbulo frontal; y que la versión de 4 discos, la cual involucra “aprendiendo por la práctica”, es sensible al deterioro de los ganglios basales. Estos investigadores encontraron que los pacientes esquizofrénicos realizan la tarea significativamente peor que los sujetos normales, pero que estos pacientes pueden ejecutar la tarea perfecta o casi perfecta después de 4 días de ejecución repetida.

Por otro lado, León Carrión, Barroso & Martín (2001) consideran que las TOH también evalúan las estrategias de *solución de problemas* y el *procesamiento ejecutivo*. Además, estos investigadores interpretan algunos parámetros de medición de resolución de las TOH de la siguiente manera: el tiempo total requerido para ejecutar la tarea se puede interpretar como un índice de la habilidad para solucionar el problema. Es decir, es un índice de la capacidad de procesamiento y de la integridad de todo el sistema. Mientras menores sean las puntuaciones, mejor será su integridad y efectividad. El número total de movimientos puede ser visto como el uso de estrategias de aprendizaje. Mientras menores sean las puntuaciones, mejor será el uso de estrategias del sistema, y mejor será también el uso de los mecanismos relacionados con la retroalimentación. Probablemente sea esta la

mejor puntuación para conocer la integridad de los circuitos prefrontales. El número total de errores en su conjunto se puede asociar con el mecanismo que dirige la retroalimentación del sistema ejecutivo. Mientras menor sea la puntuación, mejor es la integridad del mecanismo. Por otro lado, también se ha considerado que un largo tiempo de planeación antes del primer movimiento puede indicar la existencia de planeación (Ahonniska et al., 2000; Welsh et al., 1994). Sin embargo, este largo tiempo de planeación no necesariamente distingue una ejecución exitosa de una que no lo sea. Además un tiempo total de planeación largo, puede también indicar baja capacidad para resolver problemas (ejemplo: confusión o limitaciones en la memoria de trabajo), reconocimiento del problema sin la habilidad de resolverlo o lentitud para responder a algún estímulo (Welsh et al., 1994). Un corto tiempo en la planeación indica impulsividad y falta de planeación, o generación rápida de buena planeación. En la ejecución exitosa, el tiempo de ejecución total corto debe ser una indicación de ejecución rápida de la secuencia después de un plan exitoso, mientras que una ejecución no exitosa puede mostrar ignorancia de un error o meta y falta de planeación (Ahonniska et al., 2000). Por otro lado, Welsh et al. (1994) encontraron que el tiempo de demora para el primer movimiento no distinguió a los buenos ejecutantes de los malos, pero los buenos ejecutantes se demoraron más antes del quinto y el noveno movimiento que los peores. Por otro lado, Cohen y Servan-Shreiber (1992) han sugerido que la construcción y el mantenimiento del contexto interno, son partes fundamentales de cualquier tarea de solución de problemas, en la que también es necesario mediar una respuesta conductual apropiada. Lo anterior, con respecto a las Torres de Hanoi, se ha relacionado con un alto número de movimientos ilegales, lo cual representa una falla en retener en mente la instrucción de la tarea, un falla de inhibición o falla en el monitoreo de la conducta.

Por otro lado, recientemente Matute et al. (2008) realizaron un estudio en el que se analizó la ejecución de la 'pirámide de México' (una versión más simple de las Torres de Hanoi) de la evaluación neuropsicológica infantil (ENI) en 239 escolares de México y Colombia de 5 a 16 años de edad, distribuidos en seis grupos con el objetivo de conocer los cambios relacionados con la edad, en una tarea de planificación y organización, los cuales procesos involucrados en las funciones ejecutivas. Los parámetros para su medición fueron los siguientes: el número de diseños correctos, el número de movimientos realizados en los

diseños correctos, el tiempo de ejecución para cada diseño correcto, así como el número de diseños correctos realizados con el mínimo de movimientos y su tiempo de ejecución. Los resultados indicaron un efecto de la edad sobre los parámetros considerados, por ejemplo: en comparación con los otros grupos, los niños de 5 a 6 años tienen una menor cantidad de diseños correctos mientras que los de 5 a 8 años requieren mayor número de movimientos. El tiempo de ejecución mostró un mayor número de diferencias intragrupalas. El análisis realizado reveló que el grado de dificultad se relaciona con la cantidad de movimientos y lo novedoso de las reglas. Además se mostró una tendencia a incrementar el número de diseños correctos y el número de diseños correctos con el mínimo de movimientos, asociados a un aumento en el número total de movimientos, conforme aumenta la edad. De forma general, el tiempo de ejecución es un indicador útil del desarrollo de las funciones de organización y planificación, dado que la rapidez en la ejecución es la que marca diferencias mayores entre los niños. Estos investigadores afirman que existe un desarrollo acelerado de las funciones de planificación y organización durante los primeros años de la etapa escolar, que sigue un curso más lento en la adolescencia. De acuerdo a lo anterior, los resultados de este estudio reflejan un efecto de la edad sobre las cinco medidas de estudio.

Por su parte, Fireman (1996) realizó un estudio en el que participaron 136 niños de edades de 6 y 8 años a los cuales se les aplicó una versión estandarizada de las Torres de Hanoi de tres discos, permitiéndoles 3 minutos máximo para resolverla. Este autor considera que los movimientos de los niños durante la solución del problema de Torres de Hanoi pueden ser clasificados en cuatro tipos de movimientos:

- **ÓPTIMO.**- Movimiento legal que reduce el número de movimientos a la meta.
- **LEGAL NO ÓPTIMO.**- Movimiento legal que no reduce el número de movimientos a la meta.
- **ILEGAL.**- Movimiento que viola alguna de las reglas.
- **ESTACIONARIO.**- Movimiento de un disco y regreso del mismo al mismo poste.

Este autor consideró, de acuerdo a las teorías del desarrollo cognitivo, que hay un interés en los procesos del cambio sistemático en la conducta de solución de problemas, pero que, sin embargo, no existe un acuerdo en si este cambio sistemático es debido a

cambios cualitativos en la organización de la información (Fisher, 1980) o a los incrementos cuantitativos o demandas de procesamiento en el almacenamiento de la información (Klahr, 1989). De acuerdo a la aproximación cuantitativa, se espera que el primer movimiento del niño sea crítico para la solución del problema, que las violaciones de las reglas ocurran sólo al comienzo de los ensayos y afecten de forma negativa el éxito del proceso, que la eficiencia en la ejecución del niño incremente cuando se reduzca la dimensión del problema y se reduzcan las demandas cuantitativas en la memoria de trabajo. Mientras que en aproximación cualitativa u organizacional de transición, se espera que el primer movimiento no necesariamente sea un predictor de éxito, que las violaciones a las reglas ocurran, pero no se relacionarán con la ejecución exitosa eventual del problema, que los ejecutantes realicen numerosos movimientos no óptimos, incluyendo violaciones de reglas, dado que tales errores o perturbaciones son consideradas esenciales para la transición de la habilidad de solucionar problemas y, finalmente, no se espera que el problema de fondo sea de importancia primaria para la ejecución exitosa del problema. Esta perspectiva predice que ocurrirá un incremento en la frecuencia de éxito cuando se logre una subtarea esencial, necesaria para lograr la solución.

Los resultados indicaron que no hubo una relación significativa entre el primer movimiento y el éxito de la solución del problema, hubo ligeramente más movimientos ilegales entre niños ejecutantes exitosos que entre niños no exitosos y los incrementos en la frecuencia de ejecuciones exitosas no estuvieron relacionadas directamente con las configuraciones básicas del problema. Estos resultados sugieren que la solución de problemas en los niños esté más en relación con el desarrollo de estrategias y cambios representacionales que con una selección de estrategias. Tanto los factores cuantitativos como los organizacionales operan durante la solución de problemas, sin embargo los resultados de este estudio sugieren que los factores cuantitativos por si solos no son suficientes para explicar el desarrollo de la solución de problemas. La construcción activa de estrategias por parte de los niños a través del problema y los cambios cuantitativos que son ocasionados debe ser muy importante.

A continuación se presentan de manera breve las funciones ejecutivas que, se ha sugerido, son evaluadas mediante las Torres de Hanoi:

<b>Planeación</b>	Gnys y Willis (1991); Fincham et al. (2002); Mazzoco et al. (1994); Klahr (1978) (preplaneación), Lezak (¿); Cardoso y Parks (1998); Heindel (1989).
<b>Inhibición y flexibilidad cognitiva</b>	Goel y Grafman (1995); Welsh y Huizinga (2001); Miyake et al. (2000). Heindel (1989); Shallice (1982); Krikorian et al. (1994); Heindel (1989).
<b>Conflictos meta-submeta</b>	Goel y Grafman (1995); Klahr (1978); Lezak (¿); Miyake et al. (2000).
<b>Memoria de trabajo</b>	Welsh y Huizinga (2001); Bull et al. (2004) (excepto con un pequeño número de submetas); Goel y Grafman (1995); Handley et al. (2002) (espacial); Ahonniska et al. (2000) (espacial); Welsh et al. (1991) (espacial).
<b>Razonamiento complejo</b>	Simon (1975).
<b>Solución de problemas</b>	Simon (1975); Heindel (1989); León Carrión et al. (2001)
<b>Automonitoreo</b>	Welsh et al. (1994); León-Carrión et al., (2001); Stuss y Benson (1986).

## 2.6 Electroencefalograma (EEG)

La técnica electroencefalográfica (EEG) es un método que registra y amplifica la actividad eléctrica cerebral que proviene de las zonas más próximas a los electrodos colocados en la piel de la superficie craneal (cuero cabelludo). La señal eléctrica que se registra tiene un tamaño muy pequeño por lo que necesita ser amplificada, generalmente por medio de un polígrafo. Se ha descrito que los electrodos de superficie registran principalmente oscilaciones en el flujo de corriente alrededor de las células piramidales corticales que se encuentran dispuestas de forma perpendicular a la superficie de los hemisferios cerebrales. Los potenciales sinápticos excitatorios e inhibitorios que se producen en los cuerpos y dendritas de millares de neuronas crean dipolos entre las zonas superficiales dando lugar a cargas eléctricas y generan un campo eléctrico cuya fuerza resultante se manifiesta en la superficie craneal. Otros factores también contribuyen al origen de las ondas cerebrales que se registran, por ejemplo la actividad eléctrica entre neuronas gliales, fibras de conexión y actividad neuronal de estructuras subcorticales. La señal registrada por el electroencefalograma (EEG) está formada principalmente por potenciales post-sinápticos (Aquino, Aneiros & Rojas, 1999).

En los últimos años, con el desarrollo de la computación, se han podido realizar registros por medio de la computadora y se han digitalizado las señales del EEG con procedimientos modernos que permiten cuantificar la frecuencia y la energía de las diversas ondas eléctricas que componen a un EEG.

La actividad EEG puede ser descrita por la frecuencia y amplitud de las ondas que la componen. La frecuencia es el número de ondas por segundo, su medida son los Hertz (Hz). La amplitud es la energía que tiene cada onda y es medida en microvolts (Aquino et al., 1999).

Uno de las técnicas más frecuentemente utilizadas para analizar el EGG es la Transformada Rápida de Fourier (TRF), con la cual es posible obtener simultáneamente los valores de amplitud de cada uno de los componentes de frecuencia de las señales bioeléctricas.

Otro análisis que se puede hacer con las señales de EEG es la correlación, que es un método estadístico para encontrar posibles relaciones entre variables. Esto con la finalidad de encontrar posibles relaciones funcionales cerebrales ante aspectos cognitivos específicos y conductas motivadas (Guevara & Hernández, 2006).

Se han descrito cinco ritmos fundamentales en el EEG: delta, theta, alfa, beta y gamma. A continuación se mencionan las características de estos ritmos que se observan comúnmente en sujetos normales:

**Ritmo delta ( $\delta$ ):** Frecuencia < 4 Hz.

Descrito por Grey Walter (1936) para designar el EEG con frecuencias menores que las del rango alfa.

Constituye la actividad dominante durante los primeros dos años de vida y es característica del sueño de ondas lentas. Durante el sueño, la corteza cerebral la produce mediante descargas en ráfagas que activan neuronas reticulotalámicas, las cuales inhiben a las neuronas talamocorticales. Estas neuronas, al hiperpolarizarse, producen oscilaciones delta que son transmitidas a la corteza cerebral. Por el contrario, durante la vigilia la corteza activa al tálamo mediante disparos tónicos que despolarizan a las neuronas talamocorticales impidiendo la ocurrencia de delta; el delta de origen talámico es regular y monomórfico. También se ha descrito la existencia de un ritmo más lento que delta, entre 0.1 y 0.8 Hz, que se origina en las células de la corteza, el cual “esculpe el delta talámico”. Quizá sea la causa por la que el delta que se registra en el cuero cabelludo es irregular (polimórfico) (Fernández & González, 2001).

**Ritmo theta ( $\theta$ ):** Frecuencia de 4 a 7.5 Hz.

Descrito por Walter y Dovey (1944).

Se observa fundamentalmente en la infancia y decrece de manera progresiva con la edad. Al parecer, a medida que aumenta el nivel en la escala filogenético (de roedores a primates) es menor la amplitud y la regularidad del ritmo theta. Se conoce como “actividad lenta rítmica” a la actividad theta que se observa en áreas límbicas (cíngulo, hipocampo, amígdala y septum) con una frecuencia de 3 a 10 Hz. Sin embargo se ha propuesto que este ritmo puede tener otro origen, por ejemplo la corteza entorrinal (Fernández & González, 2001).

**Ritmo Alfa ( $\alpha$ ):** Frecuencia de 8 a 13 Hz.

Descrito por Hans Berger (1929).

Se localiza principalmente en los lóbulos occipitales. Generalmente existe un gradiente antero-posterior, de mayor voltaje en regiones posteriores.

El electroencefalograma de la mayoría de los adultos normales en condición de reposo, con los ojos cerrados, exhiben como característica fundamental un predominio de Alfa que “desaparece” con la apertura de los ojos, de allí que se diga que este ritmo es reactivo a esta maniobra.

Es más prominente en regiones posteriores, aunque se puede ver tanto en regiones centrales como en regiones anteriores; se bloquea por estímulos sensoriales, en especial por estimulación visual y auditiva, y durante la actividad mental.

Actualmente se propone que la coherencia de la actividad Alfa corticocortical está influenciada por la actividad de neuronas talámicas (Fernández & González, 2001).

**Ritmo Beta ( $\beta$ ):** Frecuencias entre 13 y 35 Hz.

Descrito por Hans Berger (1929). Cuando el sujeto en vigilia abría los ojos o realizaba tareas mentales, aparecía beta.

Se localiza principalmente en regiones centrales y frontales, aunque también se observa en regiones posteriores.

Corresponde a rápidos potenciales electroencefalográficos que ocurren durante periodos de gran nivel de alertamiento (Fernández & González, 2001).

**Ritmo Gamma ( $\gamma$ ):** Frecuencias entre 30-70 Hertz.

Se localiza en toda la corteza.

Tanto el ritmo de 14 Hz como el de 35 a 45 Hz están acompañados por fluctuaciones de la actividad de las neuronas talámicas ventrobasales y adyacentes. Se ha sugerido una dependencia de las oscilaciones rápidas respecto al sistema dopaminérgico debido a que dichas oscilaciones se suprimen cuando se lesiona el área tegmental ventral. Los orígenes y bases celulares de estos ritmos aún no han sido elucidados (Fernández & González, 2001).

## **2.6.1 Factores que afectan al EEG**

Existen múltiples factores que afectan al EEG; entre ellos edad, sexo, nivel sociocultural, coeficiente intelectual (sólo cuando se comparan sujetos normales con



individuos que padecen retraso mental), fase del periodo menstrual, antecedentes biológicos de riesgo y algunas variaciones circadianas, así como una gran cantidad de fármacos, hormonas y perturbaciones ambientales, condiciones fisiológicas, conductas y procesos cognitivos.

### **2.6.2 Cambios observados en el EEG durante la realización de tareas mentales**

La primera observación de los cambios de la actividad eléctrica cerebral al pasar de una condición de reposo a una condición en la que el sujeto realizaba una tarea mental fue realizada por Hans Berger; éstos consistían en una “desincronización” del EEG, la cual se presentaba como una supresión de la actividad  $\alpha$  y un incremento de la actividad  $\beta$ .

- *Cambios en la actividad delta ( $\delta$ ):* Los cambios en esta banda han sido muy poco estudiados. Sin embargo, el aumento de la actividad  $\delta$  durante la ejecución de una tarea en relación con la condición de reposo constituye un resultado extraordinariamente consistente.

Otra posible explicación del aumento de la actividad  $\delta$  durante la ejecución de tareas mentales que requieren de “concentración interna” fue brindada por Grey Walter en 1959. Este autor consideró que “el incremento del porcentaje de  $\delta$  podría servir como una función limitante que eliminara las influencias (endógenas o exógenas) que no fueran útiles para la realización de la tarea”. Es decir, la actividad  $\delta$  que ocurre durante la realización de tareas es quizá un signo de concentración o atención al procesamiento interno en el que se hace necesaria una inhibición de los estímulos (tanto internos como externos) que son irrelevantes para la ejecución de las mismas. Este hecho está apoyado por el incremento de la actividad  $\delta$  en regiones frontales en individuos que se encuentran en estado de meditación (yoga) (Fernández & González, 2001).

- *Cambios en la actividad theta ( $\theta$ ):* Se ha encontrado un aumento en  $\theta$  en relación con una mayor dificultad de la tarea (generalmente en áreas frontales) o cuando aumenta la demanda de atención. Sin embargo también se ha encontrado una disminución de la actividad en esta banda en regiones posteriores que no ha sido suficientemente discutida (Fernández & González, 2001).

- *Cambios en la actividad alfa ( $\alpha$ ):* A pesar de que se ha relacionado la supresión del  $\alpha$  con la dificultad de la tarea, la emoción, la memoria y la atención, se ha propuesto que el  $\alpha$  sólo se encuentra relacionado con el tipo de demanda a la atención para procesar el estímulo, es decir, sólo se modifica si la atención se enfoca a un estímulo externo o interno (Fernández & González, 2001).
- *Cambios en la actividad beta ( $\beta$ ):* Algunos autores sugieren que la actividad  $\beta$  debe incrementarse en el hemisferio más involucrado en la tarea cognitiva; sin embargo también se ha informado de una disminución en la actividad  $\beta$  durante la realización de tareas. Otros estudios no señalan una tendencia única, sino que refieren aumento en algunas regiones, en general anteriores y disminución en las restantes. Por ejemplo, las tareas de cálculo mental parecen caracterizarse por un incremento de actividad  $\beta$  en regiones frontales y un decremento en regiones posteriores (Fernández & González, 2001).
- *Cambios en la actividad gama ( $\gamma$ ):* Hay autores que consideran la actividad  $\gamma$  como un tipo de actividad  $\beta$ . Esta banda se ha relacionado con la realización de una tarea motora de tiempos de reacción; además se le considera un índice de nivel de alertamiento dirigido en la programación motora y que representa la periodicidad óptima para una transmisión sináptica máxima de los circuitos corticales. La reducción de la actividad  $\gamma$  se ha observado durante la anestesia o durante el sueño de ondas lentas. Sin embargo no se pueden dar conclusiones firmes sobre las relaciones existentes entre este ritmo y ciertos procesos cognitivos específicos, incluso hay informes en los que se descarta la posibilidad de que pueda observarse un pico en el espectro a 40 Hz (Fernández & González, 2001).

### **2.6.3 Modificaciones del EEG a través de la edad**

Aunque el patrón adulto del EEG se alcanza como mínimo a los 10 años y máximo a los 15 años de edad, a lo largo del segundo decenio de vida se produce una progresiva sustitución de la mezcla de ondas lentas de predominio posterior típico de las edades tempranas, por trenes de actividad Alfa (gradualmente más rápidos y largos). Ésta es la principal característica de la maduración electroencefalográfica en este periodo de la vida (Otero, 2001).

Entre los 6 y los 12 años de edad, aún se pueden encontrar (con menos frecuencia a medida que avanza la edad) trenes de ondas lentas y transitorios de ondas afiladas en regiones posteriores. Esta actividad lenta posterior suele ser arrítmica en este rango de edades; consiste en ondas en el rango Theta y Delta, sin ninguna periodicidad, habitualmente entremezcladas con la actividad Alfa predominante o bien con una que se sobre impone a las ondas lentas (Otero, 2001).

En un estudio realizado por Anokhin, Lutzenberger & Birbaumer (1999), investigaron las relaciones entre la dinámica global de la actividad eléctrica cerebral y la inteligencia en 37 sujetos sanos (17 hombres y 20 mujeres) de 13.7 años de edad. Se les presentaron dos tareas cognitivas visuales, verbales (grupos semánticos) y espaciales (rotación mental). Además se les administró la prueba de Estructura de Inteligencia (IST). En todas las pruebas anteriores se les registró EEG.

En la ejecución de habilidades cognitivas, la coherencia más consistente se presentó entre las áreas frontales con las áreas parieto-occipitales en el ritmo theta. Este hallazgo es consistente con el rol del ritmo theta en las conductas que han sugerido estudios previos. Los resultados sugieren que el orden del caos en las tareas relacionadas con la dinámica cerebral puede ser uno de los factores biológicos determinantes en las diferencias individuales en las habilidades cognitivas en los adolescentes. El registro de coherencia de EEG durante tareas mentales parece ser útil para el estudio del desarrollo cognitivo normal y anormal.

Por otro lado, Barry et al. (2004) consideran que, de los 4 a los 6 años de edad, hay un crecimiento acelerado de proliferación y poda sináptica que involucra principalmente incrementos en la coherencia de regiones frontales y acoplamiento fronto-occipital izquierdo. De los 8 a los 10 años, otra aceleración involucra conexiones fronto-temporales en el hemisferio derecho. Además ocurre aceleración de los 11 a los 14 años de edad y de los 15 años a la adultez, siendo interpretados como el reflejo de la secuencia del desarrollo de diferentes sistemas anatómicos.

#### **2.6.4 Correlación**

La correlación es una medida de la semejanza de morfología y polaridad entre los puntos que conforman dos señales simultáneas de diferentes zonas cerebrales, sin tomar en cuenta

la amplitud. Una correlación de 1 indica la máxima correlación positiva, de 0 la mínima y -1 la máxima negativa.

Un alto grado de correlación o de coherencia indica una relación lineal alta entre la actividad eléctrica de las dos regiones analizadas, debido a la semejanza morfológica, a la fase y al acoplamiento temporal y por tanto a la sincronía de la actividad que pudiera existir entre ellas; lo que a su vez indica un estado funcional semejante, el cual puede ser consecuencia de una organización parecida entre las redes neuronales, e interconexiones entre ellas, actuando simultáneamente. Estos análisis, por tanto, permiten conocer el grado de diferenciación funcional entre las regiones analizadas (Guevara & Hernández, 2006).

### **2.6.5 Coherencia**

Nuwer (1992) define a la coherencia como la tendencia de señales, tal como la del EEG, de aumentar y de caer en sincronía. Esta es calculada generalmente para cada banda específica de frecuencias del EEG. La coherencia es usualmente medida entre dos canales.

La coherencia es aún, principalmente, una herramienta de investigación. Desde un punto de vista práctico, la coherencia puede interpretarse como una forma de medir cuan semejantes son dos señales.

### **2.6.6 Estudios sobre correlación electroencefalográfica, efectos de la edad y actividad mental**

Thatcher, Krause & Hrybyk (1986) realizaron un estudio en donde analizaron el EEG de 189 niños usando dos métodos diferentes: 1) comparaciones de la coherencia como función de la separación para diferentes bandas de frecuencia y 2) análisis de regresión multivariada y bivariada en la cual la contribución relativa debido a conexiones axonales locales fue minimizada. Las cuestiones de interés particular fueron: 1) ¿cuánto varía la magnitud de la coherencia con la separación espacial? 2) ¿hay diferencias en la magnitud de la coherencia dentro del hemisferio izquierdo en comparación con el hemisferio derecho? 3) ¿en qué extensión las medidas espaciales de coherencia no son homogéneas?; 4) ¿cuánto varía la magnitud de la coherencia como función de la frecuencia del EEG? y 5) ¿hay patrones de acoplamiento entre regiones específicas de los electrodos? Con respecto a lo anterior

Beaumont y Rugg (1979) argumentan que la coherencia ofrece ventajas sobre los datos de potencia, en virtud de que la coherencia es menos dependiente de los sitios de referencia de los electrodos. Otra ventaja de la coherencia es su dependencia de las propiedades espaciales de una red, en virtud de que tanto el acoplamiento a distancia como local entre generadores neurales se reflejará en la coherencia. Este estudio consideró ciertas relaciones anatómicas críticas. Por ejemplo, los análisis estadísticos realizados por Sholl (1956), Krieg (1963), Braitenberg (1974, 1978) y Szentfigothai (1978) estiman que no más de 1% de las fibras que entran a la corteza cerebral surgen del tálamo y aproximadamente 2-4% de las fibras que entran a un hemisferio se originan del hemisferio contralateral (Nuñez, 1981). Estos análisis indican que la mayoría de las fibras (aproximadamente el 95%) que entran a la materia gris de la corteza surgen del mismo hemisferio y que, en general, las entradas de una región de la corteza son las salidas de algunas otras regiones. Mientras las conexiones “intercolumnares” inhibitorias y excitatorias son de rango corto, teniendo un promedio de longitud de menos de 1 mm (Braitenberg, 1978; Szentfigothai, 1978), el promedio de la longitud de asociaciones de las fibras cortico-corticales se estima que son de varios centímetros (Braitenberg, 1978; Nunez, 1981) y se cree que esas fibras son exclusivamente excitatorias (Szentfigothai, 1978). Estos estimados enfatizan la necesidad de incorporar las asociaciones de sistemas de largo rango cortico-corticales de algún modelo, el cual intenta predecir la totalidad de los fenómenos corticales del EEG. Los resultados de este estudio fueron los siguientes: se observó una falta de homogeneidad significativa, presentándose la mayor coherencia en la dirección anterior-posterior comparada con la dirección posterior-anterior. La mayor coherencia se presentó también entre las derivaciones frontales comparada con las derivaciones posteriores y en el hemisferio derecho en comparación con el hemisferio izquierdo. Estos datos indican que estuvieron presentes al menos dos fuentes separadas de coherencia de EEG 1) la coherencia producida a través de la acción de conexiones axonales de longitud corta, y 2) la coherencia producida a través de la acción de conexiones de distancia larga. Las medidas de la fase de retardo como una función de la distancia interelectrodos permitió el desarrollo de un modelo de “dos compartimentos” de coherencia de EEG en el cual las diferentes características de la coherencia son producidos por diferentes longitudes de los sistemas de las fibras: cortas y largas. Lo anterior permite desarrollar un número de hipótesis basadas en este modelo para explicar las diferencias

entre la conectividad de los hemisferios izquierdo y derecho y de la corteza frontal versus occipital (Thatcher, Krause & Hrybyk, 1986).

Por otro lado, Carrillo-de-la-Peña y García-Larreab (2007) realizaron un estudio cuyo objetivo era investigar los cambios en la Coherencia relacionada a eventos (ERCoh) asociada a la buena o mala resolución de la prueba de Clasificación de Cartas Wisconsin (WCST). Para esto registraron potenciales en un grupo de 30 estudiantes universitarios (entre 18 y 23 años, 21 mujeres y 9 hombres) mientras ejecutaban una versión computarizada de la prueba WCST. Se calculó la coherencia relacionada a eventos para las áreas frontal y parietal en dos momentos específicos: inmediatamente antes de la respuesta y después de las claves de retroalimentación. Estos investigadores encontraron que los malos ejecutantes presentaron una baja coherencia relacionada a eventos de manera significativa en la región frontal derecha (en las bandas alfa, beta1 y beta2), mientras que en la región parietal no hubo diferencias consistentes por grupo. Además, la consistencia del acoplamiento funcional entre los electrodos mediales frontales y frontales derechos fue un buen predictor de los parámetros conductuales de la ejecución del WCST, tal como el porcentaje de errores perseverativos del número de categorías logradas. Estos investigadores sugieren que la corteza prefrontal derecha está involucrada específicamente en las funciones ejecutivas, tal como la planeación y la reflexión, relacionadas con la ejecución del WCST. Además, estos investigadores consideran que los valores de coherencia frontal, pero no los posteriores, se correlacionan con funciones frontales tales como la habilidad para cambiar una respuesta e inhibir la perseveración. Además, los índices de la coherencia frontal parecen discriminar entre buenos y malos ejecutantes del WCST en este grupo.

Sarnthein, Petsche, Rappelsberger, Shaw, & Von Stein (1998) realizaron otro estudio en el que se registró el EEG en 6 voluntarias femeninas normales, de 28 años de edad aproximadamente, a través del sistema internacional 10-20 con 19 electrodos. El experimento consistió de dos tareas, una cuyos estímulos eran grupos de letras que después de la presentación de los mismos, éstos se tenían que reproducir en papel y lápiz y otra en la que el estímulo fueron dibujos con líneas abstractas, las cuales también se tenían que reproducir, lo que activaba la memoria de trabajo visoespacial. Aunque no hubo estimulación auditiva en ninguna de las tareas, en la tarea 1 los sujetos reportaron un

cambio en los caracteres presentados visualmente a equivalentes fonológicos, los repetían subvocalmente durante el intervalo de retención y de esta manera accedían al sistema de memoria verbal. Los resultados más notables fueron los patrones del incremento de la coherencia durante la percepción e intervalos de retención en el rango de 4-7 Hz (ritmo theta). Tanto en la retención de los grupos de caracteres de la tarea 1 como en la retención de líneas abstractas, aumentó la coherencia entre los electrodos de la corteza de asociación posterior y prefrontal. Esta reproducción de la coherencia apoyó la hipótesis central de esta investigación, en la que se postuló que tal coherencia está relacionada a los procesos de memoria de trabajo. Los patrones de perfeccionamiento de la coherencia fueron específicos en los intervalos de retención. Entre todos los rangos de frecuencias, sólo los patrones de 4-7 Hz (theta) distinguieron la percepción de la retención y fueron similares entre ambas tareas de memoria.

Por otro lado, Marosi et al. (1992) realizaron una investigación en la que estudiaron el efecto de la edad sobre la coherencia en 98 niños controles de edad escolar y 54 niños con problemas de aprendizaje (de entre 6 y 16 años de edad). Se registró el EEG con 15 electrodos en descanso y con los ojos cerrados y se calcularon 105 combinaciones para la coherencia, considerándose las bandas delta, theta, alfa y beta. Se observó un incremento significativo de coherencia relacionado al incremento de la edad en ambos grupos. En el grupo control, se encontró un incremento significativo en las coherencias entre las regiones posteriores, temporales y el vertex, especialmente en las bandas delta y alfa. Se observó un decremento significativo con la edad en la coherencia entre las áreas frontales, especialmente en la banda theta. El grupo de niños con problemas de aprendizaje mostró un patrón diferente: no hubo relación significativa con la edad en la coherencia entre la parte anterior y el vertex. Se observó un alto efecto de la edad en la coherencia entre las regiones temporal con una predominancia del hemisferio izquierdo en comparación con el contralateral y el ipsilateral. No se encontró decremento en la coherencia frontal: en la misma región donde el grupo control mostraron valores negativos con la edad, el grupo con problemas de aprendizaje no tuvo efectos con la edad. Estos investigadores sugieren que los resultados obtenidos indican diferencias en la organización cerebral, en la mielinogénesis y sinaptogénesis en el grupo control con respecto al grupo con problemas de aprendizaje.

Por su parte, Mizuhara, Wang, Kobayashi & Yamaguchi (2007) realizaron una investigación en la que participaron 8 sujetos masculinos de edades entre 21 y 35 años. Se utilizaron dos técnicas: EEG y resonancia magnética funcional (fMRI). El experimento consistió de dos condiciones, una en descanso con ojos cerrados y otra ejecutando una tarea mental aritmética con los ojos cerrados. Cada condición tuvo 5 estados con 30 segundos de duración. Tanto la condición de descanso como la tarea aritmética fueron presentadas alternadamente a los sujetos 5 veces en cada ensayo. Durante el estado de la tarea aritmética, se les pidió a los sujetos continuamente sustraer un dígito singular constante del número 1000 con los ojos cerrados. Este dígito singular fue elegido al azar y presentado por voz al sujeto al comienzo de cada estado aritmético. Se daba un sonido al comienzo de cada estado de descanso para indicar el final del estado aritmético. Se examinaron dos ensayos para cada sujeto. Los resultados de este estudio indicaron que la potencia de theta en la línea media frontal durante la condición aritmética fue significativamente mayor que durante la condición de descanso. Los resultados indican incrementos significativos de flujo sanguíneo en las regiones distribuidas, incluyendo las cortezas parietal y prefrontal lateral relativos a los de la condición de descanso. Además, se encontraron decrementos de flujo sanguíneo durante la tarea aritmética mental también en varias zonas de la corteza, incluyendo las cortezas medial frontal y temporal. Asociado con la fase de sincronización entre los sitios frontal derecho y parietal izquierdo, la corteza prefrontal dorsolateral derecha e izquierda mostró respuestas significativas. Además, los análisis de correlación de las señales de flujo sanguíneo en esas regiones mostraron que la conectividad de señales sanguíneas en el giro occipital superior a los de la corteza prefrontal dorsolateral derecha incrementó significativamente durante la tarea aritmética mental en relación al estado de descanso. Lo anterior fue análogo a la de la sincronización de la fase theta del EEG. Por otro lado, la fase de sincronización theta se encontró en las regiones corticales responsables de la función ejecutiva más que aquellas responsables del control atencional. Estos resultados, aunados a estudios previos, sugieren que la fase de sincronización theta está comprometida con la función ejecutiva mientras que, por ejemplo, la fase de sincronización beta lo estaría más con el control atencional (Gross et al., 2004; Mizuhara et al., 2005).



### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente existen numerosas investigaciones relacionadas tanto con el estudio de la evolución filogenética del cerebro como con el desarrollo ontogenético del mismo. Desde este último punto, recientes estudios, principalmente *post mortem* y de imagenología cerebral, han mostrado patrones de maduración cerebral, tales como incrementos en la mielinización, así como cambios morfológicos específicos durante la infancia, adolescencia y adultez temprana. Asimismo, se han encontrado patrones electroencefalográficos propios de cada edad mencionada. Por otro lado, también existen estudios que se han enfocado a determinar las características cognitivas y conductuales específicas en diferentes edades, con el fin de definir parámetros cognitivos característicos de cada etapa de la vida. Actualmente, se cuenta con una gran cantidad de estudios que apoyan la afirmación de que los más altos procesos cognitivos, incluyendo el término “funciones ejecutivas”, dependen en gran medida del funcionamiento adecuado de la corteza prefrontal y su conexión con zonas posteriores (como la corteza parietal en el caso de actividades visoespaciales y de cálculo) y que tales funciones siguen un proceso de desarrollo y maduración a través de la edad.

Numerosos estudios han utilizado diferentes pruebas dirigidas a medir estas funciones ejecutivas, tal es el caso de las Torres de Hanoi, la cual es una prueba de organización y programación visoespacial que requiere, fundamentalmente, tareas comúnmente relacionadas con las funciones ejecutivas, tales como planeación, memoria de trabajo e inhibición. Esta prueba ha sido estudiada, principalmente, bajo parámetros conductuales, realizándose muy pocas investigaciones que incluyan la relación de esta tarea con la actividad cerebral; las existentes han utilizado técnicas de imagenología funcional. Debido a lo anterior y a la importancia, tanto a nivel clínico como de investigación, de conocer la relación de la funcionalidad cerebral con las actividades cognitivas y su desarrollo ontogénico, el objetivo del presente estudio es caracterizar, a través del electroencefalograma, el grado de acoplamiento funcional o correlación prefrontal y parietal durante la ejecución de Torres de Hanoi, y determinar si el grado de acoplamiento difiere en relación a la edad de sujetos masculinos niños, adolescentes y adultos jóvenes.

## **4. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la correlación electroencefalográfica prefrontal y parietal durante la ejecución de Torres de Hanoi en relación a la edad, en niños, adolescentes y adultos jóvenes de sexo masculino.

### **4.1 Objetivos específicos**

- Establecer la relación entre la ejecución de Torres de Hanoi y la edad de los sujetos.
- Caracterizar la correlación interhemisférica entre la funcionalidad prefrontal y parietal durante la ejecución de Torres de Hanoi y la edad de los sujetos.
- Caracterizar la correlación intrahemisférica entre la funcionalidad prefronto-parietal durante la ejecución de Torres de Hanoi y la edad de los sujetos.

## **5. HIPÓTESIS**

La correlación electroencefalográfica interhemisférica prefrontal y parietal e intrahemisférica prefronto-parietal de las áreas prefrontales y parietales durante la ejecución de Torres de Hanoi será diferente en niños, adolescentes y adultos jóvenes de sexo masculino.

### **5.1 Hipótesis específicas**

- La ejecución de Torres de Hanoi dependerá de la edad de los sujetos. A menor edad, menor latencia de inicio de la tarea y mayor número de errores.
- La correlación interhemisférica en las áreas prefrontales y parietales, durante la ejecución de Torres de Hanoi dependerá de la edad de los sujetos. A mayor edad, menor correlación interhemisférica.

- La correlación intrahemisférica prefrontoparietal durante la ejecución de Torres de Hanoi dependerá de la edad de los sujetos. A mayor edad mayor correlación intrahemisférica.

## **6. VARIABLES**

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Edad de los sujetos participantes: 11-13, 18-20 y 26-30 años de edad.
- Condiciones de registro: Basal y Hanoi.

VARIABLES DEPENDIENTES:

- Resultados de la aplicación de Torres de Hanoi: latencia de inicio, total de movimientos, movimientos correctos y tarea completa e incompleta.
- Correlación electroencefalográfica inter e intrahemisférica en las tres poblaciones.

## **7. MÉTODO**

PARTICIPANTES:

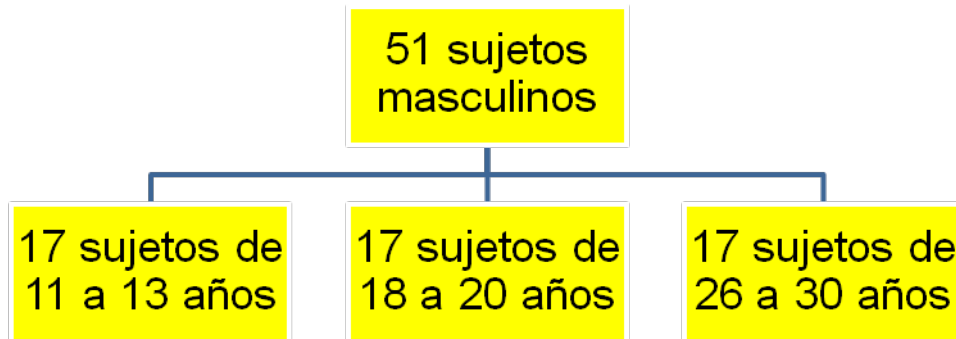
Participaron 51 sujetos masculinos diestros, sanos, sin tratamiento médico, sin antecedentes de daño cerebral, problemas de aprendizaje, desórdenes psiquiátricos, ni enfermedades crónicas, divididos en 3 grupos:

- Grupo 1: (Niños)  
17 sujetos masculinos estudiantes, de edades entre 11 años más un día a 13 años menos 1 día.
- Grupo 2: (Adolescentes)

17 sujetos masculinos estudiantes universitarios, de edades entre 18 años más un día a 20 años menos un día.

- Grupo 3: (Adultos jóvenes)

17 sujetos masculinos estudiantes universitarios o profesionistas, de edades entre 26 años más un día a 30 años menos un día (ver diagrama 1).



**Diagrama 1.-** Número de sujetos y rangos de edad de los grupos experimentales que conforman el estudio.

## 7.1 Procedimiento

Se realizó una entrevista a los maestros y padres de familia en el caso de los niños de edades entre 11 y 13 años, y para los participantes de 18-20 años y 26-30 se les entrevistó directamente. Dicha entrevista se llevó a cabo con el objetivo de que tales participantes realmente cumplieran con los criterios de inclusión y estuvieran perfectamente enterados del proceso del experimento y aceptaran de forma voluntaria participar en el mismo.

Se aplicó una prueba de atención perteneciente a la Evaluación Neuropsicológica Infantil (ENI) (Matute, Roselli, Ardila & Ostrosky-Solís, 2007) a los sujetos de 11 a 13 años de edad y la Evaluación Neuropsicológica Breve en Español para adultos (NEUROPSI) (Ostrosky, Ardila & Roselli, 1997) a los sujetos de 18 a 20 y de 26 a 30 años de edad con el fin de descartar problemas de atención que pudieran afectar la realización de la prueba Torres de Hanoi.

### **7.1.1 Instrucciones previas al experimento**

Previamente a la sesión experimental, se les pidió a los sujetos abstenerse por 12 horas de bebidas que contuvieran cafeína (incluyendo refrescos que la contengan), alcohol o alimentos con mucha cantidad de azúcar.

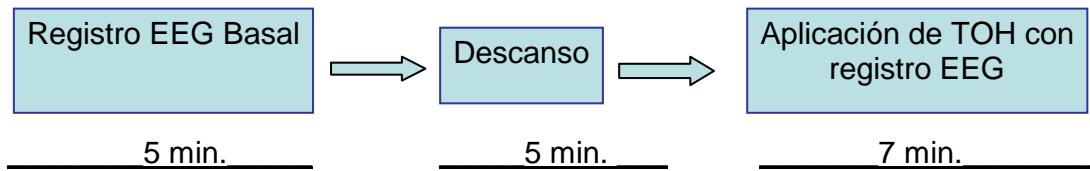
Además, se estandarizó que el día del registro todos los sujetos hicieran un desayuno ligero que no contuviera demasiados azúcares ni grasas. Así mismo, para los participantes que acudieron en horario vespertino se les pidió que comieran algo ligero antes del experimento.

Cada uno de los sujetos fue citado a una sesión experimental, la cual se realizó entre las 10:00 y 11:00 A. M. o por la tarde entre las 3 y 6 P. M. Los registros matutinos y vespertinos se realizaron de forma contrabalanceada y consistieron en lo siguiente:

Se les dio la bienvenida a los participantes y se les explicó en que consistiría el experimento, se les mostraron las instalaciones, el equipo a utilizar y se les dió una breve explicación del mismo, se les colocaron los electrodos correspondientes, revisando la impedancia (menor a 10 kohms). Luego pasaron a un cuarto de registro aislado, se sentaron cómodamente, con ojos abiertos y permanecieron solos en dicho lugar con la puerta cerrada durante el registro electroencefalográfico (el experimentador permaneció afuera del cuarto observando el registro electroencefalográfico en la computadora correspondiente).

Se comenzó registrando cinco minutos de EEG previos a la aplicación de Torres de Hanoi como línea base, en la cual, se les indicó permanecer con los ojos abiertos mirando a un punto fijo al frente, no moverse y parpadear lo menos posible. Después se les permitieron cinco minutos de descanso (en ese momento se abrió la puerta para que se relajaran). Posteriormente se procedió con la aplicación de Torres de Hanoi en una versión computarizada en donde también se les pidió no moverse y parpadear lo menos posible. Las instrucciones aparecían de manera escrita en la computadora antes de iniciar la tarea, pero el experimentador se aseguró de que hubieran quedado claras antes de iniciarla y se les dijo que la misma computadora indicaría cuando hubieran finalizado. La duración de la tarea Torres de Hanoi fue de 7 minutos como máximo (en los casos en que los sujetos concluyeron antes del tiempo predeterminado, en ese momento se terminaba el registro) (ver diagrama 2). Al terminar la tarea se abrió nuevamente la puerta del cuarto, preguntando al sujeto cómo se sintió, si tuvo dudas al momento de realizarla y se le dieron

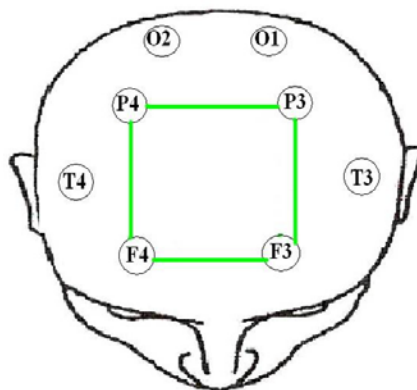
las aclaraciones a las dudas que surgieron sobre el registro en general. Se le quitaron los electrodos y se les dieron las gracias por haber participado.



**Diagrama 2.** Pasos secuenciales de la sesión de registro de EEG durante la ejecución de la tarea de Torres de Hanoi.

## 7.2 Registro Electroencefalográfico

El EEG fue registrado en las derivaciones: F3, F4 y P3, P4, de acuerdo con el Sistema Internacional 10-20 de colocación de electrodos (Jasper 1958), con orejas cortocircuitadas como referencia, por medio de un polígrafo Grass modelo P7 (filtros de 1 a 30 Hz) (ver figura 10). Los electrodos que se utilizaron fueron tipo platillo con recubrimiento de chapa de oro. La impedancia de los electrodos fue menor de 10 Kohms. Las muestras tomadas fueron de 1024 puntos a una frecuencia de muestreo de 512 Hz. Se revisó el EEG fuera de línea para eliminar segmentos contaminados y posteriormente, se obtuvieron los valores normalizados de la Correlación Interhemisférica ( $r_{TER}$ ) y la Correlación Intrahemisférica ( $r_{TRA}$ ).

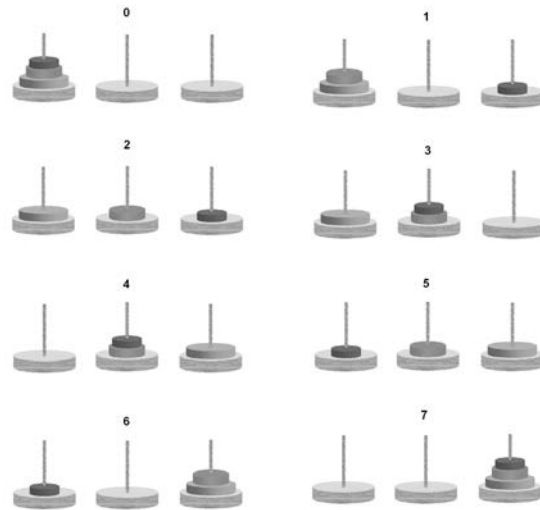


**Figura 10.** Sistema Internacional 10-20 de colocación de electrodos. Se muestran las derivaciones F3, F4, P3 y P4 consideradas en este estudio (Jasper, 1958).

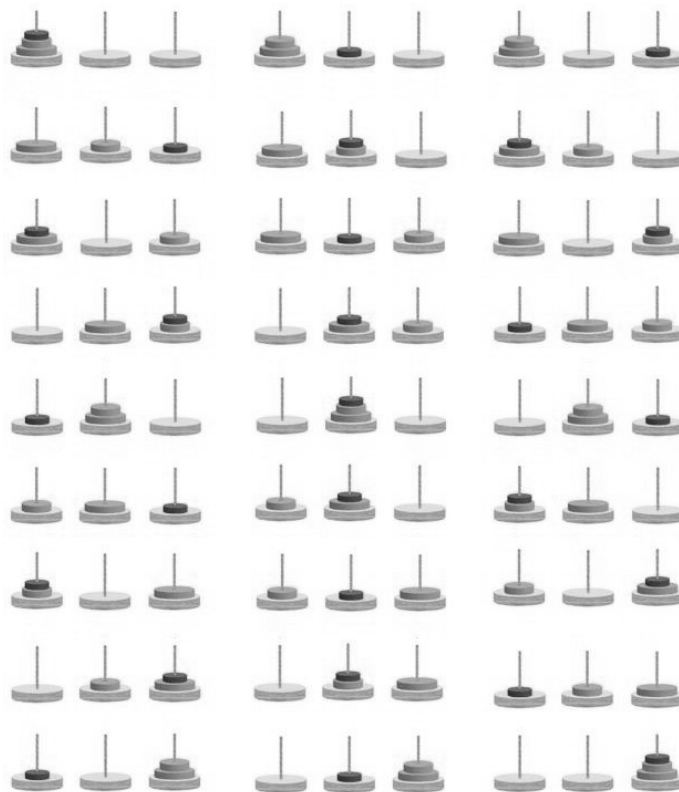
### **7.3 Aplicación de la prueba Torres de Hanoi**

De manera general, esta prueba consiste en lo siguiente: se tienen tres torres, en una de ellas hay  $n$  discos de diferentes tamaños, organizados por tamaño, de manera que el mayor está debajo de los demás y así sucesivamente. El problema consiste en mover todos los discos a otra torre, pero con la condición de mover sólo uno cada vez, los discos siempre tienen que estar en una de las torres y nunca se puede colocar un disco mayor sobre uno menor.

La versión computarizada que se utilizó en este experimento requiere de una computadora y un miniteclado que se le conecta a través de un puerto USB, el cual tiene 9 teclas: una fila de 3 teclas rojas, otra fila de 3 teclas verdes y otra de 3 teclas azules, las cuales corresponden a los colores de los 3 discos que se utilizan en la tarea, las posiciones de las teclas corresponden a las tres torres de la prueba; pero se añadió una regla más: durante el movimiento de los discos no está permitido saltar postes intermedios (en esta versión los postes están acomodados en línea recta), es decir, el movimiento de un disco debe ser de un poste al poste contiguo (la computadora va marcando los errores de ejecución), por lo tanto el número mínimo de movimientos que se requieren para realizar la tarea es de 26, mientras que en la versión clásica el número mínimo de movimientos para realizar la prueba con tres discos es de 7 (Figuras 11 y 12).



**Figura 11.** De izquierda a derecha, y de arriba a abajo, se presentan los 7 mínimos movimientos requeridos, en la versión original del juego, para llevar a cabo exitosamente la tarea. Los números encima de cada figura indican el número del movimiento.



**Figura 12.** De izquierda a derecha, y de arriba a abajo, se ilustra el mínimo de movimientos (26) que se necesitan, para terminar eficientemente la tarea, en la versión HANOI de Torres de Hanoi (pasar los 3 discos del poste 1 al poste 3, pero cada disco puede únicamente ser movido a postes aledaños).



#### **7.4 Parámetros a medir en la prueba Torres de Hanoi**

- Latencia del primer movimiento
- Número de movimientos
- Movimientos correctos
- Tarea completa e incompleta

## 8. ANALISIS ESTADISTICO

Para analizar los parámetros de la ejecución de las Torres de Hanoi se realizó un análisis de varianza (ANDEVA), de un factor (tres grupos), seguido de un análisis post hoc utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.01 ( $p \leq 0.01$ ). Además se realizó un análisis no paramétrico ( $\chi^2$ ) de tipo nominal para el parámetro: ejecución completa e incompleta de la tarea.

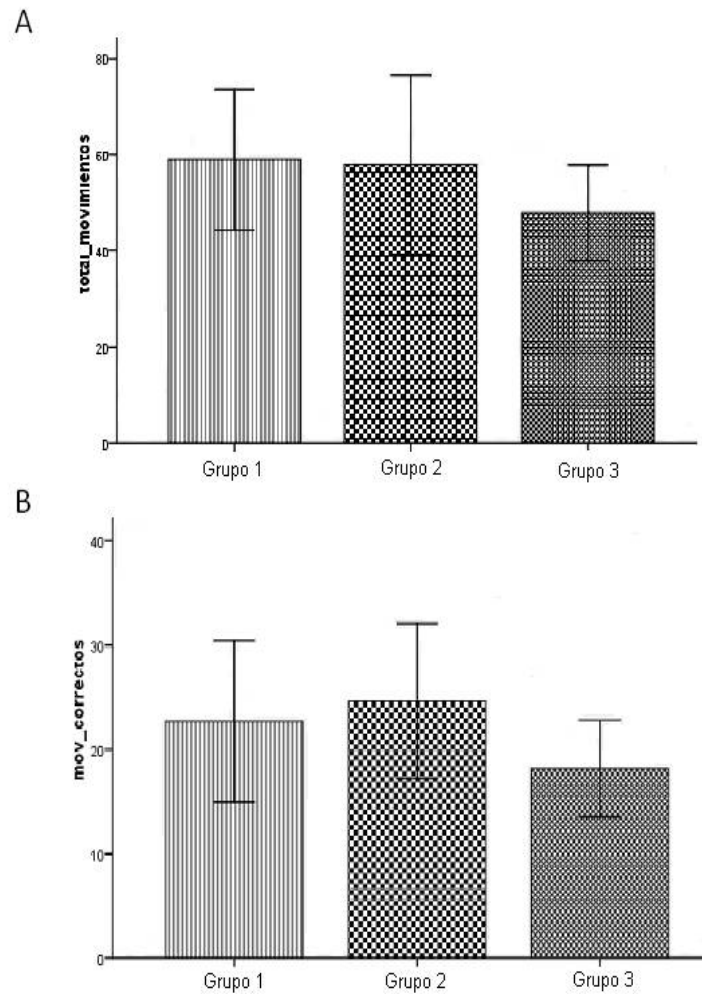
Con respecto al análisis cuantitativo de los datos del registro electroencefalográfico, se realizó un ANDEVA mixto de dos factores ( $3 \times 2$ ), grupos por condiciones, para cada parámetro de correlación ( $r$ ) obtenida con el EEG y en cada banda de EEG para cada par de derivaciones; es decir, se hizo un ANDEVA por la correlación interhemisférica (F3-F4 y P3-P4) por cada banda. Además se hizo una serie de análisis igual para cada correlación intrahemisférica (F3-P3, F4-P4) por cada banda. Se aplicó, además, un análisis post hoc utilizando la prueba de Tukey con un nivel de significancia de 0.01 ( $p \leq 0.01$ ). Todos los valores de correlación se transformaron a valores Z de Fisher. Las bandas EEG consideradas para el análisis fueron: delta (de 1 a 3.5 Hz), theta (de 4 a 7.5 Hz), alfa1 (de 8 a 10.5 Hz.), alfa2 (de 11 a 13.5 Hz), beta1 (de 14 a 19.5 Hz) y beta2 (de 20 a 30Hz).

## **9. RESULTADOS**

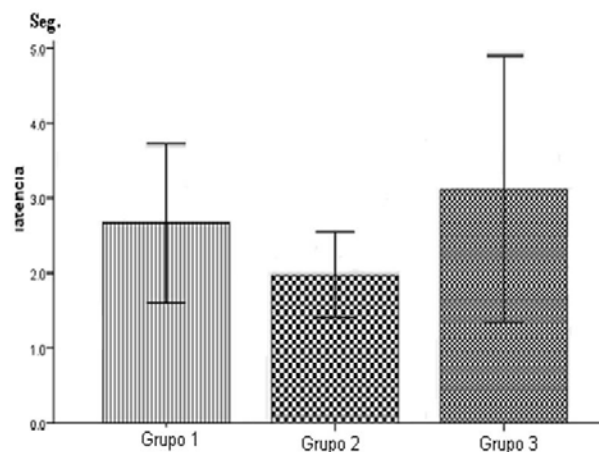
### **9.1 Resultados de la ejecución de Torres de Hanoi**

Se realizó un ANDEVA con los tres grupos considerados (grupo 1: de 11 a 13 años, grupo 2: de 18 a 20 años y grupo 3: de 26 a 30 años de edad) para cada uno de los parámetros de la ejecución de Torres de Hanoi. El análisis mencionado no detectó diferencias significativas en el total de movimientos ni en movimientos correctos (Figura 10 A y B) y tampoco en la latencia de inicio entre los tres grupos (Figura 11).

Es importante mencionar que el tiempo de ejecución de la prueba de Torres de Hanoi considerado para el análisis fue homogeneizado a un periodo de 3 minutos, por lo que aquellos sujetos que terminaron antes de este tiempo no se incluyeron en el análisis de estos parámetros. Esta decisión fue tomada con objeto de sólo considerar a los sujetos que no resolvieron la tarea demasiado rápido, ya que, de acuerdo a lo observado en el transcurso del experimento 3 minutos fue un tiempo idóneo para la evaluación de los parámetros correspondientes, así como el tiempo suficiente para equipararlo con el registro de EEG.



**Figura 10.** Media  $\pm$  2 errores estándar del total de movimientos (A) y del número de movimientos correctos (B) ejecutados por los sujetos de los diferentes grupos durante 3 minutos de ejecución de Torres de Hanoi. No hubo diferencias entre grupos.



**Figura 11.** Media +/- 2 errores estándar de la latencia de inicio del primer movimiento en segundos (seg.), presentados por los sujetos de los diferentes grupos durante 3 minutos de ejecución de las Torres de Hanoi. No hubo diferencias entre grupos.

En el parámetro de tarea completa e incompleta, aplicando  $\chi^2$ , se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.011$ ), siendo considerablemente mayor el número de sujetos del grupo 1 (11-13 años) que no terminaron la tarea con respecto a los que si la terminaron en el tiempo límite considerado en este estudio (máximo 7 minutos). Por el contrario, tanto en el grupo 2 como en el grupo 3 fue considerablemente mayor el número de sujetos que terminaron la tarea con respecto a los que no la terminaron (tabla 1).

<b>Grupo</b>	<b>Tarea completa</b>	<b>Tarea incompleta</b>
Grupo 1 (n=17)	4	13
Grupo 2 (n=17)	11	6
Grupo 3 (n=17)	12	5

**Tabla 1.-** Número de sujetos que terminaron y no terminaron la tarea en cada uno de los grupos.

## **9.2 Resultados EEG: comparación entre grupos y entre condiciones.**

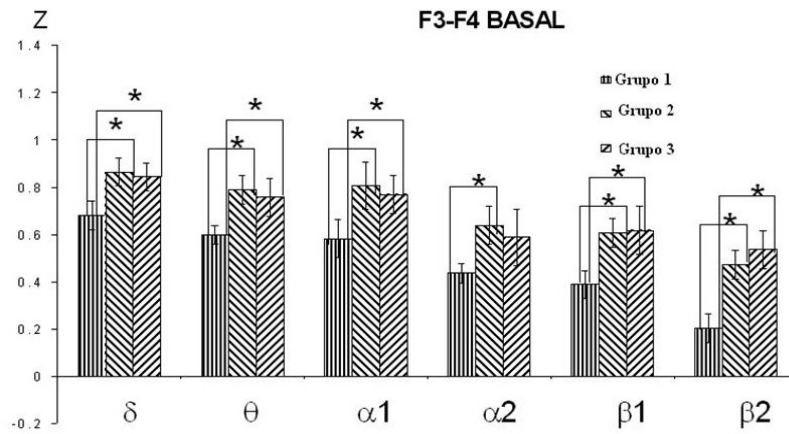
### **9.2.1 Resultados EEG de la comparación entre grupos**

En todos los análisis EEG estadísticos realizados en los tres grupos estudiados, se consideró la interacción condiciones (basal y Hanoi) x derivaciones (F3, F4, P3, P4) en las diferentes bandas delta, theta, alfa1, alfa2, beta1 y beta2.

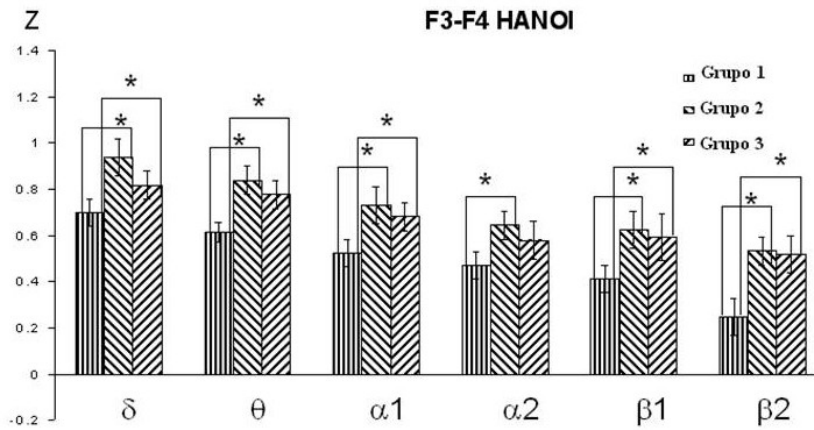
En la correlación interhemisférica frontal (F3-F4) durante la condición basal de los tres grupos, se encontraron diferencias significativas ( $p \leq 0.01$ ) en todas las bandas entre el grupo 1 con respecto al grupo 2 y 3, siendo mayor la correlación interhemisférica prefrontal en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1, excepto para la banda alfa2 que presentó una mayor correlación sólo el grupo 2 con respecto al grupo 1 (Figura 13A).

En la condición Hanoi, se observaron diferencias significativas en todas las bandas entre el grupo 1 con respecto al grupo 2 y al grupo 3, excepto, como en el caso anterior, para la banda alfa2 que mostró una mayor correlación sólo el grupo con respecto al grupo 1 (Fig. 13 B).

A



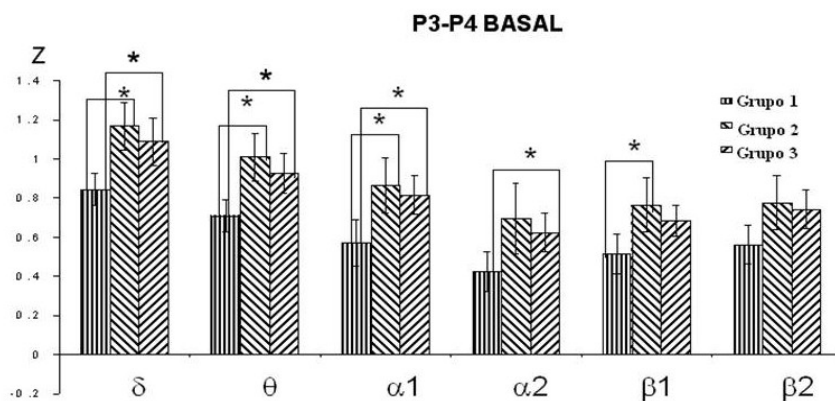
B



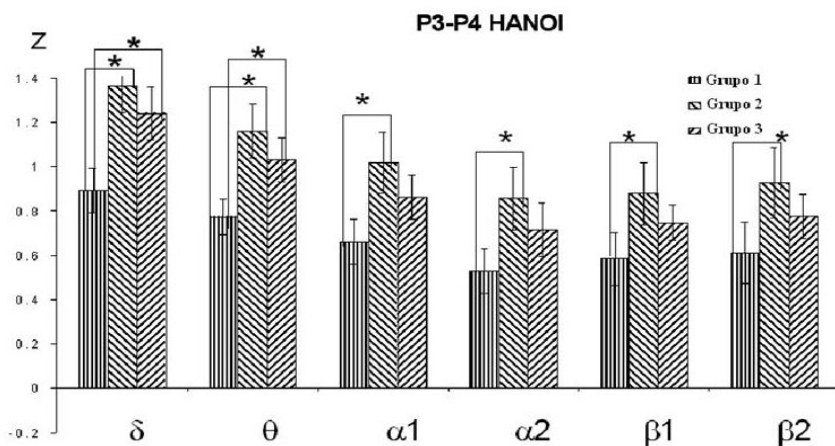
**Figura 13.** Media  $\pm$  2 errores estándar de la correlación interhemisférica frontal (F3-F4) en las diferentes bandas de EEG durante la condición basal (A) y durante la condición Hanoi (B) de los diferentes grupos.  $p \leq 0.01$  significativamente mayor respecto al grupo 1.

En la correlación interhemisférica parietal (P3-P4) en la condición basal, se encontró que en los grupos 2 y 3 la correlación interhemisférica en las bandas delta, theta y alfa1 fue mayor con respecto al grupo 1; en alfa2 fue mayor la correlación en el grupo 3 respecto al grupo 1 y en beta1 fue mayor la correlación en el grupo 2 respecto al grupo 1 (Figura 13A); en la condición Hanoi se observaron diferencias significativas en las bandas delta y theta presentándose una mayor correlación en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1 y en las bandas alfa1, alfa2, beta1 y beta2 presentando mayor correlación el grupo 2 con respecto al grupo 1 (Figura 14B).

A



B

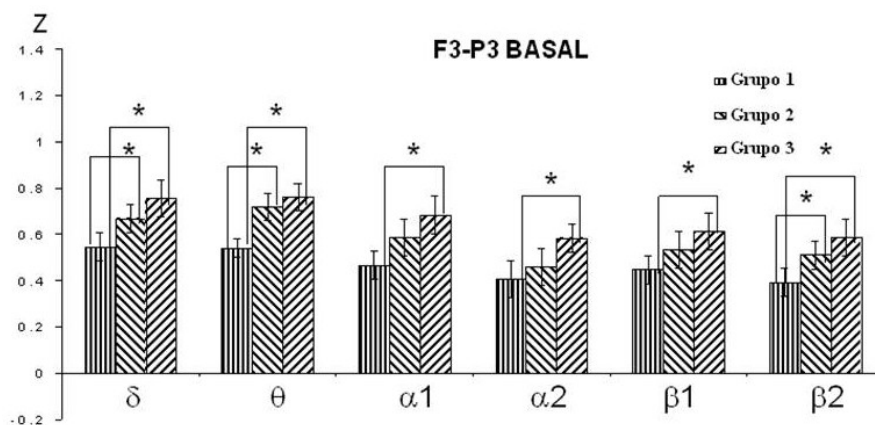


**Figura 14.** Media  $\pm$  2 errores estándar de la correlación interhemisférica parietal (P3-P4) en las diferentes bandas de EEG durante la condición basal (A) y durante la condición Hanoi (B) de los diferentes grupos.  $p \leq 0.01$  significativamente mayor respecto al grupo 1.

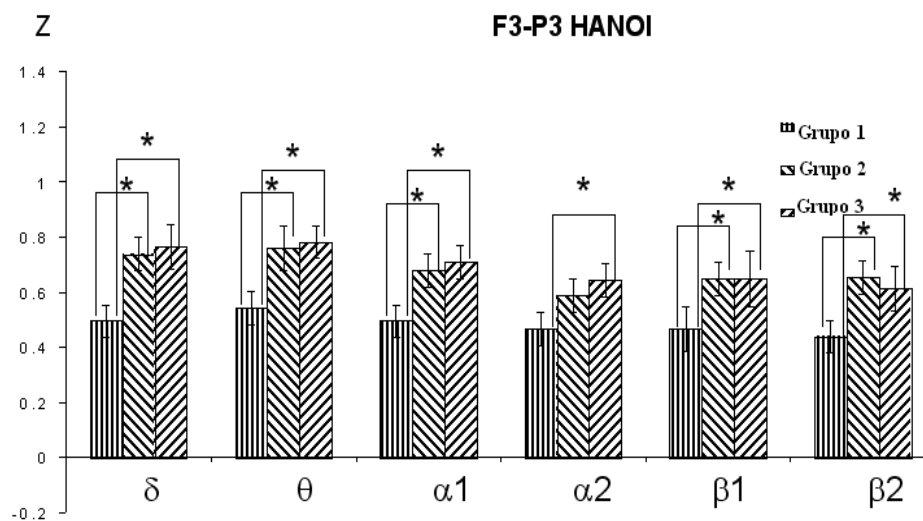


Con respecto a la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) en la condición basal, se encontró un incremento significativo ( $p \leq 0.01$ ) en las bandas delta, theta y beta2 en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1; y en alfa1, alfa2 y beta1 en el grupo 3 con respecto al grupo 1 (Figura 14A). En la condición Hanoi se presentó un incremento significativo en todas las bandas en los grupos 2 y 3 respecto al grupo 1, excepto para la banda alfa2 en la que éste incremento se presentó sólo en el grupo 3 respecto al grupo 1 (Figura 15B).

A



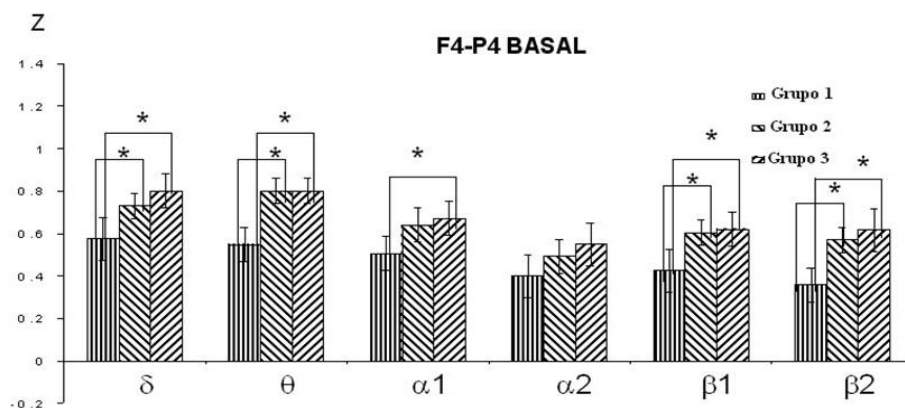
B



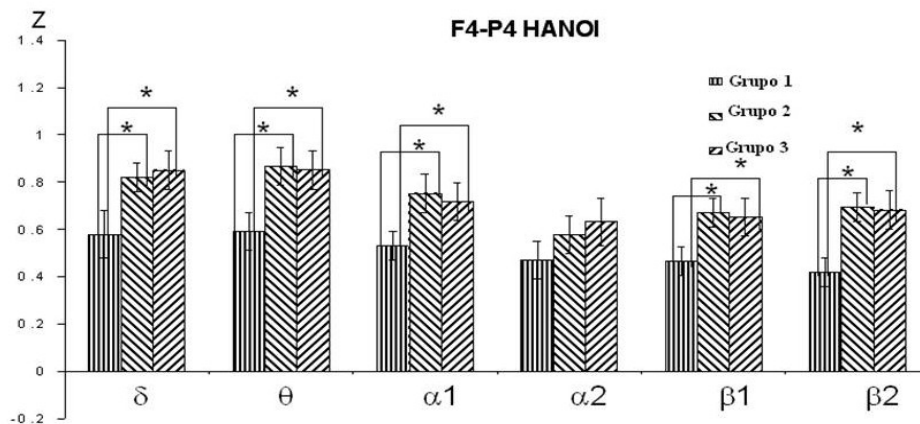
**Figura 15.** Media  $\pm$  2 errores estándar de la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) en las diferentes bandas de EEG durante la condición basal (A) y durante la condición Hanoi (B) de los diferentes grupos.  $p \leq 0.01$  significativamente mayor respecto al grupo 1.

En la correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) en la condición basal, se observaron incrementos significativos ( $p \leq 0.01$ ) en las bandas delta, theta, beta1 y beta2 en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1 y en alfa1 sólo en el grupo 3 con respecto al grupo 1 (Figura 15A). En la condición Hanoi se encontraron también incrementos significativos en todas las bandas en los grupos 2 y 3 respecto al grupo 1, excepto para la banda alfa2 en la cual, al igual que en la condición basal no se observaron diferencias significativas entre grupos (Figura 16B).

A



B

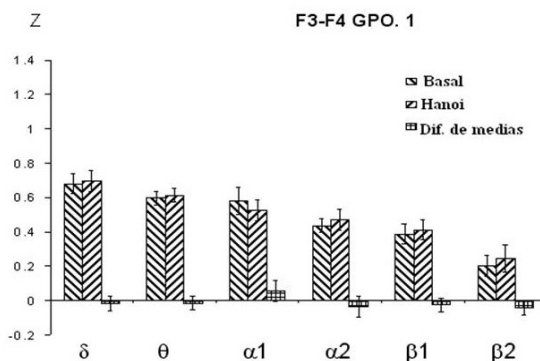


**Figura 16.** Media  $\pm$  2 errores estándar de la correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) en las diferentes bandas de EEG durante la condición basal (A) y durante la condición Hanoi (B) de los diferentes grupos.  $p \leq 0.01$  significativamente mayor respecto al grupo 1.

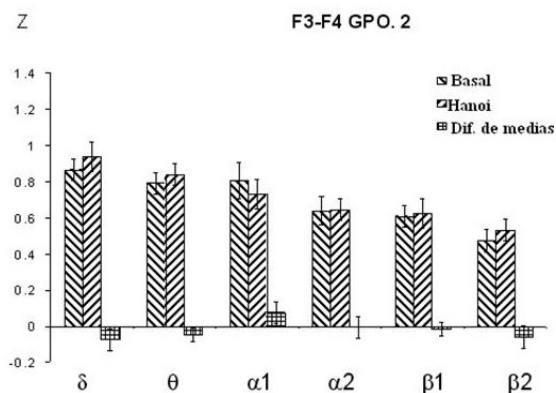
### 9.2.2 Resultados de la comparación entre condiciones

En el análisis estadístico de la correlación interhemisférica frontal (F3-F4) entre la condición basal y Hanoi, ninguno de los tres grupos mostró diferencias significativas en ninguna banda (Figura 17 A, B y C).

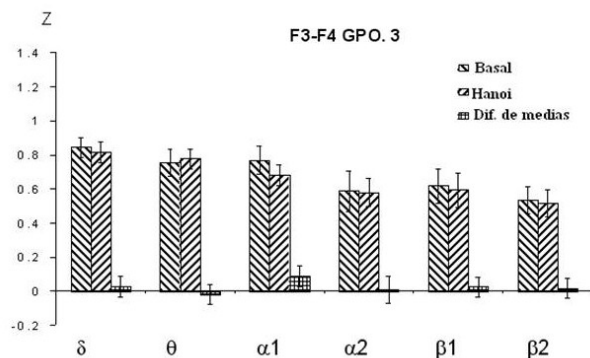
A



B



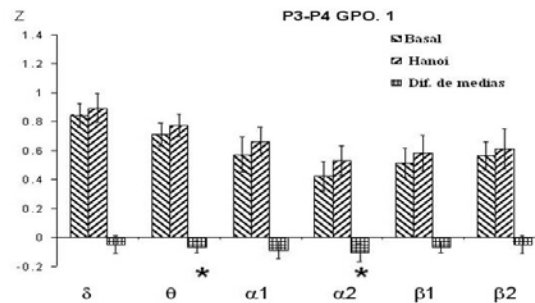
C



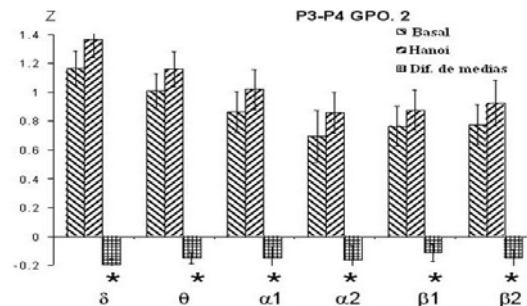
**Figura 17.** Media  $\pm 2$  errores estándar y diferencia de medias entre condiciones (basal y Hanoi) en la correlación interhemisférica frontal en el grupo 1 (A), grupo 2 (B) y grupo 3 (C).  $p \leq 0.01$  Hanoi significativamente mayor respecto a Basal.

En la correlación interhemisférica parietal (P3-P4) en el grupo 1 se observaron incrementos significativos ( $p \leq 0.01$ ) en la banda theta y alfa2, siendo mayor en la condición Hanoi con respecto a basal (Fig. 17 A); en el grupo 2 se encontró un incremento significativo ( $p \leq 0.01$ ) en la correlación en Hanoi con respecto a basal en todas las bandas (Fig. 18B); mientras que en el grupo 3 se encontró un incremento significativo ( $p \leq 0.01$ ) en Hanoi con respecto a basal sólo en las bandas delta y theta (Fig. 18C).

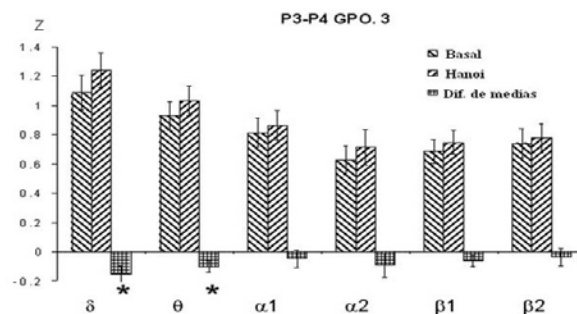
A



B



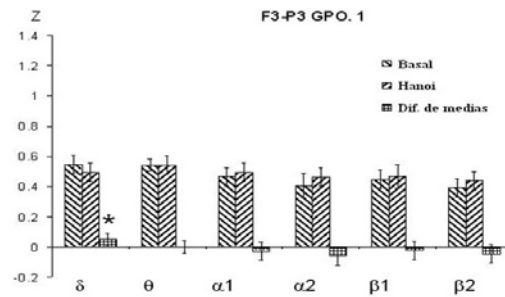
C



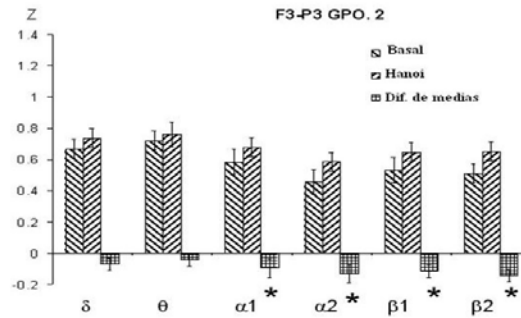
**Figura 18.** Media  $\pm$  2 errores estándar y diferencia de medias entre condiciones (basal y Hanoi) en la correlación interhemisférica parietal (P3-P4) en el grupo 1 (A), grupo 2 (B) y grupo 3 (C).  $p \leq 0.01$  Hanoi significativamente mayor respecto a Basal.

En la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) entre la condición basal y Hanoi en el grupo 1, no se encontraron incrementos significativos en ninguna de las bandas (Fig. 19A). En el grupo 2 se observaron incrementos significativos ( $p \leq 0.01$ ) en las bandas alfa1, alfa2, beta1 y beta2, durante la condición Hanoi con respecto a basal (Fig. 18B); y en el grupo 3 no se encontraron diferencias significativas entre condiciones en ninguna de las bandas (Fig. 19C).

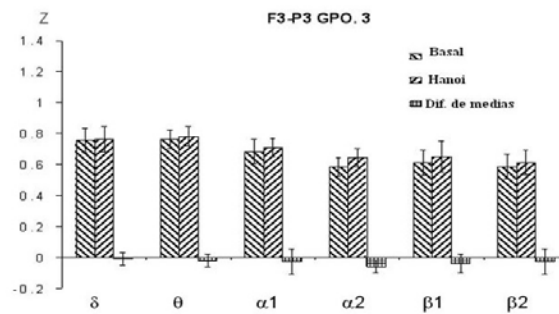
A



B



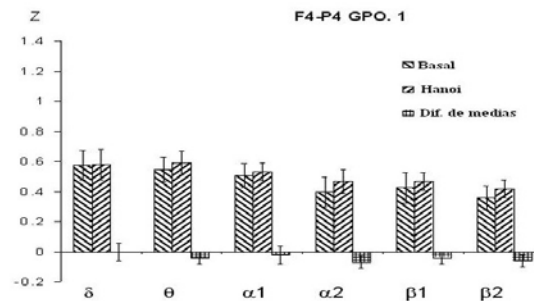
C



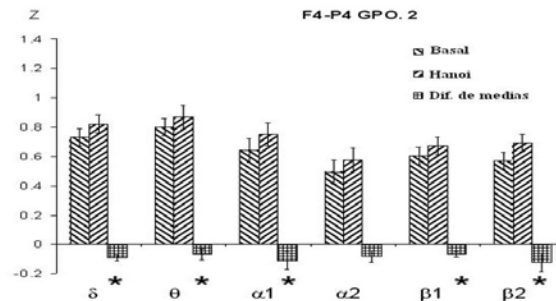
**Figura 19.** Media  $\pm$  2 errores estándar y diferencia de medias entre condiciones (Basal y Hanoi) en la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) en el grupo 1 (A) grupo 2 (B) y grupo 3 (C).  $p \leq 0.01$  Hanoi significativamente mayor respecto a Basal.

En la correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) entre la condición basal y Hanoi en el grupo 1 no se observaron diferencias significativas en ninguna banda (Fig. 20A); en el grupo 2 se encontró un incremento significativo ( $p \leq 0.01$ ) en todas las bandas excepto en alfa2 en la condición Hanoi con respecto a Basal (Fig. 20B). En el grupo 3 se encontró un incremento significativo ( $p \leq 0.01$ ) sólo en la banda alfa1 en la condición Hanoi con respecto a basal (Fig. 19C).

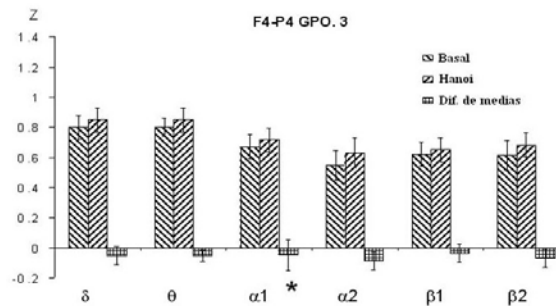
A



B



C



**Figura 20.** Media  $\pm$  2 errores estándar y diferencia de medias entre condiciones (Basal y Hanoi) en la correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) en el grupo 1 (A), grupo 2 (B) y grupo 3 (C).  $p \leq 0.01$  Hanoi significativamente mayor respecto a Basal.

A continuación se resumen la comparación entre grupos y entre condiciones de las correlaciones entre las diferentes derivaciones y bandas (tablas 2 y 3).

**Tabla 2.** Comparación entre grupos de la correlación en las diferentes bandas y en las diferentes derivaciones en las en las condiciones basal y Hanoi.

BANDAS			GRUPO 1-GRUPO 2	GRUPO 1-GRUPO 3	GRUPO 2-GRUPO 3	
<b>Delta</b>	F3-F4	Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
	P3-P4	Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
	F3-P3	Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
	F4-P4	Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
	<b>Theta</b>	F3-F4	Basal	↓	↓	
			Hanoi	↓	↓	
P3-P4		Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
F3-P3		Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
F4-P4		Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓	↓		
<b>Alfa1</b>		F3-F4	Basal	↓	↓	
			Hanoi	↓	↓	
	P3-P4	Basal	↓	↓		
		Hanoi	↓			
	F3-P3	Basal		↓		
		Hanoi	↓	↓		
	F4-P4	Basal		↓		
		Hanoi	↓	↓		
	<b>Alfa2</b>	F3-F4	Basal	↓		
			Hanoi	↓		
P3-P4		Basal		↓		
		Hanoi	↓			
F3-P3		Basal		↓		
		Hanoi		↓		
F4-P4		Basal				
		Hanoi				
<b>Beta1</b>		F3-F4	Basal	↓	↓	
			Hanoi	↓	↓	
	P3-P4	Basal	↓			
		Hanoi	↓			
	F3-P3	Basal		↓		
		Hanoi	↓	↓		

<b>Beta2</b>	F4-P4	Basal	↓	↓	
		Hanoi	↓	↓	
	F3-F4	Basal	↓	↓	
		Hanoi	↓	↓	
	P3-P4	Basal			
		Hanoi	↓		
	F3-P3	Basal	↓	↓	
		Hanoi	↓	↓	
	F4-P4	Basal	↓	↓	
		Hanoi	↓	↓	

**Tabla 3.** Comparación entre condiciones en cada uno de los grupos en las diferentes derivaciones, en las condiciones basal y Hanoi en las diferentes bandas.

<b>Grupo 1</b>		$\delta$	$\theta$	$\alpha1$	$\alpha2$	$\beta1$	$\beta2$
<b>F3-F4</b>	Basal						
	Hanoi						
<b>P3-P4</b>	Basal		↑		↑		
	Hanoi						
<b>F3-P3</b>	Basal						
	Hanoi						
<b>F4-P4</b>	Basal						
	Hanoi						

<b>Grupo 2</b>		$\delta$	$\theta$	$\alpha1$	$\alpha2$	$\beta1$	$\beta2$
<b>F3-F4</b>	Basal						
	Hanoi						
<b>P3-P4</b>	Basal	↑	↑	↑	↑	↑	↑
	Hanoi						
<b>F3-P3</b>	Basal			↑	↑	↑	↑
	Hanoi						
<b>F4-P4</b>	Basal	↑	↑	↑		↑	↑
	Hanoi						



<b>Grupo 3</b>		$\delta$	$\theta$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\beta_1$	$\beta_2$
<b>F3-F4</b>	Basal						
	Hanoi						
<b>P3-P4</b>	Basal	↑	↑				
	Hanoi						
<b>F3-P3</b>	Basal						
	Hanoi						
<b>F4-P4</b>	Basal			↑			
	Hanoi						

## 10. DISCUSIÓN

### **Ejecución de Torres de Hanoi**

Los resultados de este estudio, con respecto a la medición de la ejecución de Torres de Hanoi, indicaron que en parámetros como: latencia de inicio, total de movimientos y movimientos correctos no se encontraron diferencias significativas entre los tres grupos estudiados, por lo que las hipótesis planteadas en este estudio respecto a estos parámetros no se confirmaron; ya que una de las hipótesis planteaba que a menor edad, mayor latencia de inicio y mayor número de movimientos incorrectos. En lo referente al otro parámetro evaluado en este estudio: tarea completa e incompleta (en el tiempo límite considerado de 7 minutos), se encontró que la mayor parte de los sujetos del grupo 1 no lograron terminar la tarea (la terminaron 4 de 17) dentro del tiempo asignado, mientras que la mayor parte de los sujetos de los grupos 2 y 3 si lograron terminarla (11 de 17 y 12 de 17, respectivamente) no encontrándose diferencias entre estos dos grupos. De acuerdo a lo anterior, debido a que la mayor parte del grupo 1 no terminó la tarea en el tiempo considerado y la mayor parte de los grupos 2 y 3 si la terminaron, consideramos que la ejecución de los grupos 2 y 3 fue más efectiva comparada con la ejecución del grupo 1. Goel y Grafman (1995) [retomando la propuesta de Simon (1975)] consideran 4 estrategias para la solución de las Torres de Hanoi: 1) estrategia de recurso-meta (considerada la más efectiva), 2) estrategia de patrones de movimiento y dos estrategias perceptuales (ambas muy semejantes y siendo las más fáciles de ejecutar). De acuerdo a estas propuestas y considerando la ejecución de los sujetos, en este estudio se puede sugerir que, los sujetos que completaron la tarea dentro del tiempo límite, utilizaron en un principio la estrategia perceptual, ya que sólo movían los discos a los diferentes postes pero sin encontrar el camino más corto para llegar a la meta; sin embargo, en el transcurso de la ejecución, conforme algunos de los sujetos descubrían los procesos involucrados para la ejecución efectiva de la prueba, comenzaban a utilizar la estrategia de recurso-meta, mientras que los sujetos que no completaron la tarea en el tiempo límite, tal vez utilizaron en todo el transcurso de su ejecución la estrategia perceptual, puesto que no encontraron la vía más corta para la solución de la tarea dentro del tiempo asignado. Por lo anterior, se puede decir que la estrategia recurso-meta requiere en mayor medida de la participación de memoria de trabajo al principio, puesto que esta

permite manipular la información requerida para llevar la tarea de forma adecuada y de esta forma lograr la meta; sin embargo, una vez que el sujeto ha encontrado las reglas necesarias y la mejor forma de solucionar la tarea, la demanda de la memoria de trabajo disminuye. De acuerdo a lo observado con respecto a las estrategias utilizadas por cada uno de los grupos, se puede pensar que el grupo 1 utilizó de forma general la estrategia perceptual, ya que muchos de los sujetos participantes realizaban los movimientos de forma automática, solamente intentando cumplir la meta pero sin una planeación específica, por lo que les fue difícil terminar la tarea, mientras que los sujetos participantes del grupo 2 y 3 de forma general, utilizaron tanto la estrategia perceptual como la de recurso meta. Esta sugerencia surge de la observación de que el número de movimientos que realizaron estos grupos no se diferenció de forma significativa con el número de movimientos del grupo 1, lo cual puede indicar que aunque realizaron movimientos sólo de forma perceptual, estos grupos de mayor edad encontraron la estrategia adecuada de planeación para resolver la tarea en un tiempo menor al límite asignado, lo cual resultó en una ejecución más eficaz de la tarea.

Es importante mencionar que la versión computarizada de Torres de Hanoi utilizada en este estudio no mostró efecto de techo, ya que en los tres grupos estudiados hubo participantes que no completaron la tarea en el tiempo límite y fueron escasas las ocasiones (solamente en el grupo 2 y 3) en las que los sujetos realizaron la tarea en un tiempo demasiado corto.

Con respecto a la latencia del primer movimiento, Ahonniska et al. (2000) han considerado que un largo tiempo de planeación antes del primer movimiento puede indicar la existencia de planeación, sin embargo los resultados de este estudio apoyan la aportación de Welsh et al. (1994), los cuales afirman que el tiempo de demora para el primer movimiento (latencia) no distinguió a los buenos ejecutantes de los malos, ya que, de acuerdo a estos autores, un tiempo total de planeación largo, puede también indicar a) baja capacidad para resolver problemas (ejemplo: confusión o limitaciones en la memoria de trabajo), b) reconocimiento del problema sin la habilidad de resolverlo o c) lentitud para responder a algún estímulo. En este trabajo la latencia del primer movimiento de los malos ejecutantes (grupo 1) no fue diferente de aquella de los buenos ejecutantes (grupos 2 y 3). Esto también coincide con los reportes de Fireman (1996), quien no encontró una relación significativa entre el primer movimiento y el éxito de la solución del problema, lo que

indicó que los incrementos en la frecuencia de ejecuciones exitosas no estuvieron relacionados directamente con las configuraciones básicas del problema.

Con respecto al número total de movimientos, León Carrión et al. (2001), consideran que este parámetro puede representar el uso de estrategias de aprendizaje. Mientras menores sean las puntuaciones, mejor será el uso de estrategias del sistema, y mejor será también el uso de los mecanismos relacionados con la retroalimentación y probablemente sea esta la mejor puntuación para conocer la integridad de los circuitos prefrontales. Sin embargo, en este estudio no se encontraron diferencias significativas de este parámetro en ninguno de los tres grupos, lo cual puede indicar que éste parámetro por sí mismo puede ser un indicador del uso de las estrategias del sistema pero que puede hacerse efectivo en diferentes momentos de la ejecución. En lo referente al número total de errores en su conjunto, León Carrión et al. (2001) consideran que se puede asociar con el mecanismo que dirige la retroalimentación del sistema ejecutivo. Mientras menor sea la puntuación, mejor es la integridad del mecanismo. Asimismo, Cohen y Servan-Shreiber (1992) han sugerido que la construcción y el mantenimiento del contexto interno, son partes fundamentales de cualquier tarea de solución de problemas, en la que también es necesario mediar una respuesta conductual apropiada. Lo anterior, con respecto a las Torres de Hanoi, se ha relacionado con un alto número de movimientos ilegales, lo cual representa una falla en retener en mente la instrucción de la tarea, un falla de inhibición o falla en el monitoreo de la conducta. Sin embargo, en este estudio, lo anterior no diferenció a los buenos ejecutantes de los malos, lo cual no apoya las aportaciones de los autores mencionados. Respecto a los resultados de los parámetros mencionados anteriormente, Fireman (1996) considera que es muy importante diferenciar entre los incrementos cuantitativos o demandas de procesamiento en el almacenamiento de la información (Klahr, 1989) (considerados para la medición de los parámetros) y los cambios cualitativos en la ejecución de la tarea en la organización de la información (Fisher, 1980), por lo que la falta de diferencia en los parámetros señalados no indica que no existan cambios cualitativos en la solución de ésta tarea.

Fireman (1996) considera que la solución de problemas en los niños es más cuestión de desarrollo de estrategias y cambios representacionales que una selección de estrategias por si misma. De acuerdo a lo anterior y de acuerdo a lo observado en los

resultados, este estudio apoya la afirmación de Fireman (1996) no sólo para la población infantil como él lo sugirió, sino también en los adolescentes y adultos. Además, de igual manera, de acuerdo a las aportaciones de este autor, los resultados de este estudio indican que tanto los factores cuantitativos como los organizacionales operan durante la solución de problemas, ya que los factores cuantitativos por si solos no son suficientes para explicar el desarrollo de la solución de problemas, sino que debe también tomarse en cuenta la construcción activa de estrategias por parte de los ejecutantes a través del problema.

Con respecto al parámetro tarea completa e incompleta, Ahonniska et al. (2000) afirman que a mayor edad, mayor eficacia en la ejecución de la tarea. Además Goel y Grafman (1995), quienes compararon la ejecución entre pacientes con lesiones prefrontales y sujetos normales, no encontraron diferencias significativas en las estrategias utilizadas por los dos grupos de sujetos ni en otros parámetros, sino que solamente encontraron diferencias significativas en la eficacia de la ejecución de la tarea, siendo mejor dicha ejecución en los controles. Por otro lado, éste parámetro también se puede interpretar, de acuerdo a Lezak (1982), relacionándose con una de las 4 clases principales categorías de las capacidades ejecutivas propuestas por ésta investigadora: la *ejecución efectiva* de la tarea, ya que ésta clase de función hace referencia a la habilidad para monitorear, autocorregir, y regular el tiempo, intensidad, y otros aspectos cualitativos de la expresión de la conducta. De acuerdo a lo anterior, Lezak (1982) considera que los defectos de automonitoreo pueden comprometer el mérito de algún tipo de ejecución. Con respecto a lo anterior, podemos sugerir que los grupos 2 y 3 tuvieron un uso adecuado del automonitoreo necesario para la ejecución de la tarea y por lo tanto una ejecución más efectiva de la tarea con respecto al grupo 1. Además se sugiere que la terminación de la tarea es un parámetro muy importante a considerar en la integridad de la efectividad del sistema ejecutivo, ya que aun cuando éste parámetro depende de todos los demás y abarca una diversidad de funciones, es determinante para una ejecución efectiva. De acuerdo a Fireman (1996), existen aspectos cualitativos relacionados a la organización de la información que tienen que ver con el desarrollo de estrategias cuando se está realizando una actividad, las cuales no siempre son las mismas en un individuo que en otro, por lo que en muchas ocasiones no importa la estrategia o las perseveraciones que se utilicen para cumplir una meta, siempre y cuando se cumpla de forma efectiva y en un tiempo razonable. Debido a lo anterior, y considerando

las medidas de los parámetros de este estudio, es importante determinar de una forma por lo menos general, el tipo de procesos involucrados en la realización de la tarea en general como un grupo de dichos procesos que interactúan entre sí, siendo fundamentales todos y cada uno de ellos para cumplir la meta de forma efectiva.

Es importante mencionar que los procesos cognitivos y ejecutivos que se ha sugerido están implicados en la ejecución de las Torres de Hanoi, dependen en gran medida de la estrategia que el sujeto utilice, así como de la evaluación de algunos parámetros tal como el tiempo de ejecución o si completó o no la tarea. Por ejemplo, en este estudio se considera que en los sujetos que utilizaron la estrategia perceptual para prácticamente toda la ejecución de la tarea, tal vez no estuvo presente el proceso de la planeación, por lo menos en el tiempo requerido, ya que solamente realizaban movimientos al azar con movimientos incorrectos e ilegales una y otra vez pero sin un plan específico. Además, se puede considerar que en los sujetos que utilizaron la estrategia recurso-meta probablemente sí estuvo presente la planeación, aunque cabe mencionar que el monitoreo de los movimientos fue un componente fundamental, ya que esta tarea requiere de la realización una y otra vez de submetas para llegar a la meta, por lo que es un tipo de planeación que debe ser constantemente monitoreada y reconstruida.

Por otro lado, es fundamental además considerar que la madurez e integridad de los sustratos y redes cerebrales involucradas en los procesos cognitivos son condiciones indispensables para la adecuada ejecución de determinado tipo de tarea. De acuerdo a lo anterior fue necesario, complementar los resultados de ejecución mencionados anteriormente con los resultados de la técnica electroencefalográfica utilizada en este estudio, lo cual pensamos nos permitiría tener una visión más amplia de la funcionalidad de las áreas cerebrales que se ha sugerido están involucradas en la ejecución de las Torres de Hanoi.

### **Resultados electroencefalográficos**

De forma general, se encontró que a edades mayores aumenta la correlación tanto inter (frontal y parietal) como intra (izquierda y derecha) independientemente de la condición (basal o ejecución de Hanoi) de los sujetos. La mayor correlación en la mayoría de las bandas en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1 se mantuvo, sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre los grupos 2 y 3. Con respecto a lo anterior,

Marosi et al. (1992) encontraron que entre los 6 y 16 años de edad ocurre un aumento significativo en la coherencia EEG de un grupo de sujetos normales, principalmente entre las regiones posteriores, temporales y el vertex, especialmente en las bandas delta y alfa, lo que también se pudo apreciar en este estudio entre los sujetos del grupo 1 al compararlo con los grupos 2 y 3, aunque no específicamente en las bandas mencionadas, sino de manera general en todas las bandas. La falta de diferencias significativas entre los grupos 2 y 3 sugiere que el grado de coherencia electroencefalográfica alcanza una especie de meseta cuyos cambios no son abolidos pero tampoco son significativos entre las edades de 18 y 30 años. Por lo tanto es probable que ya desde los 18 años de edad, la relación funcional entre cortezas alcance un grado de maduración funcional que continúa a través de la tercera década de la vida, la cual subyace a la adecuada ejecución de tareas que requieren funciones ejecutivas como las Torres de Hanoi.

Por otro lado y de forma más particular, en la comparación entre grupos se encontró que en la correlación de la región frontal [inter (F3-F4)] tanto en la condición basal como en Hanoi hubo una mayor correlación en los grupos 2 y 3 con respecto al grupo 1 en todas las bandas, excepto en alfa2, ya que no hubo diferencias significativas entre el grupo 3 y el grupo 1. De acuerdo a lo anterior se puede proponer que la correlación inter-frontal de la banda alfa2 no fue indispensable para la adecuada ejecución de la tarea en el grupo 3. Sin embargo esta correlación inter F3-F4 no presentó diferencias significativas entre las condiciones de cada grupo. Lo anterior indica que la correlación entre las regiones frontales se modificó muy poco durante la ejecución de la tarea Hanoi respecto a la condición basal en todos los grupos.

Carrillo-de-la-Peña y García-Larreab (2007) aplicando la tarea de Wisconsin y registrando EEG, sugirieron que los índices de coherencia frontal parecen discriminar entre buenos y malos ejecutantes del WCST. En este estudio sin embargo no se encontró de forma clara esta diferenciación. Si bien los sujetos de mayor edad mostraron una mejor y más rápida ejecución de las Torres de Hanoi, éstos no mostraron cambios en la correlación interfrontal (F3-F4) respecto a los sujetos de menor edad, lo que no concuerda (por lo menos en estos rangos de edades) con lo encontrado en el estudio de Marosi et al. (1992) en el que observaron un decremento significativo con la edad en la coherencia entre las áreas frontales, especialmente en la banda theta.

En la correlación inter-parietal (P3-P4) se presentó un patrón similar al de la región inter-frontal (F3-F4), esto es, un aumento de la correlación en los sujetos de mayor edad respecto a los de menor edad (grupo 1). Sin embargo durante la condición Hanoi en el grupo 3 hubo una mayor correlación de las bandas alfa1 y alfa2 en la condición basal con respecto al grupo 1, lo cual ya no se observó durante la condición Hanoi, mientras que en el grupo 2 se observó una mayor correlación de las bandas alfa2 y beta2 en la condición Hanoi con respecto al grupo 1, lo cual no se observó en la condición basal. Tanto los cambios del grupo 2 como los del grupo 3 pueden indicar la aplicación de recursos en el acoplamiento cerebral para la ejecución de la tarea, pero el grupo 2 aumentando el control atencional, ya que se ha postulado que la banda beta está relacionada con esta función (Mizuhara et al., 2005), así como un procesamiento cognitivo relacionado a la tarea (Klimesch et al., 1990);

mientras que el grupo 3 lo hizo tal vez disminuyendo cierto acoplamiento parietal no necesario para la tarea, ya que Furst (1976) considera que una mejor ejecución de la tarea muestra relativamente una mayor disminución de alfa en el hemisferio relacionado a la ejecución de la tarea.

En la correlación inter-parietal (P3-P4) entre las condiciones de cada grupo, se encontró un aumento significativo de las bandas theta y alfa2 en el grupo 1, de todas las bandas en el grupo 2 y de las bandas delta y theta en el grupo 3 durante Hanoi, lo cual implica una concordancia en el aumento de la coherencia del ritmo theta para los tres grupos. Respecto a lo anterior, Sarnthein et al. (1998) en un estudio que realizaron, en el que aplicaron una tarea de memoria de trabajo, encontraron que la coherencia en el ritmo theta tanto en regiones anteriores como posteriores está relacionada con la memoria de trabajo; asimismo Mizuhara et al. (2007) a través de la aplicación de una tarea aritmética y EEG, encontraron que la mayor sincronización theta se encontró en las regiones corticales responsables de la función ejecutiva tales como: la corteza prefrontal, parietal y temporal; además, estos autores consideran que la fuente del ritmo theta es el área prefrontal medial e hipotetizan que el circuito ejecutivo central se localiza sobre la corteza prefrontal y las cortezas relacionadas a tareas ejecutivas cuya función está ligada dinámicamente con la sincronización del ritmo theta. Estos investigadores encontraron que la fase de sincronización de este ritmo se localizó en los sitios frontal derecho y parietal izquierdo.



Por otro lado, en la correlación intrahemisférica izquierda (F3-P3) permaneció también un patrón similar de correlación entre las condiciones basal y Hanoi en los tres grupos, pero hubo dos diferencias principales del grupo 2 y 3 con respecto al grupo 1: esta vez el grupo 2 presentó una mayor correlación la actividad alfa1 y beta1 durante Hanoi respecto al grupo 1 en comparación con la condición basal, lo cual puede indicar procesos cognitivos no relacionados a la tarea como expectancia y atención para resolver la tarea (Klimesch et al., 1990 y Mizuhara, 2005), mientras que el grupo 3 presentó una mayor correlación con respecto al grupo 1 en todas las bandas tanto en la condición basal como en Hanoi, lo cual puede indicar que ya desde la condición basal el grupo 3 presentó una activación adecuada para la realización de la tarea. En la comparación entre las dos condiciones de cada grupo, en el grupo 1 no se encontraron diferencias significativas, en el grupo 2 aumentó la correlación de las bandas alfa1, alfa2, beta1 y beta2 en Hanoi con respecto a basal, lo cual puede indicar tanto atención y expectancia como el procesamiento cognitivo relacionado a la tarea (Klimesch et al., 1990). En el grupo 3 no se encontraron diferencias en ninguna banda entre las condiciones basal y Hanoi, lo cual puede indicar una correlación cerebral adecuada o alerta aún cuando no se esté ejecutando tarea alguna.

La correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) también mostró un patrón similar entre los grupos en ambas condiciones, sólo hubo diferencias en las correlaciones de las bandas alfa, ya que tanto en basal como en Hanoi la correlación de alfa2 no fue diferente en los grupos 2 y 3 de aquella del grupo 1, lo cual puede indicar un grado de procesamiento cognitivo relacionado a la tarea (Klimesch et al., 1990) similar en los tres grupos, no así en los demás procesos involucrados. Además, el grupo 3 presentó una mayor correlación con respecto al grupo 1 en la banda alfa1 tanto en la condición basal como en Hanoi, mientras que el grupo 2 mostró esta diferencia con respecto al grupo 1 sólo en la condición Hanoi, por lo que se puede sugerir un incremento en la atención y expectancia por parte del grupo 2 durante Hanoi con respecto a basal. En la comparación entre las dos condiciones en cada grupo, se encontró que en la correlación intrahemisférica derecha (F4-P4) el grupo 1 no mostró diferencias significativas en ninguna banda; el grupo 2 mostró un incremento significativo en la correlación de todas las bandas excepto para la banda alfa2, lo cual puede indicar el uso de recursos tanto de atención y de expectancia como de un control ejecutivo (Klimesch et al., 1990 y Mizuhara, 2005, 2007); mientras que el grupo 3

solamente mostró diferencias significativas en la banda alfa1, lo cual puede indicar el uso de recursos tanto de atención como de expectancia (Klimesch et al., 1990).

De manera general se encontró que el grado de correlación entre las regiones consideradas en este estudio tanto interhemisférica como intrahemisférica, fue muy baja en el grupo 1 respecto a los otros 2 de mayor edad. Lo anterior se puede interpretar de acuerdo a las aportaciones de Thatcher et al. (1986), los cuales afirman que la coherencia depende de las propiedades espaciales de una red cerebral, donde tanto el acoplamiento a distancia como el local, entre generadores neurales, cooperan para generar la coherencia global entre áreas cerebrales. Es probable que esos grados de acoplamiento en los sujetos de menor edad aún no estén bien determinados y por lo tanto muestran menor correlación entre áreas frontales y parietales. De acuerdo a lo anterior, algunos estudios han encontrado resultados similares utilizando Resonancia Magnética y pruebas de memoria de trabajo. Por ejemplo Braver et al. (1997), examinando la actividad cerebral en adultos y en niños durante la ejecución de una tarea de memoria de trabajo espacial, encontraron una tendencia en los niños de mayor activación prefrontal que los adultos, mientras que los adultos presentaron mayor activación en el área parietal. Sin embargo Kwon et al. (2002), quienes también evaluaron niños y adultos jóvenes aplicando una tarea de memoria de trabajo espacial, encontraron incrementos de la activación relacionados con la edad en la corteza prefrontal dorsolateral bilateral, la corteza ventrolateral izquierda, la corteza premotora izquierda y la corteza parietal posterior bilateral. Asimismo, Crone et al. (2006) también evaluaron a niños, adolescentes y adultos jóvenes a través de una tarea de memoria de trabajo; encontraron que en los niños de 8 a 12 años de edad, se activa la corteza prefrontal ventrolateral de manera similar que en los adolescentes y los adultos, pero no se da un reclutamiento adicional de la corteza prefrontal dorsolateral derecha y la corteza parietal superior, evento requerido para la manipulación durante la demora. Los estudios anteriores también concuerdan con estudios realizados sobre la madurez cerebral entre estas edades, por ejemplo, Gogtay et al. (2004) encontraron que la última maduración de la materia gris se presenta en la corteza prefrontal dorsolateral, la cual se presenta al final de la adolescencia. Asimismo, Sowell et al. (2001) encontraron que el crecimiento total del cerebro no es significativo entre la infancia y la adolescencia, pero hay una relación estrecha entre la reducción de la densidad de la materia gris y el crecimiento del cerebro,

observado en la corteza parietal dorsal y la corteza prefrontal dorsolateral, en relación a la materia blanca. Estos resultados sugieren que los eventos progresivos de maduración celular, tales como el incremento de la mielinización, así como eventos regresivos, tales como la poda sináptica, puede jugar un papel prominente durante los años de postadolescencia en la determinación última de la densidad de la materia gris cortical en la maduración del lóbulo frontal que controlan las funciones cognitivas ejecutivas.

Por otro lado, también se encontró de forma general una falta de concordancia en el aumento de la correlación de las bandas en la comparación entre las condiciones basal y Hanoi en el grupo 1, lo cual podría considerarse ser un reflejo de inmadurez en la organización de estrategias para realizar determinado tipo de tareas que involucran funciones ejecutivas, así como una inmadurez en el acoplamiento adecuado de distintas regiones cerebrales para una mejor efectividad en la realización de estas tareas. Esta falta de concordancia en el aumento de la correlación de las bandas del grupo 1 se relacionó en este estudio con la poca efectividad en la ejecución de las Torres de Hanoi comparada con la ejecución de los otros dos grupos estudiados. En el grupo 2 se encontró la mayor concordancia u homogeneidad de aumento de correlación de todas las bandas durante Hanoi en comparación de la condición basal. A excepción de la correlación interfrontal (F3-F4), durante la condición Hanoi, todos los sujetos del grupo 2 mostraron un aumento de la correlación interparietal (P3-P4), intrahemisférica izquierda (F3-P3) e intrahemisférica derecha (F4-P4), sobre todo de las frecuencias rápidas, respecto a la condición basal, evidenciándose de forma importante el acomplamiento funcional entre cortezas, lo cual pudiera asociarse principalmente a los procesos cognitivos, relacionados con la tarea, y al control ejecutivo.

Es importante mencionar que aún cuando no se encontraron diferencias significativas entre los grupos 2 y 3 en los parámetros conductuales de la ejecución de Hanoi, existen diferencias sutiles entre estos dos grupos, tal vez en relación a la especialización tanto de la organización en la ejecución de tareas como de la actividad cerebral implicada en éstas. Se encontró por ejemplo que el grupo 2 presentó una mayor correlación en un mayor número de bandas en la condición Hanoi con respecto a la basal, lo cual implica una diferente funcionalidad o acoplamiento cerebral en la ejecución de las Torres de Hanoi, mientras que en el grupo 3 sólo aumentó la correlación en unas pocas

bandas durante la condición Hanoi con respecto a la basal. Sin embargo, ambos grupos ejecutaron la tarea de una forma efectiva y la cantidad de tareas completas e incompletas entre los dos grupos fueron prácticamente las mismas, así como su tiempo de ejecución. Lo anterior tal vez indica que el grupo 2 realizó un mayor esfuerzo mental en una condición de tarea con respecto a un estado de relajación, mientras que el grupo 3 de, mayor edad, ya posee una mayor eficacia en el uso de los recursos ejecutivos para este tipo de actividades mentales, por lo que, tal vez, ejerce dichas tareas de una forma más económica sin tanto esfuerzo, debido quizá a su mayor práctica en estas; es decir, la actividad cerebral del grupo 3 subyacente a la ejecución de las Torres de Hanoi se lleva a cabo de una forma más especializada, reflejándose en la correlación de determinadas bandas.

Uno de los resultados más interesantes de este estudio es que la correlación interfrontal (F3-F4) no mostró diferencias en ninguna de las bandas ni en ninguno de los grupos durante Hanoi con respecto a basal.

Este resultado probablemente refleja el hecho de que desde los 11 años de edad en adelante, los sujetos sanos del grupo 1 en condiciones de vigilia, muestran más correlación interfrontal (F3-F4) con cierto nivel de funcionalidad que, aunque es menor al encontrado en las edades mayores, es suficiente y adecuado para llevar a cabo la tarea de Torres de Hanoi, aunque su ejecución no alcance a ser exitosa.

Respecto a los no cambios en la correlación interfrontal (F3-F4) en los grupos de mayor edad durante Hanoi respecto a basal, es probable sugerir que los mayores índices de correlación interfrontal que caracterizaron en general a estos 2 grupos durante la condición basal, constituyen un nivel de funcionalidad adecuado y suficiente para llevar a cabo de forma exitosa la ejecución de la prueba Hanoi, lo cual suponemos también está determinado con el grado de maduración de la sustancia gris y sustancia blanca encontrados a través de la adolescencia y la adultez temprana.

¿Qué es lo que determina entonces la exitosa ejecución de la prueba Hanoi en los sujetos de mayor edad, si la correlación interfrontal no cambió en los diferentes grupos? Suponemos que, en base a los resultados obtenidos, es probable sugerir que es la combinación de cambios en la correlación tanto inter parietal como intrahemisférica izquierda y derecha, lo que en términos generales diferencia los patrones de correlación

fronto-parietal en relación a la exitosa o no exitosa ejecución de Hanoi respecto a la condición basal.

De acuerdo a las hipótesis planteadas en este estudio: “la ejecución de Torres de Hanoi dependerá de la edad de los sujetos. A menor edad, menor latencia de inicio de la tarea y mayor número de errores”, no encontramos diferencias en estos parámetros entre grupos, pero sí que los sujetos, desde los 18 años, llegaron a completar la tarea de forma exitosa en el tiempo límite, aun cuando los parámetros de ejecución no difirieron mucho entre grupos. Por lo tanto, es probable que los sujetos de mayor edad desarrollen estrategias que, aún presentado errores similares a los de menor edad, les permita de forma más rápida entender y resolver el problema.

De acuerdo a la segunda hipótesis: “la correlación inter e intrahemisférica entre áreas prefrontales y parietales, durante la ejecución de Torres de Hanoi dependerá de la edad de los sujetos: a mayor edad, mayor correlación intrahemisférica y menor correlación interhemisférica”, se encontró que efectivamente aumentó la correlación intra, pero también la inter a través de la edad, principalmente en el grupo 2 y 3 con respecto al grupo 1, pero no específicamente durante la ejecución de Hanoi, sino también en la condición basal., como si éste fuera un patrón indicador de maduración funcional cerebral, independientemente de si los sujetos ejecutan o no una tarea cognitiva.

Aun cuando en la comparación entre grupos durante la condición Hanoi y basal no hubo diferencias en el patrón de correlación entre grupos, en la comparación entre condiciones si se encontró una clara diferenciación del patrón de correlación que caracterizó a cada grupo durante la ejecución de Hanoi.

El grupo 1 se caracterizó por mostrar una mayor correlación interparietal (P3-P4) en theta y alfa2 respecto a Basal.

El grupo 2 mostró una alta correlación interparietal (P3-P4) de todas las bandas, así como un incremento de la r intra izquierda (F3-P3) de las frecuencias rápidas (alfa1, alfa2, beta1, beta2) y derecha (F4-P4) de todas las bandas, excepto alfa2.

El grupo 3 presentó un incremento de la r interparietal (P3-P4) en delta y theta, y un incremento de la correlación intrahemisférica derecha en alfa1.

Como se puede observar, los sujetos del grupo 2 son los que mostraron un mayor acoplamiento funcional sobre todo de las áreas parietales y de las asociaciones fronto-

parietales de ambos hemisferios durante la ejecución de Hanoi. Estos resultados muestran que en este rango de edad (18-20) la funcionalidad cerebral fronto-parietal durante la ejecución de Hanoi es totalmente diferente a la de los sujetos de menor (11-13) y mayor edad (26-30) y una gran proporción de ellos (11 de 17) lograron completar la tarea de forma exitosa, lo cual podría indicar que tal vez estos sujetos requirieron este acoplamiento funcional característico para lograr su objetivo. Qué tanto este diferente acoplamiento fronto-parietal se asoció con un mayor esfuerzo, mayor interés o motivación, es difícil de determinar con estos datos EEG, por lo que sólo podemos decir que la funcionalidad cerebral de los sujetos de 18 a 20 años fue totalmente diferente, pero adecuada para la exitosa ejecución de la tarea.

De manera muy interesante y sorprendente, observamos que en términos generales, la funcionalidad fronto-parietal de los sujetos del grupo 1 y del grupo 3 no fue muy diferente, ambos se caracterizaron por mostrar una alta correlación interparietal de las frecuencias bajas, aunque una mayor cantidad de sujetos del grupo 3 (26 a 30 años) lograron completar de forma exitosa la tarea, a diferencia de los sujetos del grupo 1. Es probable entonces que aún cuando ambos grupos muestran un nivel de correlación interparietal similar durante la ejecución de Hanoi, en los sujetos del grupo 1 esto no fue suficiente para que ejecutaran de forma exitosa la tarea, lo cual pudiera deberse a menor atención o interés para esforzarse por lograr una buena ejecución de la tarea. Las únicas diferencias entre el grupo 1 y el 3, fueron que los sujetos de mayor edad presentaron una mayor correlación interparietal en alfa2 e intrahemisférica derecha de alfa1; es probable entonces sugerir que estos pequeños cambios pudieron marcar la diferencia entre la exitosa ejecución de estos sujetos y la mala ejecución del grupo 1 (sólo 4 de 17 completaron la tarea). Es probable que el grado de acoplamiento funcional inter-parietal de frecuencias bajas junto con la mayor  $r$  intrahemisférica derecha de alfa1 sea la condición funcional adecuada y suficiente para que estos sujetos del grupo 3 lograran completar la tarea de forma exitosa, es decir, aquella que les permitió desarrollar las estrategias adecuadas de resolución y de rápida ejecución de Hanoi.

No obstante lo anterior, es importante recordar que no sólo de la funcionalidad de las áreas frontales y parietales depende la ejecución de Hanoi, sino que es toda la gamma de influencias de otras estructuras corticales y estructuras subcorticales las que hacen posible

la adecuada ejecución de todos los procesos cognitivos y ejecutivos implicados, por lo que con estos resultados, tenemos sólo una visión parcial de lo que pudiera estar ocurriendo en la actividad fronto-parietal a través del desarrollo de sujetos masculinos durante la ejecución de Hanoi.

Uno de los principales resultados de este estudio radica en la caracterización del grado de acoplamiento fronto-parietal que presentan los sujetos de las diferentes edades durante la ejecución de Hanoi, lo cual pudiera marcar una pauta a partir de la cual podrían inferirse una serie de sugerencias de cómo los sujetos procesan y desarrollan las estrategias adecuadas para lograr o no una exitosa ejecución de la tarea, utilizando estos datos como un índice de la maduración de la actividad cerebral subyacente a procesos de alto nivel cognitivo y funciones ejecutivas, así como de la maduración de los procesos involucrados en éstas, específicamente en las Torres de Hanoi.

Lo datos EEG durante la ejecución de Hanoi proporcionan información muy valiosa, ya que la tarea realizada por los tres grupos estudiados fue exactamente la misma, lo cual hace más uniforme su análisis y la interpretación de los procesos cerebrales involucrados en su ejecución a través del análisis electroencefalográfico (herramienta frecuentemente utilizada para relacionar diversos estados mentales con las diferentes bandas que lo componen, así como la correlación de la funcionalidad de diferentes áreas cerebrales).

La importancia de este tipo de estudios radica en que, al poder determinar las características principales en la ejecución de diferentes tareas que evalúan determinados procesos cognitivos, principalmente funciones ejecutivas a través de la edad, así como de la actividad cerebral y la correlación funcional de diferentes áreas cerebrales subyacentes a dichas tareas en sujetos normales, se puede contar con una útil herramienta para el diagnóstico de trastornos, retrasos del desarrollo, patologías, etc. así como para comprender de una mejor manera los procesos cerebrales involucrados en las conductas características de diversas etapas de la vida.

Una de las principales desventajas de este estudio es que no se comparan los resultados de los diferentes grupos estudiados con niños menores de 11 años (considerada como la etapa en la que la plasticidad cerebral es mayor), ni con sujetos de mayor edad (de 30 años en adelante), lo cual nos proporcionaría información importante para determinar

qué pasa en dichas edades durante la ejecución de esta tarea específicamente aunado a la actividad cerebral comprometida en esta.

Un aspecto importante a considerar en este estudio es que se realizó con sujetos pertenecientes principalmente a la clase media baja, los cuales eran estudiantes de escuelas públicas o profesionistas formados en estas, por lo que sería interesante compararlos también con estudiantes de escuelas privadas, así como establecer la comparación entre géneros.

Los resultados obtenidos en este estudio nos permitieron corroborar que la ejecución de la prueba neuropsicológica Torres de Hanoi (por lo menos en la versión utilizada en este estudio) es una herramienta válida para evaluar las características específicas de los parámetros cuantitativos considerados en esta prueba, las estrategias utilizadas por los sujetos durante la ejecución de la misma en diferentes etapas de la vida, así como la funcionalidad cerebral en el transcurso de dicha ejecución. Asimismo, la realización de esta prueba, al requerir la interconexión continua de la corteza parietal y prefrontal en ambos hemisferios (además de la participación de otras estructuras cerebrales) puede ser una herramienta útil en la evaluación de la funcionalidad de estas áreas tanto en pacientes como en sujetos normales, lo cual se ha demostrado en diferentes estudios a través de la evaluación conductual de su ejecución, pero que se puede ampliar utilizando además técnicas de funcionalidad cerebral tales como el electroencefalograma y la resonancia magnética funcional, entre otros.



## 11. CONCLUSIONES

Sólo 4 de los 17 sujetos de menor edad (grupo 1, 11-13 años) lograron completar la prueba Torres de Hanoi en máximo 7 minutos, a comparación de los sujetos del grupo 2 (18-20 años) y 3 (26-30 años), quienes en su mayoría lograron completar la tarea de manera exitosa. Por lo tanto, se concluye que la exitosa ejecución de la prueba Torres de Hanoi depende de la edad de los sujetos, a mayor edad, mayor eficacia en la ejecución de la tarea.

La exitosa ejecución de la tarea que presentaron los sujetos de los grupos 2 y 3 no asoció con una menor latencia ni con un menor número de movimientos incorrectos a comparación de los sujetos del grupo 1, por lo que se concluye que la medición cuantitativa de los parámetros de ejecución no es suficiente para determinar de forma fidedigna las estrategias utilizadas por los sujetos para resolver la tarea.

En términos generales, se encontró que los sujetos de mayor edad (de 18-20 y de 26-30 años) presentaron una mayor correlación tanto inter (frontal y parietal) como intra (izquierda y derecha) independientemente de la condición (basal o ejecución de Hanoi) de los sujetos. Por lo tanto es probable que ya desde los 18 años de edad, la relación funcional entre cortezas alcance un grado de maduración funcional que continúa a través de la tercera década de la vida, la cual subyace a la adecuada ejecución de tareas que requieren funciones ejecutivas como las Torres de Hanoi.

La comparación entre condiciones por grupo permitió determinar el patrón de correlación fronto-parietal que caracterizó a cada grupo durante la ejecución de Hanoi:

El grupo 1 mostró una mayor correlación interparietal (P3-P4) en theta y alfa2.

El grupo 2 mostró una alta correlación interparietal (P3-P4) de todas las bandas, así como un incremento de la  $r$  intra izquierda (F3-P3) de las frecuencias rápidas (alfa1, alfa2, beta1, beta2) y derecha (F4-P4) de todas las bandas, excepto en alfa2.

El grupo 3 presentó un incremento de la  $r$  interparietal (P3-P4) en delta y theta, y un incremento de la correlación intrahemisférica derecha en alfa1.

El grado de acoplamiento fronto-parietal de los sujetos del grupo 1 y del grupo 3 no fue muy diferente. Las únicas diferencias entre éstos, fue que los sujetos de mayor edad presentaron una mayor correlación interparietal en delta y theta e intrahemisférica derecha

en  $\alpha_1$ ; es probable entonces sugerir que estos pequeños cambios pudieron marcar la diferencia entre la exitosa ejecución de estos sujetos y la mala ejecución del grupo 1 (sólo 4 de 17 completaron la tarea). Es probable que el grado de acoplamiento funcional interparietal de frecuencias bajas junto con la mayor  $r$  intrahemisférica derecha de  $\alpha_1$  sea la condición funcional adecuada y suficiente para que estos sujetos del grupo 3 logaran completar la tarea de forma exitosa, es decir, aquella que les permitió desarrollar las estrategias adecuadas de resolución y de rápida ejecución de Hanoi.

La determinación del patrón de acoplamiento electroencefalográfico fronto-parietal que caracteriza a los sujetos de las diferentes edades durante la ejecución de la prueba de Hanoi, podría constituir una pauta a partir de la cual podrían inferirse una serie de sugerencias de cómo los sujetos procesan y desarrollan las estrategias adecuadas para lograr o no una exitosa ejecución de la tarea, utilizando estos datos como un índice de maduración de la actividad cerebral subyacente a procesos de alto nivel cognitivo y funciones ejecutivas, así como de la maduración de los procesos involucrados en éstas, específicamente en las Torres de Hanoi.

## 12. REFERENCIAS

Adleman, N. E., Menon, V., Blasey, C. M., White, C. D., Warsofsky, H. S., Glover, G. H., & Reiss, A. (2002). A developmental fMRI study of the stroop color-word task. *Neuroimage*, 16:61-75.

Ahonniska, J., Ahonen, T., Aro, T.; Tolvanen, A., & Lyytinen, H. (2000). Repeated assessment of the Tower of Hanoi test: reliability end age effects, realizado por: University of Jyväskylä. Psychological Assessment. Jyväskylä Finlandia.

Albanese, E. F., Saubidet, A. G., Merlo, A., Albanese, A., Miño, J., Ingratta, A., Gómez, E., & Cancela, M. (2002). Proyecto: Estudio morfológico del precuneus utilizando resonancia magnética. Facultad de Medicina. Argentina.

Alexander, G. E., De Long, M. R., & Strick, P. L. (1986). Parallel organization of functionally segregated circuits linking basal ganglia and cortex. *Ann Rev Neurosci*, 9: 357-81.

Alexander, M.P., & Stuss, D.T. (2000). Disorders of frontal lobe functioning. *Seminars in Neurology*, 20, 427-437.

Anderson, J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Anderson, V.; Anderson, P.; Northam, E., Jacobs, R., & Catroppa, C. (2001). Development of executive functions through late childhood and adolescence in an australian sample. *Developmental Neuropsychology*, 20(1), 385-406.

Anderson, P. (2002). Assessment and Development of Executive Function (EF) During Childhood. *Child Neuropsychology*. Vol. 8, No. 2, pp. 71-82.

Anderson, S., & Tranel, D. (2002). Neuropsychological consequences of dysfunction in human dorsolateral prefrontal cortex. In J. Grafman (Ed). *Handbook of Neuropsychology*, 2nd Edition, Vol. 7. Elsevier Science B.V. Iowa City, USA.

Anzai, Y., & Simon, H. A. (1979). The theory of learning by doing. *Psychol Rev*. 86(2):124-40.

Aquino, C. J., Aneiros, R. R., & Rojas, Z. L. (1999). El Electroencefalograma y la Onda P300 en Psiquiatría: Las Toxicomanías.

Anokhin, A.P., Lutzenberger, W., & Birbaumer, N. (1999). Spatiotemporal organization of brain dynamics and intelligence: an EEG study in adolescents. *International Journal of Psychophysiology*. 33: 259-273.

Ardila, A., Roselli, M., Matute, E., & Guajardo, G. (2005). The influence of the parent's educational level on the development of executive functions. *Developmental Neuropsychology*, 28, 539-560.

Baddeley, A. (1986) *Working Memory*. Oxford: Oxford University Press.

Baddeley, A. (1996) The fractionation of working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93: 13468-13472.

Baddeley, A., Della, S., Papagno, C., & Spinnler, H. (1997). Dual task performance in dysexecutive and nondysexecutive patients with frontal lesion. *Neuropsychology*, 11: 187-194.

Baker, S., Rogers, R., Owen, A., Frith, C. D., Dolan, R. J., Frackowiak, R. S., & Robbins, T. W. (1996). Neural systems engaged by planning: A PET study of the Tower of London task. *Neuropsychologia*, 34(7), 515-26.

Barash, Sh. (2003). Paradoxical activities: insight into the relationship of parietal and prefrontal cortices. Department of Neurobiology, Weizmann Institute of Science, Israel. *TRENDS in Neurosciences*. Vol.26 No.11.

Barbas, H., & Mesulam, M. M. (1985). Cortical afferent input to the principalis region of the rhesus monkey. *Neuroscience*. 15(3):619-37.

Barbas, H., (1988). Anatomic organization of basoventral and mediodorsal visual recipient prefrontal regions in the rhesus monkey. *J Comp Neurol*. 276(3):313-42.

Barceló, F. (2001). Does the Wisconsin Card Sorting Test Measure Prefrontal Function? *The Spanish Journal of Psychology*, Vol. 4, No. 1, 79-100.

Barnea-Goraly, N., Menon, V., Eckert, M., Leanne, T, Bammer, R., Karchemskiy, A. C., Dant, Ch., & L. Reiss, A. ( 2005 ). White Matter Development During Childhood and Adolescence: A Crosssectional Diffusion Tensor Imaging Study. *Cerebral Cortex*. 1848—1854.

Barry, R. J., Clarke, A. R., McCarthy, R., Selikowitz, M., Johnstone, S. J., & Rushby, J. A. (2004). Age and gender effects in EEG coherence: I. Developmental trends in normal children. *Clinical Neurophysiology* 115, 2252–2258

Beaumont, J.G., & Rugg, M.D. (1979). The specificity of intrahemispheric EEG alpha coherence asymmetry related to psychological task. *Biol. Psychol.*, 9:237 248.

Benjamín, R. M., & Golden, G. T. (1985). Extent and organization of opossum prefrontal cortex defined by anterograde and retrograde transport methods. *Journal of Comparative Neurology*, 238, 77-91.

Berger, H. (1929). Ueber das Elektroenkephalogram des Menschen. I. Arch. Psychiatr. 87: 527–570.

Blakemore, Sarah-Jayne, & Suparna, Ch. (2006). Development of the adolescent brain: implications for executive function and social cognition. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 47:3 pp 296–312.

Braitenberg, V. (1974). Thoughts on the cerebral cortex. *J Theor Biol.* 46(2):421-47.

Braitenberg, V. (1978). Cortical architectonics: general and areal. In: M.A.B. Brazier and H. Petsche (Eds.), *Architectonics of the Cerebral Cortex*. Raven Press, New York, 443-465.

Brass, M., Ullsperger, M. R., Knoesche T., von Cramon, Y., & A. Phillips, N. (2005). Who Comes First? The Role of the Prefrontal and Parietal Cortex in Cognitive Control. *Journal of Cognitive Neuroscience* 17:9, pp. 1367–1375.

Braver, T. S., Cohen, J. D., Nystrom, L. E., Jonides, J., Smith, E. E., & Noll, D. C. (1997). A parametric study of prefrontal cortex involvement in human working memory. *Neuroimage*, 5, 49-62.

Brennan, M., Welsh, M. C., & Fisher, C. B. (1997). Aging and executive function skills: An examination of a community-dwelling older adult population. *Perceptual and Motor Skills*, 84, 1187-1197.

Brown, V., & Bowman, E. (2002). Rodent models of prefrontal cortical function. *Trends in Neurosciences*. Volume 25, Issue 7, Pages 340-343.

Bull, R., Espy, K., & Senn, T. (2004). A comparison of performance on the towers of London and Hanoi in young children. *Journal of Child Psychology and Psychiatry* 45:4, pp. 743-754. Scotland, UK & USA.

Cardoso, J. & Parks, R. (1998). Neural network modeling of executive functioning with the Tower of Hanoi test in frontal lobe lesioned patients. In: Parks, R., Levine, D. & Long D. *Fundamentals of neural network modeling*. Neuropsychology and Cognitive Neuroscience. USA.

Carpenter, M. B., Nakano, K. & Kim, R. (1976). Nigrothalamic projections in the monkey demonstrated by autoradiographic techniques. *J. Comp. Neurol.* 236: 315-30.

Carrillo-de-la-Peña, M. T., & García-Larrea, L. (2007). Right frontal event related EEG coherence (ERCoH) differentiates good from bad performers of the Wisconsin Card Sorting Test (WCST). *Clinical Neurophysiology* (2007) 37, 63-75.

Cavada, C., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Posterior parietal cortex in rhesus monkey: II. Evidence for segregated corticocortical networks linking sensory and limbic areas with the frontal lobe. *J Comp Neurol.* 287(4):422-45.

Cavedini, P., Cisima, M., Riboldi, G., D'Annunzi, & Bellodi, L. (2001). A Neuropsychological Study of Dissociation in Cortical and Subcortical Functioning in Obsessive-Compulsive Disorder by Tower of Hanoi Task. *Brain and Cognition* 46, 357-363.

Cohen, J. D., & Servan Shreiber, D. (1992). Context, cortex, and dopamine: a connectionist approach to behavior and biology in schizophrenia. *Psychological Review*, 99: 45-77.

Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., Van Leijenhorst, L., & Bunge, S. A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *PNAS*, vol. 103, no. 24 , 9315–9320.

Culberston, & Zillmer (1998). The Tower of London (DX): a standardized approach to assessing executive functioning in children. *Arch Clin Neuropsychol*. 1998 Apr;13(3):285-301.

Chavis, D. A., & Pandya, D. N. (1976). Further observations on corticofrontal connections in the rhesus monkey. *Brain Res*.117(3):369-86.

Chow, T.W., & Cummings, J.L. (1999). Frontal-subcortical circuits. En B.L. Miller y J.L. Cummings (Eds.), *The human frontal lobes. Functions and disorders*. New York: The Guilford Press.

Chugani, H. T., Phelps, M. E., & Mazziota, J. C. (1987). Positron emission tomography study of human brain functional development. *Annals of Neurology*, 22, 487-497.

Damasio, A. R. (1985). The frontal lobes. En K. Heilman y E. Valenstein (comp.), *Clinical neuropsychology*. Nueva York: Oxford University Press.

Danesi, M. (2004). The liar Paradox y las Torres de Hanoi. Los diez grandes acertijos matemáticos de todos los tiempos, 105-123, Estados Unidos de América.

DeLalle, I., Evers, P., Kostovic, I., & Uylings, H. B. M. (1997). Laminar distribution of neuropeptide Y-immunoreactive neurons in human prefrontal cortex during development. *Journal of Comparative Neurology*, 379, 512-522.

De Luca, C., Word, S., Anderson, V., Buchanan, J., Proffitt, T., Mahony, K., & Pantelis, CH. (2003). Normative data from the cantab. I: Development of executive function over the lifespan. *Journal of clinical and Experimental Neuropsychology*. Vol. 5, No. 2, pp. 242-254.

Diamond, A. (1985). Development of the hability to use recall to guide action, as indicated by infants´ performance on A-not-B. *Child Development*, 56, 868-883.

Diamond, A. (1991). Frontal lobe involvement in cognitive changes during the first year of life. In K. R. Gibson and A. C. Peterson (eds.), *Brain maturation and cognitive*

development: Comparative and cross-cultural perspectives (pp. 127-80). NY: Aldine de Gruyter.

Diamond, A. (2002). Normal Development of Prefrontal Cortex from Birth to young adulthood: Cognitive Functions, Anatomy and Biochemistry. Oxford University Press.

Divac, I., Lavail, J. H., Rakic, P., & Winston, K. R. (1977). Heterogeneous afferents to the inferior parietal lobule of the rhesus monkey revealed by the retrograde transport method. *Brain Res.*, 123(2):197-207.

Diwadkar, V. A., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1999). Collaborative Activity between Parietal and Dorso-Lateral Prefrontal Cortex in Dynamic Spatial Working Memory Revealed by fMRI. Center for Cognitive Brain Imaging, Department of Psychology, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.

Duncan, J., Emslie, H., Williams, P., Johnson, R., & Freer, C. (1996). Intelligence and the frontal lobe: The organization of goal-directed behaviour. *Cognitive Psychology*, 30, 257-303.

Duncan, J., Johnson, R., Swales, M., & Freer, C. (1997). Frontal Lobe deficits after head injury: Unity and diversity of function. *Cognitive Neuropsychology*, 14, 713-741.

Engle, R. W., Kane, M. J., & Tuholski, S. W. (1999). Individual differences in working memory capacity and what they tell us about controlled attention, general fluid intelligence, and functions of the prefrontal cortex. In A. Miyake & P. Shah ((Eds.), *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control* (pp. 102-134). New York: Cambridge Univ. Press.

Fernández, H. T., & González, G. A. (2001). EEG y cognición. En: *Texto de Neurociencias Cognitivas*. Alcaraz R. V. M. y Gumá D., E. Ed. Manual Moderno. Guadalajara, Jalisco y México, D. F.

Fincham, J., Carter, C., Vincent, V., Adrew, S., & Anderson, J. (2002). Neural mechanisms of planning: A computational analysis using event-related fMRI. *PNAS*. Vol. 99, No. 15.

Fireman, G. (1996). Developing a Plan for Solving a Problem: A Representational Shift. *Cognitive Development*, 11, 107-122.

Fischer, K.W. (1980). A theory of cognitive development: the control and construction of hierarchies of skills *Psychological Review*, 87,477-531.

Fox, N. A., & Bell, M. A. (1990). Electrophysiological indices of frontal lobe development: Relations to cognitive and affective behavior in human infants over the first year of life. In A. Diamond E. (ed.). *The development and Neural Bases of Higher Cognitive Functions* (Vol. 608, pp. 677-704). New York: Annals of the New York Academy of Sciences.

Flavell, J. H. (1986). The development of children's knowledge of false believe and the appearance-reality distinction. *International Journal of Psychology*, 28, 595-604.

Furst., C. J. (1976). EEG alfa asymmetry and visuospatial performance. *Nature* 260, 254-255.

Fuster, J. M. (1995). *Memory in the cerebral cortex. An ampirical approach to neural networks in the human and no human primate.* Cambridge. Man: The MIT Press.

Fuster, J. M. (1997). *The prefrontal cortex. Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe.* Ed. Lippincott-Raven. U.S.A.

Fuster, J. M. (1999). Sinopsis of function and dysfunction of the frontal lobe", en *ACTA Psychiatrica Scandinavica Acta Psychiatr.* 99:51-57.

Fuster, J. M. (2001). The prefrontal cortex – an update: time is of the essence. *Neuron*, 30: 319-333.

Fuster, J. M. (2002). Frontal lobe and cognitive development. *Journal of Neurocytology* 31, 373-385.

Gage, F. H., & Van Praag, H. (2002). Functional neurogenesis in the adult hippocampus. *Nature*. 28;415(6875):1030-4.

Garey, L. (1999). *Brodmann`s: Localization in the cerebral cortex.* Londres. Imperial College Press.

Gerdstadt, C., Hong, & Diamond, A. (1994). The relationship between cognition and action: performance of 3.5-7 year old children on a Stroop-like day-night test. *Cognition* ,53, 129-153.

Giedd, J. N., Blumenthal, J., Jeffries, N. O., Castellanos, F. X., Hong Liu, Zijdenbos, A., Paus, T., Evans, A. C., & Rapoport, J. L. (1999). Brain development during childhood and adolescence: a longitudinal MRI study. *Nature Neuroscience* • volume 2 no. 10.

Giguere, M., & Goldman Rakic, P. S. (1988). Mediodorsal nucleus: areal, laminar, and tangential distribution of afferents and efferents in the frontal lobe of rhesus monkeys. *J Comp Neurol*, 277, 195-213.

Gnys, J.A., & Willis, W.G. (1991) Validation of executive function tasks with young children. *Developmental Neuropsychology* 7, pp. 487–501.

Godefroy, O, Cabaret, M., Petit-Chenal V., Pruvo, J-P., & Rousseaux, M. (1999). Control Functions of the frontal lobes. Modularity of the Central Supervisory System. *Cortex*, 35, 1-20.



Goel, V., & Grafman, J. (1995). Are the Frontal Lobes Implicated in “Planning” Functions? Interpreting Data From The Tower of Hanoi. *Neuropsychologia*. Vol. 33, No. 5, pp. 623-642, 1995.

Gogtay, N., Giedd, J., Lusk, L., Hayashi, K., Greenstein, D, Vaituzis, C., Nugent, T., Herman, D., Clasen, L., Toga, A., Rapoport, J., & Thompson, P. (2004). Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood. *PNAS* vol. 101 No. 21, 8174–8179.

Goldberg, E. (2002). *El cerebro ejecutivo. Lóbulos frontales y mente civilizada*. Ed. Drakontos.. Madrid, España. Traducción de *The executive Brain*, publicado en inglés en el 2001 por Oxford University Press.

Goldberg, T. E., Saint-Cyr, J. A., & Weinberger, D. R. (1990). Assessment of procedural learning and problem solving in schizophrenic patients by Tower of Hanoi type task. *Journal of Neuropsychiatry*, 2, 165-173.

Golden, M. (1981). A measure of cognition within the context of assertion. *J Clin Psychol.* 37(2):253-62.

Goldman, P.S., & Nauta, W.J.H. (1976). Autoradiographic demonstration of a projection from prefrontal association cortex to the superior colliculus in the rhesus monkey. *Brain Res.*, 116:145-149.

Goldman-Rakic., S., & Nauta, W. J. H. (1976). An intricately patterned prefronto-caudate projection in the rhesus monkey. *J. Comp. Neurol.* 171: 369-86.

Goldman-Rakic, P. S. (1984) Modular organization of prefrontal cortex. *Trends Neurosci* 7:419-424.

Goldman-Rakic, P. S., & Porrino, L. J. (1985) The primate mediodorsal (MD) nucleus and its projection to the frontal lobe. *J Comp Neurol* 242(4):535–560.

Goldman-Rakic, P. S., & Schwartz, M. L. (1982) Interdigitation of contralateral and ipsilateral columnar projections to frontal association cortex in primates. *Science*, Vol 216, Issue 4547, 755-757.

Grabowski, T. J., Damasio, H., & Damasio, A. R. (1998). Premotor and prefrontal correlates of category-related lexical retrieval. *Neuroimage*, 7, 232-243.

Grafman, J., Holyoak, K. J., & Boller, F. (1995). Structure and Functions of the Human Prefrontal Cortex. *Annals of the New York Academy of Sciences*. Vol. 769.

Grafman, J, Litvan, I, Massaquoi, S, Stewart, M, Sirigu, A., & Hallett, M. (1992). Cognitive planning deficit in patients with cerebellar atrophy. *Neurology*. 42(8):1493-6.

Grant, D. A., & Berg, E. A. (1948). A behavioural analysis of degree of reinforcement and ease of shifting to new responses in a Weigl-type card sorting problem. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 404-411.

Gratch, G., & Landers, W. F. (1971). Stage IV of Piaget's theory of infant's object concepts: a longitudinal study. *Child development*, 42, 359-372.

Gross, J., Schmitz, F., Schnitzler, I., Kessler, K., Shapiro, K., Hommel, B. & Schnitzler, A. (2004). Modulation of long-range neural synchrony reflects temporal limitations of visual attention in humans. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 101, 13050–13055.

Guevara, M.A., & Hernández-González, M. (2006). Registro y análisis automatizado de señales bioeléctricas cerebrales durante la ejecución sexual. Universidad de Guadalajara. México.

Guevara, M.A., Hernández-González, M., & Durán, H. P. (2004). La corteza prefrontal: comparaciones anatomo-funcionales entre humanos y animales. Aproximaciones al estudio de la corteza prefrontal. Universidad de Guadalajara.

Giguere, M., & Goldman-Rakic, P. S. (1988). Mediodorsal nucleus: areal, laminar, and tangential distribution of afferents and efferents in the frontal lobe of rhesus monkeys. *J Comp Neurol*, 277, 195-213.

Haber, S. N. , Wolfe, D. P., & Groenewegen, H. J. (1990). The relationship between ventral striatal efferent fibers and the distribution of peptide-positive woolly fibers in the forebrain of the rhesus monkey. *Neuroscience*, 39, 323-338.

Haber, S. N., Lynd, B. E., & Mitchells, S. J. (1993). The organization of the descending ventral pallidal projections in the monkey. *J Comp Neurol*, 329, 111-128.

Handley, S., Capon, A., Capon, C., & Harper, C. (2002). Conditional reasoning and the Tower of Hanoi: The role of spatial and verbal working memory. *British Journal of Psychology*, 93, 501-518.

Hanes, K. R., Andrewes, D. G., Smith, D., J., & Pantelis, C. (1996). A brief assessment of executive control dysfunction: Discriminant validity and homogeneity of planning, set shift and fluency measures. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 11, 185-191.

Heindel, W. C., Salmon, D. P., & Shults, C. W. (1989). Neuropsychological evidence for multiple implicit memory systems: A comparison of Alzheimer's, Huntington's and Parkinson's disease patients. *Journal of Neuroscience*, 9, 582-587.

Hitch, Towse, & Hutton (2001). What limits children's working memory span? Theoretical accounts and applications for scholastic development. *J Exp Psychol Gen.* 130(2):184-98.

Holmes, G. (1938). The cerebral integration of ocular movements. *British Medical Journal*: 2, 107-112.

Huttenlocher, P. R., & de Courten, C. (1987). The development of synapses in striate cortex of man. *Human Neurobiology*, 6, 1-9.

Huettel, S. A., Song, A. W., & McCarthy, G. (2005). Decisions under Uncertainty: Probabilistic Context Influences Activation of Prefrontal and Parietal Cortices. *Brain Imaging and Analysis Center, Duke University, Durham, North Carolina, & Department of Veterans Affairs Medical Center, Durham, North, Carolina. The Journal of Neuroscience*, 25(13):3304–3311.

Huttenlocher, P. R. (1979) Synaptic density in human frontal cortex--developmental changes and effects of aging. *Brain Research*, 163, 195-205.

Huttenlocher, P. R., De Courten, C., Garey, L. J., & Van der Loos, H. (1982). Synaptogenesis in human visual cortex--evidence for synapse elimination during normal development. *Neurosci Lett*. 33(3):247-52.

Huttenlocher, P. R. (1990). Morphometric study of human cerebral cortex development. *Neuropsychologia* 28, 517-27.

Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Developmental Anatomy of Prefrontal Cortex. In: Krasnegor N.; Lyon R. G. & S. Goldman-Rakic P. (1997). *Development of the Prefrontal Cortex. Evolution, Neurobiology, and behavior*. Ed. Paul H. Brookes Publishing Co. Inc. Baltimore, Maryland.

Hyvärinen, J. (1982). The parietal cortex of monkey and man. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Germany.

Ilinsky, I. A., Jouandet, M. L., & Goldman Rakic, P.S. (1985). Organization of the nigrothalamocortical system in the rhesus monkey. *J. Comp. Neurol*. 165: 401-16.

Inhelder, B., & Piaget, J. (1958). *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence*. New York: Basic Books, Inc.

Jacobsen, C. F. (1935). Functions of the frontal association areas in primates. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 33, 558-560.

Jacobson, S., Butters, N., & Tovsky, N. J. (1978). Afferent and efferent subcortical projections of behaviorally defined sectors of prefrontal granular cortex. *Brain Res*. 159: 279-96.

Jae-Jin Kim, Jun Soo Kwon, Hae Jeong Park, Tak Youn, Do Hyung Kang, Myung Sun Kim, Dong Soo Lee, & Myung Chul Lee (2003). Functional Disconnection Between the Prefrontal and Parietal Cortices During Working Memory Processing in Schizophrenia. *Am J Psychiatry*; 160:919–923.

Jouandet, M., & Gazzaniga, M. S. (1979). The frontal lobes. In M. S. Gazzaniga (Ed.), *Handbook of behavioral neurology: Vol. 2. Neuropsychology* (pp. 25-59). New York: Plenum.

Kahney, H. (1993). *Problem solving: Current issues*. Buckingham: Open Univ. Press. (2<sup>nd</sup>Ed.)

Kemp, J. M., & Powell, T. P. (1970). The cortico-striate projection in the monkey. *Brain* 93, 525-46.

Khokhryakova, M. (1979). Structural organization of the prefrontal cortex in cats and its differences from that in monkeys. *Neurosci. Behav. Physiol.* 9:103-109.

Kievit, J., & Kuypers, H. G. J. M. (1977). Organization of the thalamocortical connections to the frontal lobe in the rhesus monkey. *Exp. Brain Res.* 29: 229-322.

Kimberg, D. Y., & Farah, M. J. (1993). A unified account of cognitive impairments following frontal lobe damage: The role of working memory in complex, organized behaviour. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122, 411-428.

Klahr, D. (1989). Information-processing approaches. In R. Vasta (Ed.), *Annals of child development: Vol. 6. Six theories of child development: Revised formulations and current issues* (pp. 133-185). Greenwich, CP JAI.

Klimesch, W., Pfurtscheller, G., Mohl, W., & Schimke, H. (1990). Event related desynchronization, ERD-mapping and hemispheric differences for words and numbers. *Int. J. Psychophysiol.* 8, 297-308.

Klingberg, T., Vaidya, C. J., Gabrieli, J. D., Moseley, M. E., & Hedehus M. (1999). Myelination and organization of the frontal white matter in children: a diffusion tensor MRI study. *Neuroreport.* 10 (13):2817-21.

Kochanska, G., Murray, K. T., & Harlan, E. T. (2000). Effortful control in early childhood: continuity and change, antecedents, and implications for social development. *Developmental Psychology*, 36, 220-232.

Koechlin, E., Basso, G., Peitriani, P., Panzer, S., & Grafman, J. (1999). The role of the anterior prefrontal cortex in human cognition. *Nature*, 399, 148-151.

Koenderink, M. J., Uylings, H. B. M., & Mrzljak, L. (1994). Postnatal maturation of the layer III pyramidal neurons in the human prefrontal cortex: a quantitative Golgi analysis. *Brain Research*, 653, 173-182.

Kostovic, I., Shavic, J., & Strinovic, D. (1988). Acetylcholinesterase in the human frontal associative cortex during the period of cognitive development: early laminar shifts and late innervation of pyramidal neurons. *Neuroscience Letters.* 90, 107-112.

Kostovic, I. (1990). Structural and histochemical reorganization of the human prefrontal cortex during perinatal and postnatal life. *Progress and brain research*, 85, 223-240.

Krasnegor, N., Lyon, R. G., & Goldman-Rakic, P. S. (1997). *Development of the Prefrontal Cortex. Evolution, Neurobiology, and behavior*. Ed. Paul H. Brookes Publishing Co. Inc. Baltimore, Maryland.

Krieg, W.J.S. (1963). *Connections of the Cerebral Cortex*. Brain Books, Chicago, I. L.

Krikorian, R., Bartok, J., & Gay, N. (1994). Tower of London procedure: A standard method and developmental data. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 16 (6), 840-850.

Kuo, J. S. & Carpenter, M. B. (1973). Organization of pallidothalamic projections in the rhesus monkey. *J. Comp. Neurol.* 151: 201-36.

Kwon, H., Reiss, A. L., & Menton, V. (2002). Neural Basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. En *Proceedings of the National Academy of Sciences of the Unites States of America*, 99: 13336-13341.

León Carrión, J., & Barroso y Martín, J. (2001). La Torre de Hanoi/Sevilla: una prueba para evaluar las funciones ejecutivas, la capacidad para resolver problemas y los recursos cognitivos. *Revista Española de Neuropsicología* 3, 4: 63-72.

Lezak, M. (1982). The problems of assessing executive functions. *Int J Psychol*;17:281-297.

Luna, B. B., Garver, K. E., Urban, T. A., Lazar, N. A., & Sweeney, J. A. (2004). Maturation of Cognitive Processes From Late Childhood to Adulthood. *Child Development*, Volume 75, Number 5, Pages 1357 – 1372.

Luria, A. R. (1966). *Higher cortical functions in man*. Ed. English translation by Haigh B. of 1<sup>st</sup> Russian edition (Moscow University Press, Moscow). New York: Basic Books and Plenum Press, 1966.

Marosi, E., Harmony, T., Sánchez, L., Becker, J., Bernal, J., Reyes, A., Díaz de León, A. E., Rodríguez, M., & Fernández, T. (1992). Maturation of the coherence of eeg activity in normal and learning-disabled children. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, 83, pp. 350-357.

Matute, E., Chamorro, Y., Inozemtseva, O., Barrios, O., Rosselli, M., & Ardila, A. (2008). Efecto de la edad en una tarea de planificación y organización ('pirámide de México') en escolares. *Rev neurol*; 47 (2): 61-70.

Matute-Villaseñor, E., Roselli, M., Ardila, A., & Ostrosky-Solís, F. (2007). *Evaluación Neuropsicológica Infantil (ENI)*. Ed. Manual Moderno, México.

Mazzocco, M. M., Hagerman, R. J., Cronister, S. A., & Pennington, B. F. (1992). Problem solving limitations among cytogenetically expressing Fragile X-women. *American Journal of medical genetics*, 43, 78-86.

Medoff, D., & McIntosh, R. (2000). *Neural Networks: Neural Systems I. Images in Neuroscience*. *Am J Psychiatry* 157:877.

Menon, V., Rivera, S. M., White, C. D., Glover, G.H., & Reiss, A. L. (1999). Dissociating Prefrontal and Parietal Cortex Activation during Arithmetic Processing. Department of Psychiatry & Behavioral Sciences and †Department of Radiology, Stanford University School of Medicine, Stanford, California.

Mesulam, M. M. (1990). Large-scale neurocognitive networks and distributed processing for attention, language, and memory. *Ann Neuro*. 28(5):597-613.

Metcalf, J., & Mischel, W. (1999). A hot/cool-system analysis of delay of gratification: dynamics of willpower. *Psychol Rev*. 106(1):3-19.

Miyake, A., Friedman, N., Emerson, M., Witzki, A., Howerter, & Wager, T. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Task: A latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology* 41, 49-100.

Mizuhara, H., Wang, L.Q., Kobayashi, K., & Yamaguchi, Y. (2005). Longrange EEG phase synchronization during an arithmetic task indexes a coherent cortical network simultaneously measured by fMRI. *Neuroimage* 27, 553–563.

Mizuhara, H., & Yamaguchi, Y. (2007). Human cortical circuits for central executive function emerge by theta phase synchronization. *NeuroImage* 36, 232–244.

Mrzljak, L., Uylings, H. B. M., Van Eden, C. G., & Judas, M. (1990). Neuronal development in human prefrontal cortex in prenatal and postnatal status. In: H. B. M Uylings, C. G. Van Eden, J. P. C. de Bruin, M. A. Corner, and M. C. P. Feenstra (Eds.), *The Prefrontal Cortex: Its Structure, Function, and Pathology*. *Progress in Brain Research*, Vol. 85 (pp. 185-222). Amsterdam: Elsevier.

Nauta, E. J. H. (1971). The problem of the frontal lobe: A reinterpretation. *Journal of psychiatric Research*, 8, 167-187.

Neal, J. W., Pearson, R. C., & Powell, T. P. (1990). The connections of area PG, 7a, with cortex in the parietal, occipital and temporal lobes of the monkey. *Brain Res*. 532(1-2):249-64.

Newell, A., Shaw, J. C., & Simon, H. A. (1958). Elements of a theory of human problem solving. *Psychological Review*, 65, 151-166.

Newell, A., & Simon, H. (1972). *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action: Willed and automatic control of behaviour. In Davidson, R. J., Schwartz, G. E., and Shapiro, D., editors, *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory*. Plenum Press.
- Nuwer, M. R. (1992). On the process for evaluating proposed new diagnostic tests. *Brain Topography*, 4: 243–247.
- Newman, S., Carpenter, P., Varma, S., & Adam, J. (2003). Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London: Fmri and computational modeling of planning and high-level perception. *Neuropsychologia* 41 1668-1682.
- Nunez, P. (1981). *Electric Fields of the Brain: the Neurophysics of EEG*. Oxford University Press, New York.
- Ostrosky-Solís, F., Ardila, A., & Roselli, M. (1997). Evaluación Neuropsicológica Breve en Español (NEUROPSI) Publingenio, S. A. de C. V. México, D.F.
- Ozzonoff, S., Pennington, B. F., & Rogers, S. J. (1991). Executive functions deficits in high-functioning autistic individuals; Relationship to theory of mind. *Journal of child Psychology*, 32, 1081-1105.
- Otero, G. (2001). *Ontogenia y maduración del Electroencefalograma*. Texto de Neurociencias Cognitivas. Manual Moderno. Guadalajara, Jalisco.
- Pandya, D. N. & Kuypers, H. G. (1969). Cortico cortical connections in the rhesus monkey. *Brain Res.* (1):13-36.
- Pandya, D. N., & Barnes, C. L. (1987). Architecture and connections of the frontal lobe. In E. Perecman (Ed.), *The frontal lobes revisited* (pp. 41-72). New York: IRBN Press.
- Pandya D. N., & Yeterian, E. H. (1996). Morphological correlations of human and monkey frontal lobes. In A. R. Damasio, H. Damasio, & Y. Christen (Eds.), *Neurobiology of decision making* (pp. 13-46). New York: Springer.
- Peele, T. L. (1942). cytoarchitecture of individual parietal areas in the monkey (macaca mulatta) and the distribution of the efferents fibers. *J. Comp Neurol* 77: 693-738.
- Petras, J. M. (1971) Connections of the parietal lobe. *J Psychiatr Res.* (3):189-201.
- Petrides, M., & Pandya, D. N. (1984). Projections to the frontal cortex from the posterior parietal region in the rhesus monkey. *J Comp Neurol.* 228(1):105-16.
- Petrides, M., & Pandya, D. N. (1999). Dorsolateral prefrontal cortex: comparative cytoarchitectonic analysis in the human and the macaque brain and corticocortical connection patterns. *Eur J Neurosci* 11:1011–1036

Piaget, J. (1936). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel-Paris: Delachaux-Niestlé (Trad.cast. *El nacimiento de la inteligencia en el niño*, Madrid, Aguilar, 1972).

Portellano, J. A. (2005). *Introducción a la neuropsicología*. Ed. Mcgrawhill. Madrid, España.

Quintana, J., & Fuster, J. M. (1999) From perception to action: Temporal integrative functions of prefrontal and parietal neurons. *Cerebral Cortex*, 9:213-221.

Ramnani, N., & Owen, A. M. (2004). Anterior prefrontal cortex: insights into function from anatomy and neuroimagen. *Nat Rev Neurosci* 5(3):184-94.

Raz, N., Gunning-Dixon, F. M., Head, D., Dupuis, J. H., & Acker J. D. (1998). Neuroanatomical correlates of cognitive aging: evidence from structural magnetic resonance imaging. *Neuropsychology*. 12(1):95-114.

Restak, M. D. (2001). *The adolescent brain. The secret life of the brain*. Ed. Joseph Henry Press. P. p. 71-107. United States of America.

Rolls, E. T. (1996). The orbitofrontal cortex. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 351, 1433, 1444.

Rolls, E. T. (2000). The orbitofrontal cortex and reward. *Cerebral Cortex*, 10, 284-294.

Rose, J. E., & Woolsey, C. N. (1948). The orbitofrontal cortex and its connections with the mediodorsal nucleus in rabbit, sheep and cat. *Research Publications – Association for Research in Nervous and Mental Disease*. 27:210–232.

Rosser, R. (1994). The developmental course of spatial cognition: evidence for domain multidimensionality. *Child Study Journal*, 24 (4), 255-80.

Rutter, M., & Marjorie (1993). *Developing Minds: Challenge and Continuity Across the Life Span*. (New York: Harper Collins).

Sanides (1970). Functional architecture of motor en sensory cortices in primates in the light of a new concept of neocortex development. In C. R. Noback & W. Montana (Eds.), *Advances in primatology* (Vol. 1, pp. 137-208). New York: Appleton-Century-Crofts.

Sarnthein, J., Petsche, H., Rappelsberger, P., Shaw, G. L., & Von Stein, A. (1998). Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory. *Neurobiology* Vol. 95, pp. 7092–7096.

Sasaki, K., Jinnay, K., Gemba, H., Hashimoto, S., & Mizuno, N. (1979). Projection of the cerebellar dentate nucleus onto the frontal association cortex in monkeys. *Experimental Brain Research* 37, 193-8.



Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, B298: 199-209.

Shallice, T. (1994). Multiple levels of control processes. In C. Ulmitá and M. Moscovitch (Eds.), *Attention and Performance*, XV. London: MIT Press, pp. 13-26.

Schuepbach, D., Merlo, M. C. G., Goenner, F., Staikov, I., Mattle, H. P., Dierks, T., & Brenner, H. D. (2002). Cerebral hemodynamic response induced by the Tower of Hanoi puzzle and the Wisconsin Card Sorting test. *Neuropsychologia*. 40:39-53.

Selemon, L. D., & Goldman Rakic, P. S. (1985). Longitudinal topography and interdigitation of cortico-striatal projections in the rhesus monkey. *J. Neurosci*. 5: 776-94.

Seltzer, B., & Pandya, D. N. (1989). Frontal lobe connections of the superior temporal sulcus in the rhesus monkey. *J Comp Neurol*. 1989 Mar 1; 281 (1):97-113.

Seltzer, B., & Pandya, D. N. (1984). Further observations on parieto-temporal connections in the rhesus monkey. *Exp Brain Res*. 1984; 55 (2):301-12.

Shallice, T. (1988). *From Neuropsychology to mental structure*. New York: Cambridge Univ. Press.

Shallice, T. (1994). Multiple levels of control processes. In C. Ulmitá and M. Moscovitch (Eds.), *Attention and Performance*, XV. London: MIT Press, pp. 13-26.

Schnirman, Welsh, & Retzlaff (1998). Development of the Tower of London-Revised. *Assessment*. (4):355-60.

Sholl, D.A. (1956). *The Organization of the Cerebral Cortex*. Wiley, New York.

Simon, H. T. (1975). The functional equivalence of problem solving skills. *Cognitive Psychology*, 7, 268-288.

Smith, Y., Hazrati, L. N. & Parent, A. (1990). Efferent projections of the subthalamic nucleus in the squirrel monkey as studied by the PHA-L anterograde tracing method. *J Comp Neurol*, 294, 306-323.

Soprano, A. M. (2003). Evaluation of executive functions in children. *Rev Neurol*. 1-15; 37(1):44-50.

Sowell, M., Thompson, D., Tessner, & W., Toga (2001). Mapping Continued Brain Growth and Gray Matter Density Reduction in Dorsal Frontal Cortex: Inverse Relationships during Postadolescent Brain Maturation. *The Journal of Neuroscience*, 21(22):8819–8829.

Stroop, J. R. (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 643-662.

Stuss, & Benson (1984). Neuropsychological Studies of the Frontal Lobes. *Psychological Bulletin*. Vol. 95. No. 1, 3-28.

Stuss, D.T., & Alexander, M.P. (1999). Affectively burnt in: A proposed role of the right frontal lobe. In E. Tulving (Ed.), *Memory, Consciousness and the Brain: The Tallinn Conference* (pp.215-227). Philadelphia: Psychology Press.

Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000)Executive functions and the frontal lobes: conceptual view. *Psychol Res.*; 63(3-4):289-98.

Stuss, D. T., & Levine, B. (2002). Adult clinical neuropsychology: Lessons from studies of the frontal lobes. *Annual Review of Psychology*, 53, 401-433.

Stuss, D. (2007). *New Approaches to Prefrontal Lobe Testing*. In: Miller, B., & Cummings, J. (Eds.) *The Human Frontal Lobes*, 2nd Edition . The Rotman Research Institute, Baycrest Centre for Geriatric Care. University of Toronto.

Szabo (1962). Topical distribution of the striatal efferents in the monkey. *Exp. Neurol.* 19: 463-76.

Szentfigothai, J. (1978). The neural network of the cerebral cortex: a functional interpretation. *Proc. roy. Soc. Lond.* 201: 219-248.

Tekin, S., & Cummings, J. (2002). Frontal-Subcortical neural circuits and clinical neuropsychiatry. An update. *Journal of Psychosom Research*: 53: 647-654.

Thatcher, R. W., Krause, P. J., & Hrybyk, M. (1986). Cortico-cortical associations and EEG coherence: a two-compartmental model. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* , 64:123-143 123.

Thatcher, R. W., Walker, R. A., & Giudice, S. (1987). Human cerebral hemispheres develop at different rates and ages. *Science* 230, 1110-13.

Thomas, K. M., King, S. W., Franzen, P. L., Welsh, T. F., Berkowitz, A. L., Noll, D. C., Birmaher, V., & Casey, B. J. (1999). A developmental functional MRI study of spatial working memory. *Neuroimage* 10: 327–338.

Tirapu-Ustárrroz, J., Muñoz-Céspedes, J., Pelegrín-Valero, C., & Albéniz-Ferreras, A. (2005). Propuesta de un protocolo para la evaluación de las funciones ejecutivas. *Revista de neurología*. 41:475-484.

Travis, F. (1998). Cortical and cognitive development in 4th, 8th and 12th grade students. The contribution of speed of processing and executive functioning to cognitive development. *Biol Psychol.* 48(1):37-56.

Vendrell, P., Junqué, C., Pujol, J., Jurado, M., Molet, J., & Grafman, J. (1995). The prefrontal regions in the stroop task. *Neuropsychology*, Vol. 33, No. 3, pp. 341-352.

- Vogt, B. A., & Pandya, D. N. (1987). Cingulate cortex of the rhesus monkey: II. Cortical afferents. *Journal of Comparative Neurology* 262, 271-89.
- Walker, R., Husain, M., Hodgson, T. L., Harrison, J. & Kennard C. (1998). Saccadic eye movement and working memory deficits following damage to human prefrontal cortex. *Neuropsychologia*: 26; 1141-1159.
- Walter, G. W. (1938). The technique and application of Electro-encephalography. *J Neurol Psychiatry*. (4): 359–385.
- Walter, W. G., & Dovey, V. J. (1944). Electro-encephalography in cases of sub-cortical tumour . *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 7(3-4): 57–65.
- Welsh, M. C., Pennington, B. F., Ozonoff, S., McCabe, E. R., & Rouse, B. (1990). Neuropsychology of early-treated phenylketonuria: Specific executive function deficits. *Child Development*, 61, 1697-1713.
- Welsh, M. C., Pennington, B. F., & Groisser, D. B. (1991). A normative developmental study of executive function: a window on prefrontal function in children. *Developmental Neuropsychology*, 7, 131-149.
- Welsh, M. C., Cicerello, A., Cuneo, K., & Brennan, M. (1994). Error and temporal patterns in Tower of Hanoi performance: Cognitive mechanisms and individual differences. *The Journal of General Psychology*, 122, 69-81.
- Welsh, M., & Huizinga, M. (2001) The development and preliminary validation of the tower of hanoi-revised. *Psychological Assessment*. Vol. 8, No. 2, 167-176.
- Wiesendanger, M. (1981). Organization of the secondary motor areas of the cerebral cortex. In V. B. Brooks (ed.), *Handbook of Physiology: The Nervous System* (Vol. 2: Motor Control). Bethesda, M.D: American Physiological Society.
- Yakovlev, P. I., & LeCours, A. R. (1967). The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In A. Minkowsky (Ed.), *Regional development of the brain in early life* (pp. 3-70). Oxford, England: Blackwell Scientific Publications.
- Zelazo, P. D., Frye D., & Rapus, T. (1996). An age related dissociation between knowing rules and using them. *Cognitive development*, 11, 37-63.
- Zelazo, P. D., & Müller, U. (2002). Executive function in typical and atypical development. In U. Goswami (Ed.), *Handbook of Childhood Cognitive Development* (pp. 445-469). Oxford: Blackwell.

## APÉNDICE