



Universidad
Zaragoza

**EVALUACIÓN DE LA MOTILIDAD OCULAR
MEDIANTE EYE TRACKER**

**OCULAR MOVEMENTS ASSESSMENT THROUGH
THE EYE TRACKER**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Autora

AITANA NAVARRO MARQUÉS

Directora

ELVIRA ORDUNA HOSPITAL

FACULTAD DE CIENCIAS 2021-2022

ABREVIATURAS

AV: Agudeza visual.

CC: Coeficiente de correlación.

DEM: Development eye movement.

DIP: Distancia interpupilar.

OD: Ojo derecho.

OI: Ojo izquierdo.

p: Significación estadística.

PPC: Punto próximo de convergencia.

VF: Vergencias fusionales.

VFN: Vergencias fusionales negativas.

VFP: Vergencias fusionales positivas.

VL: Visión lejana.

VP: Visión próxima.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.1. MOTILIDAD OCULAR	3
1.2. DISFUNCIONES OCULOMOTORAS.	4
1.3. MOVIMIENTOS OCULARES DURANTE LA LECTURA.....	5
1.4. TEST DEVELOPMENTAL EYE MOVEMENT (DEM)	5
1.5. EYE TRACKER.....	9
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	10
2.1. HIPÓTESIS	10
2.2. OBJETIVOS	10
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	10
3.1. SELECCIÓN DE LA MUESTRA	10
3.2. EXAMEN OPTOMÉTRICO.....	11
3.3. PROTOCOLO EXPLORATORIO	13
3.4. RECOPIACIÓN DE DATOS.....	13
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	15
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	16
5. DISCUSIÓN.....	19
6. CONCLUSIONES.....	22
7. BIBLIOGRAFÍA	23

1. Introducción

Hoy en día la gran mayoría de actividades que realizamos requieren un desempeño visual muy alto, ya que a través del sentido de la vista entra la mayor parte de la información que percibimos, siendo una de las principales capacidades sensoriales para aprender y relacionarnos con nuestro entorno.

Una función que debemos tener bien integrada desde una edad temprana es la capacidad lectora, ya que las dificultades en la lectura tienen una repercusión significativa en el éxito tanto académico como laboral. En esta actividad juegan un papel muy importante los movimientos oculares, dado que al leer se realizan sacádicos, fijaciones y movimientos de retroceso o regresiones, que requieren que ambos ojos se muevan y trabajen de forma sincrónica y efectiva.

1.1. Motilidad ocular

Se considera motilidad ocular a todos los movimientos automáticos, instintivos y coordinados que realizan ambos ojos de una persona, permitiendo que trabajen de manera conjunta.

La distancia que existe entre la posición de ambos ojos hace que cada uno de ellos perciba una imagen, estas dos imágenes se envían por medio del sistema visual a la corteza occipital, donde se integran y se convierten en una sola imagen tridimensional que nuestro cerebro interpreta, esto se conoce como visión binocular. (1)

Ducciones	Movimientos que se realizan de forma monocular.
Versiones	Movimientos binoculares conjugados en la misma dirección.
Vergencias	Movimiento conjugado de ambos ojos que se mueven de forma sincronizada en direcciones opuestas. Hay dos tipos, convergencia y divergencia. (3)
Seguimientos	Son movimientos oculares lentos y conjugados que tienen como función mantener la fijación de un objeto en movimiento. Se desarrollan entre las 7 semanas y los 6 meses de edad. (4)
Sacádicos	Los movimientos sacádicos nos permiten dirigir de manera rápida la línea de mirada a un punto de interés o mover los ojos de un objeto a otro. Estos movimientos son saltatorios, cortos, voluntarios, conjugados y rápidos (hasta 700° por segundo). Dichos movimientos son capaces de cambiar la fijación foveal y seguir objetos en el campo visual que sean de mayor interés. (4)

Fijación	Es la acción de mantener sobre la fovea la imagen de un objeto inmóvil cuando la cabeza se encuentra estacionaria. Ello implica la supresión de cualquier otro reflejo oculomotor que estuviera actuando en ese momento. Evaluamos la fijación mediante pruebas como el Cover Test o simplemente observando cómo fija un sujeto durante unos 10 segundos. (5) (6)
----------	--

La función de los movimientos oculares es conducir estímulos visuales del campo visual periférico, al campo visual central y poder mantener la fijación foveal de un objeto en movimiento. Esta captación y afianzamiento de las imágenes por la fovea y su estabilización en ella durante los movimientos de cabeza, constituyen las funciones básicas de la motilidad ocular. (2)

Dependiendo de la acción que vayamos a realizar se realizara un tipo de movimiento ocular u otro. Los movimientos se clasifican en las siguientes categorías:

1.2. Disfunciones oculomotoras.

Las disfunciones oculomotoras son unas anomalías funcionales que no tienen un fondo patológico, sino que son producidas por pequeñas variaciones de la visión binocular, como pueden ser problemas vergenciales, acomodativos o movimientos sacádicos y seguimientos inapropiados.

Dichas disfunciones suelen producirse por circunstancias como:

- **Desajustes en la conformación de las estructuras que integran el sistema visual** en forma de trastornos refractivos como miopía, astigmatismo, hipermetropía, etc.
- **Interferencias en el correcto desarrollo del sistema visual** que impida alcanzar las capacidades de funcionamiento normal, como la ambliopía, estrabismos, trastornos oculomotores, etc.
- **Disfunciones por un desequilibrio del sistema** como consecuencia de la realización de tareas que exijan altas demandas de funcionamiento que sobrepasen las reservas fusionales.

Algunas de las consecuencias que tienen estas disfunciones oculomotoras son: omitir palabras, lentitud de lectura, invertir letras, utilizar el dedo para no perderse o acercarse demasiado el material de lectura. (7)

Las disfunciones oculomotoras no se suelen presentar de forma aislada, sino que suelen estar asociadas con disfunciones vergenciales y/o acomodativas. Este trabajo está centrado en las primeras, por lo que las más comunes son:

- Disfunción en los sacádicos, se produce cuando el sujeto no dirige bien la mirada hacia un punto, dichos movimientos son lentos e imprecisos, el sujeto tiene que corregir cada movimiento que hace con refijaciones o no es capaz de hacer un solo sacádico, sino que tiene que realizar varios pequeños saltos.
- Disfunciones en los seguimientos, no tienen capacidad para realizar movimientos suaves y continuados, dan saltos entre palabras, lo que conlleva muchas veces que necesiten el dedo como guía para leer. (8)

1.3. Movimientos oculares durante la lectura

La lectura se define como ``la actividad que consiste en interpretar y descifrar, mediante la vista, el valor fónico de una serie de signos escritos, ya sea mentalmente (en silencio) o en voz alta (oral)´´. (9)

Durante la lectura, la información visual que proporciona el texto se extrae mediante tres tipos de movimientos fundamentales. En primer lugar, los ojos recorren el texto dando pequeños saltos denominados **sacádicos**. Estos movimientos varían en amplitud y distancia a lo largo de cada línea, dependiendo de la longitud y el espaciado de las palabras. A menor espacio entre cada palabra, mayor precisión de fijación y mayor facilidad para leer.

Después están las pausas de fijación, las **fijaciones** constituyen el 90% del tiempo total de la lectura, diversos estudios han estimado que se realizan de 5 a 7 fijaciones por línea. De hecho, es durante estas pausas de fijación cuando se capta realmente la información visual más relevante.

Por último, están los **movimientos de regresión**, estos movimientos son como los sacádicos, pero se ejecutan hacia atrás. Constituyen sobre el 5-15% de todos los movimientos que se realizan durante la lectura y se utilizan para corregir los errores en la incorrecta lectura de palabras, para dar un vistazo a un detalle interesante anterior o para verificar el significado de alguna palabra. Dichos movimientos tienen un papel crucial a la hora de comprender el texto. Hay estudios que muestran que en textos con mayor dificultad aparecen mayor número de regresiones. (10)

1.4. Test Developmental Eye Movement (DEM)

La prueba del test Developmental Eye Movement (DEM) es una prueba cronometrada subjetivamente por parte del examinador, que mide la habilidad visuo-verbal mediante la

evaluación de los movimientos oculares, en concreto de los movimientos sacádicos, a través de tres pruebas o sub-test.

Antes de realizar las tres láminas diagnósticas del DEM se realiza el Pre-test (Figura 1), donde se evalúa el conocimiento de los números, si en el Pre-test se cometen errores no se recomienda usar el DEM en ese paciente.

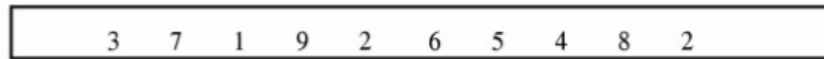


Figura 1. Pre-test DEM

Las dos primeras láminas son el Test A y el Test B, que implican una lectura vertical de 40 números cada una, colocados en dos columnas de 20 números cada una (Figura 2). Estas dos pruebas sirven para detectar problemas a nivel motor o de reconocimiento visuo-verbal de los números, ya que requieren automaticidad para reconocerlos.

La tercera prueba (Test C) corresponde a una lectura horizontal de 80 números dispuestos en 16 filas (Figura 2). En este Test C interviene la visión periférica para iniciar y terminar con precisión el sacádico y la amplitud de campo de fijación del mismo. (11)

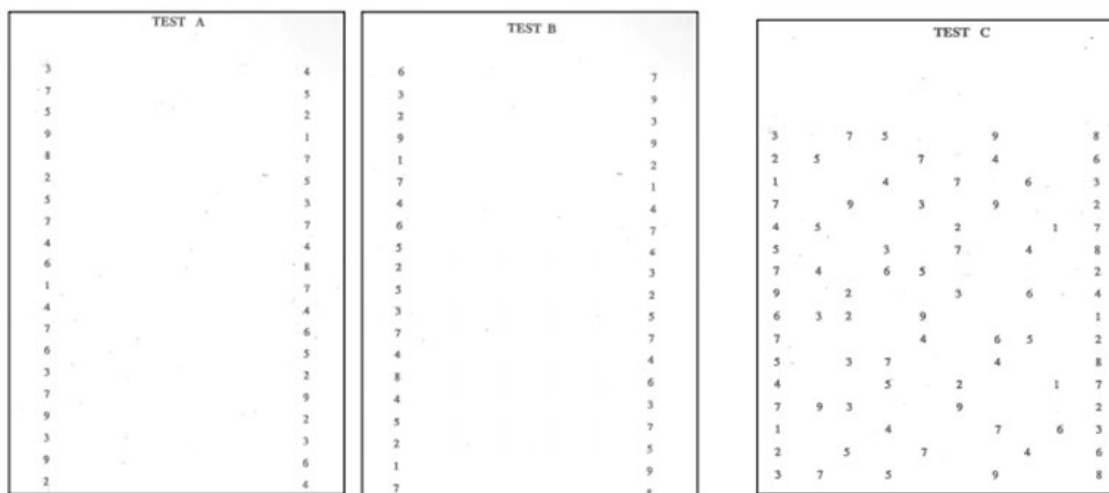


Figura 2. Las tres láminas diagnósticas del Test DEM. Test A, Test B y Test C.

La prueba completa consiste en que el sujeto lea todos los números de los Test A, Test B y Test C lo más rápido posible y en voz alta sin pausa, pero controlando e intentando no equivocarse o saltarse alguno (no puede utilizar el dedo para guiarse, es una habilidad puramente visual). Mientras tanto, el examinador anota los tiempos empleados por cada lámina vertical, horizontal y los errores cometidos, bien sean de supresión, sustitución o adición de algún número, por parte del sujeto en una plantilla específica (Figura 3). Posteriormente se realizan los cálculos

(fórmulas de la Figura 3) para comparar los resultados obtenidos con los valores de normalidad según la edad. (12)

El **tiempo vertical** se calcula sumando los tiempos de los test A y B.

Para calcular el **tiempo horizontal ajustado** se usa la siguiente fórmula:

$$TH = [tiempo * 80 / (80 - o + a)]$$

El parámetro “o” hace referencia a las omisiones y “a” son las adiciones.

Por último, el **ratio** se halla al dividir el tiempo horizontal ajustado entre el vertical:

$$Ratio = (TH / TV)$$

Una vez se han calculado estos parámetros se corrigen con ayuda de unas **tablas normativas** que muestran los **percentiles** según la edad del sujeto. (6) (5)

DEM SCORESHEET

NAME _____ DOB _____ AGE _____ GRADE _____

ARTICULATION PRE-TEST				Y		N		NUMBER KNOWLEDGE PRE-TEST				Y		N			
f = substitution error								o = omission error									
a = addition error								< or > = transposition error									
TEST A				TEST B				TEST C									
3	4	6	7	3	7	5	9	8	3	7	5	9	8				
7	5	3	9	2	5	7	4	6	2	5	7	4	6				
5	2	2	3	1	4	7	6	3	1	4	7	6	3				
9	1	9	9	7	9	3	9	2	7	9	3	9	2				
8	7	1	2	4	5	2	1	7	4	5	2	1	7				
2	5	7	1	5	3	7	4	8	5	3	7	4	8				
5	3	4	4	7	4	6	5	2	7	4	6	5	2				
7	7	6	7	9	2	3	6	4	9	2	3	6	4				
4	4	5	6	6	3	2	9	1	6	3	2	9	1				
6	8	2	3	7	4	6	5	2	7	4	6	5	2				
1	7	5	2	5	3	7	4	8	5	3	7	4	8				
4	4	3	5	4	5	2	1	7	4	5	2	1	7				
7	6	7	7	7	9	3	9	2	7	9	3	9	2				
6	5	4	4	1	4	7	6	3	1	4	7	6	3				
3	2	8	6	2	5	7	4	6	2	5	7	4	6				
7	9	4	3	3	7	5	9	8	3	7	5	9	8				
9	2	5	7									TIME: _____ sec					
3	3	2	5									_____ s-errors	_____ o errors				
9	6	1	9									_____ a errors	_____ t errors				
2	4	7	8									ADJ TIME = TIME x $\frac{80}{(80 - o + a)}$					
_____ sec	_____ sec									ADJ TIME = _____ sec							
TOTAL TIME: _____ sec												TOTAL ERRORS (s + o + a + t) = _____					
ADJ TIME: _____ sec																	
ERRORS: _____												RATIO = $\frac{\text{HORIZONTAL ADJ TIME}}{\text{VERTICAL ADJ TIME}}$ = _____					

Figura 3. Hoja de corrección del test DEM

Este test está relacionado con la velocidad de procesamiento visual y la capacidad de lectura, lo que indica que el test DEM puede ayudar a identificar a las personas con riesgo de retraso en la lectura. (13) Además, una mala ejecución de este test podría implicar un riesgo en el aprendizaje académico, ya que las habilidades oculomotoras y la atención visual no son de calidad o son inmaduras por la edad del sujeto. (12)

Una vez realizado el test y con los cálculos y percentiles obtenidos se pueden clasificar los resultados en **cuatro categorías**: (5)(6)

Tipo I	Ambos valores son normales. No hay ningún tipo de alteración.
Tipo II	El tiempo horizontal es alto y el vertical es normal. El cociente es mayor que el esperado, este tipo es característico en las disfunciones oculomotoras .
Tipo III	Tanto el tiempo vertical como el horizontal son superiores a los valores normales, pero el cociente entre ambos es normal. Representa la dificultad básica en la habilidad a la hora de nombrar números .
Tipo IV	Es una combinación del tipo I y II, los tiempos vertical y horizontal están fuera de lo normal y el cociente entre ambos también. En estos casos existe un problema tanto en la automaticidad como en las habilidades oculomotoras .

También existe un test DEM modificado para adultos, que consta de tres láminas llamadas Test V-1, Test V-2 y Test H, compuesto por números en decenas. Se realiza igual que el DEM tradicional, los dos primeros test (V-1 y V-2) se leen en vertical, y el tercero (H) en horizontal, se cronometra el tiempo de los tres y se cuentan los errores de adición, supresión y sustitución de números, al igual que en el anterior. (14)

<u>TEST V-1</u>		<u>TEST V-2</u>		<u>TEST H</u>				
32	43	61	76	32	74	53	96	82
71	56	34	92	25	51	74	43	65
54	21	26	33	18	45	75	62	38
96	14	93	95	71	93	36	94	21
81	75	12	24	44	54	21	16	73
25	54	71	19	57	36	78	47	86
53	39	46	44	70	47	63	51	29
74	72	65	72	93	20	39	63	42
43	43	58	61	66	30	21	94	15
67	81	29	36	79	47	63	51	28
14	76	57	25	52	33	72	48	81
49	47	35	58	43	54	23	16	74
76	62	76	74	76	93	36	91	27
62	59	44	47	19	46	76	65	30
37	93	84	66	22	59	71	43	63
73	23	43	31	35	76	54	94	86
67	34	41	76					
35	67	56	56	tiempo _____ seg.				
78	41	29	97	_____ sustituc.		_____ omisione		
91	18	18	85	_____ adiciones		_____ transpos.		
tiempo _____ seg.		tiempo _____ seg.						

Figura 4. Test DEM en adultos

1.5. Eye tracker.

El Eye tracker es un dispositivo electrónico, un rastreador ocular, que sirve para registrar y analizar los movimientos oculares para conocer, por ejemplo, la estabilización de la fijación. El Eye Tracker utiliza una luz infrarroja cercana al invisible y cámaras de alta definición para proyectar la luz en el ojo del sujeto y registrar la dirección en que se refleja en la córnea, respectivamente. Posteriormente, se utilizan algoritmos avanzados para calcular la posición del ojo y determinar exactamente dónde están mirando sus ejes visuales en una pantalla, en este caso, previamente calibrada para cada sujeto. Esto hace posible medir y estudiar el comportamiento visual y los movimientos oculares en cada posición, así como la posición de cada ojo y cómo se encuentran uno respecto al otro.

Algunas de las ventajas del Eye tracker son:

- Proporciona datos imparciales, objetivos y cuantificables, ya que elimina la necesidad de intentar recordar o explicar dónde se miró y evita que los participantes del estudio asuman detalles y den información incorrecta.
- Ofrece información en tiempo real, con la transmisión en vivo se puede ver la mirada de la persona inmediatamente. (15) En el caso de este estudio mientras la persona realiza el test DEM nosotros vamos viendo como realiza pequeñas sacudidas pasando de un

número a otro del test, de esta forma podemos ver si los movimientos son precisos, si realiza muchos movimientos de regresión o si fija bien la mirada.

2. Hipótesis y objetivos

2.1. Hipótesis

El test DEM para diagnóstico de disfunciones de la motilidad ocular es un test subjetivo por parte del examinador, en el que no se puede detectar dónde tiene exactamente los ojos el paciente, cuantificar las fijaciones o los sacádicos, ni medir la longitud de estos últimos. Por tanto, gracias a las nuevas tecnologías, se pretenden obtener datos objetivos de la motilidad ocular a partir del test DEM en una muestra de sujetos control medidos mediante Eye Tracker.

2.2. Objetivos

El objetivo principal del este trabajo es medir de forma objetiva con Eye Tracker los parámetros de la motilidad ocular que intervienen al realizar el test DEM en una muestra de sujetos control jóvenes sin disfunciones visuales.

Como objetivos específicos de las medidas con Eye tracker:

- Medir de manera objetiva el tiempo de realización del Test A, Test B y Test C.
- Cuantificar las fijaciones y sacádicos que se realizan al completar cada sub-test.
- Medir la amplitud y velocidad de los sacádicos durante la realización de cada sub-test.
- Valorar si existe correlación entre la velocidad y amplitud de los sacádicos del ojo derecho (OD) y la del ojo izquierdo (OI) al evaluar el Test C.
- Medir de forma objetiva y ver si existe correlación entre el diámetro pupilar del OD y la del OI durante la realización de todo el test.
- Medir objetivamente la distancia interpupilar (DIP) durante la realización de todo el test.
- Cálculo de percentiles para una edad media de 21 años.

3. Material y métodos

3.1. Selección de la muestra

El estudio se realizó siguiendo los principios establecidos en la Declaración de Helsinki y tras la aprobación del Comité Ético de Investigación Clínica de Aragón (CEICA). Una vez

explicado y firmado el consentimiento informado se realizó la batería de pruebas optométricas a los participantes.

Tras la selección de los candidatos se realizaron las pruebas optométricas previas al test DEM para asegurarnos que no padecían disfunciones de la visión binocular o patologías oculares. En este caso a la hora de seleccionar los sujetos de estudio buscamos que cumplieran los siguientes criterios de inclusión:

- Edad comprendida entre 18 y 30 años.
- Agudeza visual igual o mayor a 0,80.
- Error refractivo comprendido entre -6,00D y +3,00D.
- Pacientes sin patologías sistémicas ni oculares.

3.2. Examen optométrico.

Con el examen optométrico se evaluó la funcionalidad del sistema visual en conjunto, estas pruebas se realizaron con las condiciones de iluminación adecuadas para cada una y siempre por el mismo examinador.

Para realizar el examen optométrico el procedimiento fue el siguiente:

- Toma de la agudeza visual (AV) con su corrección: primero en visión lejana (VL) y después en visión próxima (VP). En VL se utilizaron los optotipos de Snellen proyectados a 6 metros y en VP una carta de optotipos situada según la distancia de lectura del paciente (aproximadamente a unos 40 cm).
- Cover test: tanto en VL como en VP, con estímulo de fijación una línea de AV inferior a la obtenida anteriormente para obtención del valor de la foria o tropia horizontal y vertical.
- Seguimientos (NSUCO): se evalúan con el sujeto de pie, de forma que tiene que fijar su atención en el objeto que se le presenta y seguirlo en todas las posiciones de mirada. Se evalúa la habilidad, la precisión, los movimientos de cabeza y los movimientos de cuerpo, asignándoles una puntuación entre 1 y 5 de forma subjetiva.
- Sacádicos (NSUCO): en este caso se realiza con dos objetos para que el sujeto vaya realizando cambios de fijación de uno a otro. Se evalúa la habilidad, la precisión, los movimientos de cabeza y los movimientos de cuerpo, asignándoles una puntuación entre 1 y 5 de forma subjetiva.

- Punto próximo de convergencia (PPC): se coloca un estímulo luminoso a 40 cm del paciente, se le pide que mantenga la fijación en él y poco a poco se va acercando a su nariz hasta que el paciente refiere ver doble o pierde la fijación, esta distancia será el punto de rotura. Una vez medida la distancia a la que el paciente ve doble, se aleja el estímulo hasta que vuelva a recuperar la visión única, este será el punto de recobro.
- Test de worth: esta prueba se realiza con una linterna que consta de 4 luces y unas gafas con filtros rojo/verde, tanto en VL como en VP. Se le pregunta al paciente cuantas luces ve y según su respuesta sabremos si fusiona o suprime algún ojo.
 - 4 luces: implica que el paciente presenta fusión.
 - 5 luces: no aparece fusión de las imágenes, dependiendo de la posición de las luces y los filtros sabremos si el paciente tiene una endo (imágenes descruzadas) o una exodesviación (imágenes cruzadas).
 - 3 luces: el paciente está suprimiendo el OD, que es el que lleva el filtro rojo.
 - 2 luces: el paciente suprime el OI, que es el que lleva el filtro verde.
- Medida de la estereopsis: es el tercer estadio de la visión binocular que es la capacidad de ver las imágenes en tres dimensiones. Para medir el nivel de estereopsis de una persona lo hacemos mediante el test de Randot.
- Medida de las vergencias fusionales (VF): para medirlas se utiliza una barra de prismas y un test de fijación para VL y otro para VP, según la distancia que estemos evaluando. En esta prueba es importante la colaboración del participante ya que tiene que indicar cuándo ve borroso (punto de borrosidad), cuando ve doble (punto de rotura) y cuando vuelve a ver una imagen (punto de recobro).
 - Vergencias fusionales negativas (VFN): Se miden las primeras, la medida se toma con una barra de prismas base nasal.
 - Vergencias fusionales positivas (VFP): se miden después de las negativas para evitar la estimulación de la acomodación, se realiza con prismas base temporal.
- Medida de la flexibilidad acomodativa y flexibilidad de vergencias: En el caso de la flexibilidad acomodativa se hace con un flipper de $\pm 2,00$ D y para la flexibilidad de vergencias con un flipper prismático de 3Δ base nasal y otro de 12Δ base temporal. Se anotan los ciclos por minutos que realiza cada paciente en VP.

3.3. Protocolo exploratorio

Una vez hecho el examen optométrico, y descartado cualquier problema vergencial o acomodativo, se evalúa la motilidad ocular mediante el Test DEM monitorizado con Eye Tracker (Tobii Pro Fusion, Tobii AB, Sweden).

Para poder llevar a cabo las pruebas se realizó un montaje experimental que constaba de una pantalla de 23 pulgadas, el Eye Tracker y una cabina con alto nivel de iluminación ambiental (1000 lux), que no variaba de un participante a otro (Figura 5).



Figura 5. Montaje de la pantalla y del Eye Tracker en la cabina de iluminación

El test DEM se digitalizó y calibró para el tamaño de la pantalla. Este test es subjetivo bajo el criterio del examinador, de esta forma hicimos que fuese objetivo ya que el Eye Tracker es capaz de medir con precisión los movimientos oculares, lo que nos dará mucha información sobre la precisión en posición, tamaño y tiempo de seguimientos, sacádicos y fijaciones.

Tras explicar a los participantes cómo hacer los 4 sub-test del DEM (Pre-test, Test A, Test B y Test C), les pedimos que leyeran los números en voz alta para grabar lo que iban diciendo y, de esta forma, poder apuntar los fallos, omisiones y el tiempo que habían tardado en completarlo. Realizaron los 4 sub-test en una misma grabación.

3.4. Recopilación de datos

Una vez realizado el test DEM completo a todos los sujetos, se revisaron y segmentaron todas las grabaciones con el programa **Tobii Pro Lab** (Tobii AB, Sweden). En él se fueron estableciendo los ‘eventos’, estos eventos correspondían con la primera fijación y la última que

realizaban los sujetos en cada sub-test, así la grabación quedaba segmentada en cuatro partes que se analizan por separado.

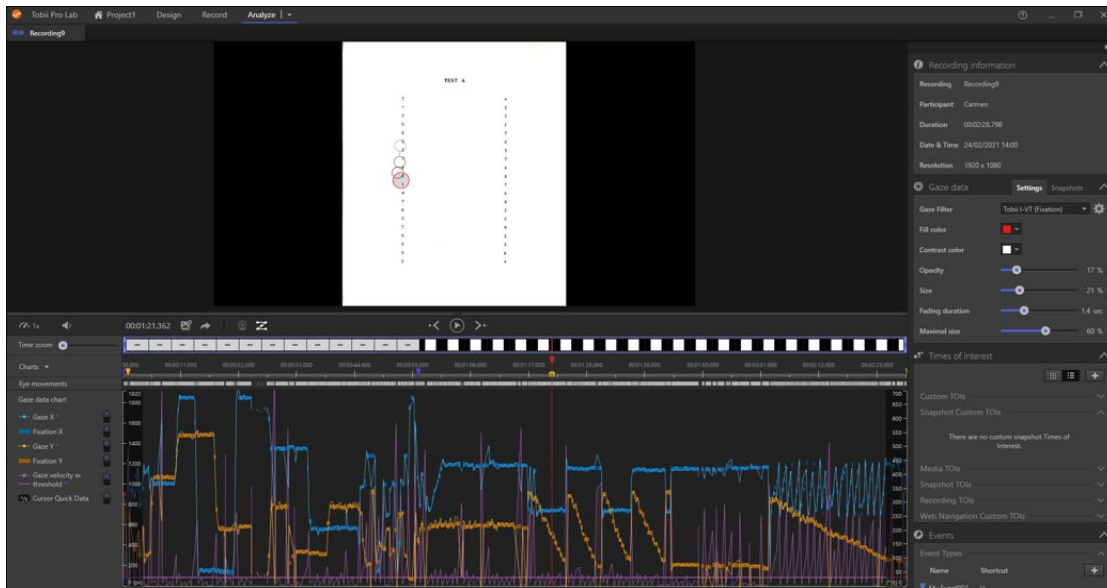


Figura 6. Segmentación en eventos de una grabación con el programa Tobii Pro Lab

Una vez que estaban todas las grabaciones segmentadas, se exportaron los datos de cada grabación (una por sujeto) a Excel (Microsoft® Office Excel 2011, Microsoft Corporation). Para analizar esos datos se diseñó un programa específico, el **Etracker Parse**, en el que se definieron los datos de interés a analizar. Con este programa se podían determinar las siguientes variables para cada sub-test por separado de un mismo sujeto gracias a los eventos establecidos en el primer programa:

- La duración de cada uno de los cuatro sub-test (s).
- El número de fijaciones y sacádicos en cada sub-test (n).
- La distancia interpupilar en cada momento (mm).
- El diámetro pupilar tanto del OD como del OI (mm).
- La velocidad de los sacádicos de cada ojo (m/s).
- La amplitud de los sacádicos de cada ojo (mm).

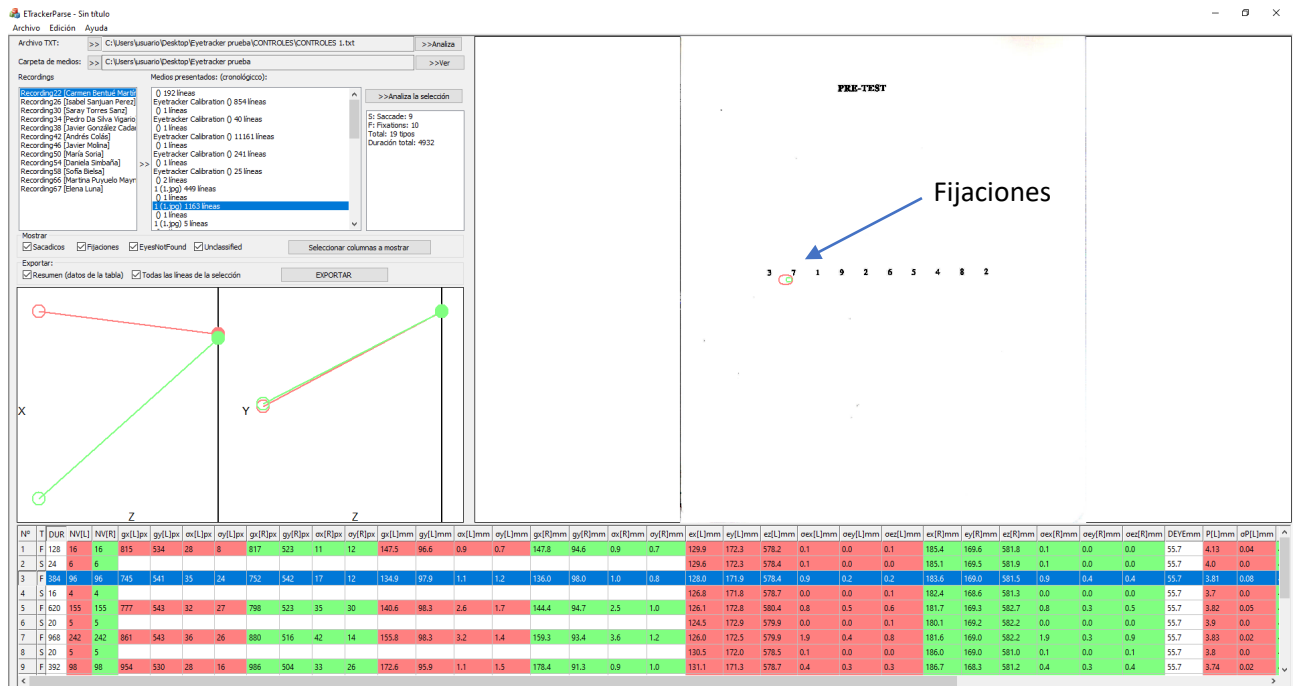


Figura 7. Análisis de las fijaciones de un sujeto en el Pre-Test con el programa **ETracker Parse**

Se importaron las bases de datos Excel, exportadas previamente del **Tobii Pro Lab**, al programa **ETracker Parse** y se comprobó cada sub-test de cada sujeto por separado. Cuando se verificó que todo estaba correcto se iba exportando cada sub-test de cada sujeto por separado a una nueva base de datos Excel mucho más manejable y con los datos de interés para nuestro estudio. Se crearon tres bases de datos Excel, una para cada sub-test (Test A, Test B y Test C) con las variables de interés de todos los sujetos.

3.5. Análisis estadístico

Las medidas de las variables a estudiar recogidas en las tres bases de datos en el programa Excel (Microsoft® Office Excel 2011, Microsoft Corporation), se analizaron con el paquete estadístico Statistical Package for the Social Sciences (SPSS 24.0 Inc., Chicago, IL, EEUU).

Primero se realizó una estadística descriptiva de la muestra conforme a las variables cuantitativas especificadas en el apartado anterior para cada sub-test, calculando la media, desviación estándar, máximo y mínimo. También se valoró la distribución de la normalidad de todas las variables con el test de Kolmogorov-Smirnov y se estudió si existían diferencias entre las variables para un sub-test entre ojos del mismo sujeto (prueba T para muestras relacionadas) y su correlación. Un valor de $p < 0,05$ se consideró estadísticamente significativo. Los diagramas de dispersión también se generaron con SPSS.

4. Análisis de los resultados

Se seleccionaron 60 sujetos entre 18 y 30 años, de estos 60 sujetos iniciales tuvimos que excluir a 8 ya que el Eye Tracker no los había detectado bien y los datos no eran del todo fiables, de esta forma el estudio final se hizo con 52 sujetos con una media de edad de $21,00 \pm 3,22$ años. Entre los 8 excluidos, dos se descartaron por haber cometido errores al realizar el test (omisiones o adiciones). De estos 52 sujetos 30 eran mujeres y 22 hombres. El error refractivo medio fue de $-2,10 \pm 2,23$ D.

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los tres sub-test. En todos ellos el número de sacádicos ha sido mayor que el número de fijaciones. Además, en cuanto a duración podemos observar que el tiempo de realización de los dos primeros test fue similar (Test A: $16,51 \pm 2,83$ s vs. Test B: $17,11 \pm 2,85$ s).

En cuanto a la velocidad de los sacádicos se obtuvo que fueron ligeramente más rápidos con el OI (Test A: $0,95 \pm 0,35$ s, Test B: $0,96 \pm 0,53$ s y Test C: $1,30 \pm 0,36$ s) que con el OD (Test A: $0,85 \pm 0,29$ s, Test B: $0,91 \pm 0,36$ s y Test C: $1,25 \pm 0,38$ s) para todos los sub-test, de esta forma la amplitud del sacádico también fue mayor con el OI (Test A: $33,45 \pm 19,51$ s, Test B: $39,04 \pm 25,68$ s y Test C: $46,41 \pm 20,46$ s) que con el OD (Test A: $31,43 \pm 20,83$ s, Test B: $32,34 \pm 22,67$ s y Test C: $38,56 \pm 12,41$ s).

n=52	TEST A	TEST B	TEST C
Duración (s)	$16,51 \pm 2,83$	$17,11 \pm 2,85$	$35,24 \pm 6,70$
Nº fijaciones (n)	$33,90 \pm 12,29$	$34,20 \pm 9,50$	$121,14 \pm 15,24$
Nº sacádico (n)	$49,96 \pm 41,95$	$53,20 \pm 44,46$	$186,66 \pm 96,87$
DIP (mm)	$61,52 \pm 2,92$	$61,52 \pm 2,92$	$61,52 \pm 2,92$
Velocidad sacádicos OD (m/s)	$0,85 \pm 0,29$	$0,91 \pm 0,36$	$1,25 \pm 0,38$
Velocidad sacádicos OI (m/s)	$0,95 \pm 0,35$	$0,96 \pm 0,53$	$1,30 \pm 0,36$
Amplitud sacádicos OD (mm)	$31,43 \pm 20,83$	$32,34 \pm 22,67$	$38,56 \pm 12,41$
Amplitud sacádicos OI (mm)	$33,45 \pm 19,51$	$39,04 \pm 25,68$	$46,41 \pm 20,46$

Tabla 1. Datos obtenidos de la evaluación del test DEM con Eye Tracker

Con estos datos sacamos el tiempo ajustado horizontal ($35,24 \pm 6,68$ s), el tiempo ajustado vertical ($33,58 \pm 5,56$ s) y el ratio ($1,05 \pm 0,09$) (Tabla 2) teniendo en cuenta los valores de todos los participantes. En este caso el tiempo horizontal ajustado y el tiempo vertical ajustado no varían, ya que los sujetos que cometieron omisiones o adiciones consideramos que no cumplían los criterios de inclusión y fueron excluidos para que no interfirieran en los resultados.

n=52	Tiempo Vertical (s)	Tiempo Horizontal (s)	Ratio	Errores
Media	33,58	35,24	1,05	0,00
DE	5,56	6,68	0,09	0,00

Tabla 2. Media y desviación típica de los valores de los 52 participantes

Por otro lado, se calcularon los percentiles para este grupo de edad ($21,00 \pm 3,22$ años), según los datos obtenidos de nuestros 52 sujetos (Tabla 3). En el caso del tiempo vertical los datos estaban en un percentil 40, en el caso del tiempo horizontal salió un percentil 45.

Percentiles	Tiempo Vertical (s)	Tiempo Horizontal (s)	Ratio
1	45,32	49,71	1,21
5	42,87	47,33	1,18
10	41,40	45,48	1,16
15	40,60	42,92	1,14
20	40,22	41,21	1,14
25	38,13	40,06	1,12
30	36,03	38,70	1,10
35	34,95	36,90	1,09
40	33,99	36,18	1,06
45	32,83	35,50	1,06
50	31,13	33,75	1,04
55	30,89	33,42	1,03
60	30,46	32,21	1,03
65	30,41	31,35	1,02
70	30,13	30,42	1,01
75	29,59	29,68	0,99
80	29,08	29,05	0,98
85	28,86	28,32	0,96
90	28,48	27,04	0,92
95	26,28	26,80	0,91
99	24,79	26,03	0,88

Tabla 3. Percentiles

Para el Test C, se calculó si existían correlaciones entre el OD y el OI en cuanto a la velocidad y amplitud de los sacádicos y tamaño pupilar (Tabla 4).

Corelación de muestras relacionadas	Velocidad sacádicos OD/OI (m/s)	Amplitud sacádico OD/OI (mm)	Tamaño pupilar OD/OI (mm)
TEST C	CC: 0,77 p <0,001	CC: 0,74 p <0,001	CC: 0,91 p <0,001

Tabla 4. Correlación de muestras seleccionadas

Se observó que en el Test C hay una correlación significativa positiva alta (cc: 0,77; p <0,001) entre la velocidad del sacádico del OD y la velocidad del sacádico del OI, al igual que con la amplitud del sacádico del OD y la del OI (cc: 0,74; p <0,001), lo que quiere decir que a mayor velocidad y amplitud del sacádico del OD mayor velocidad y amplitud del sacádico del OI en un mismo paciente (Figuras 9 y 10).

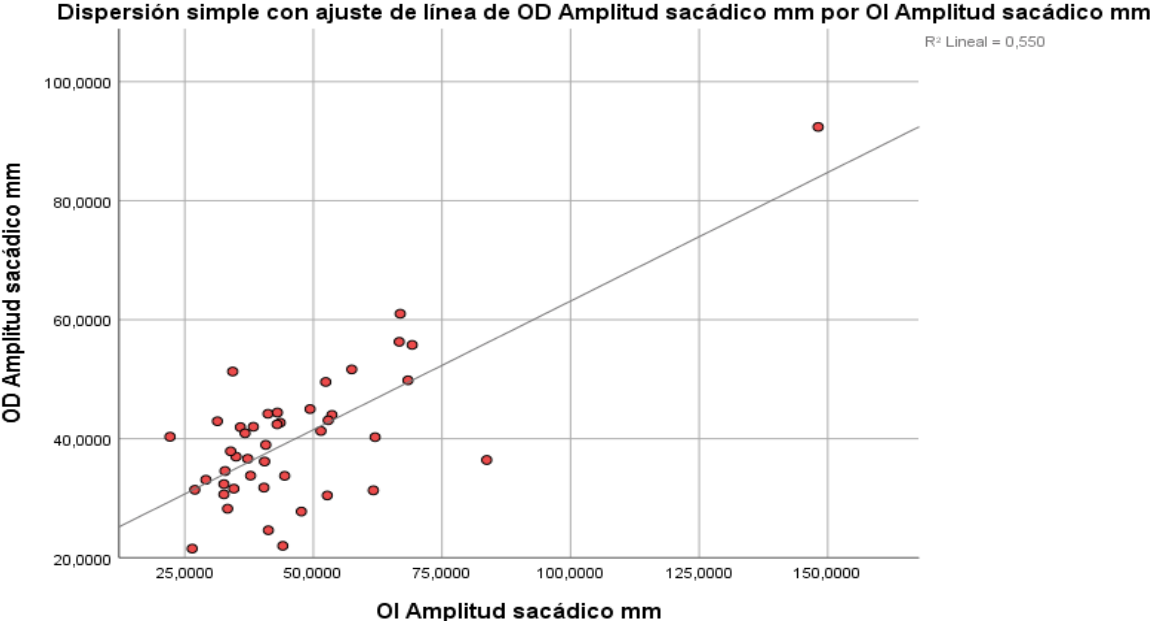


Figura 9. Diagrama de dispersión con línea de regresión.

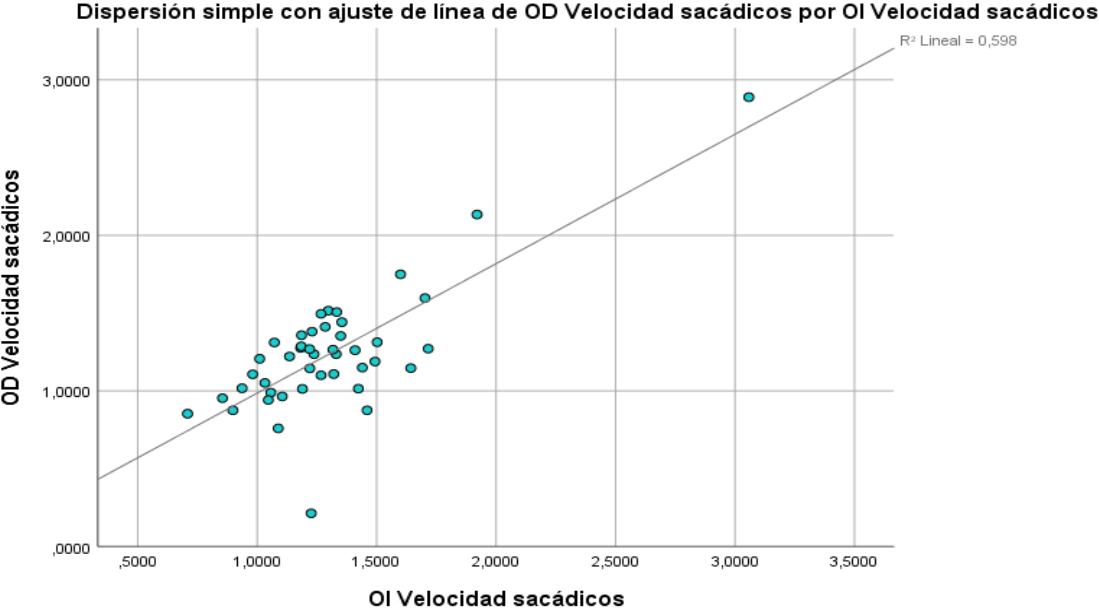


Figura 10. Diagrama de dispersión con línea de regresión.

A su vez encontramos una correlación estadísticamente significativa positiva ($cc: 0,91$; $p < 0,001$) entre el tamaño pupilar del OD y el tamaño pupilar del OI (Tabla 4 y Figura 11).

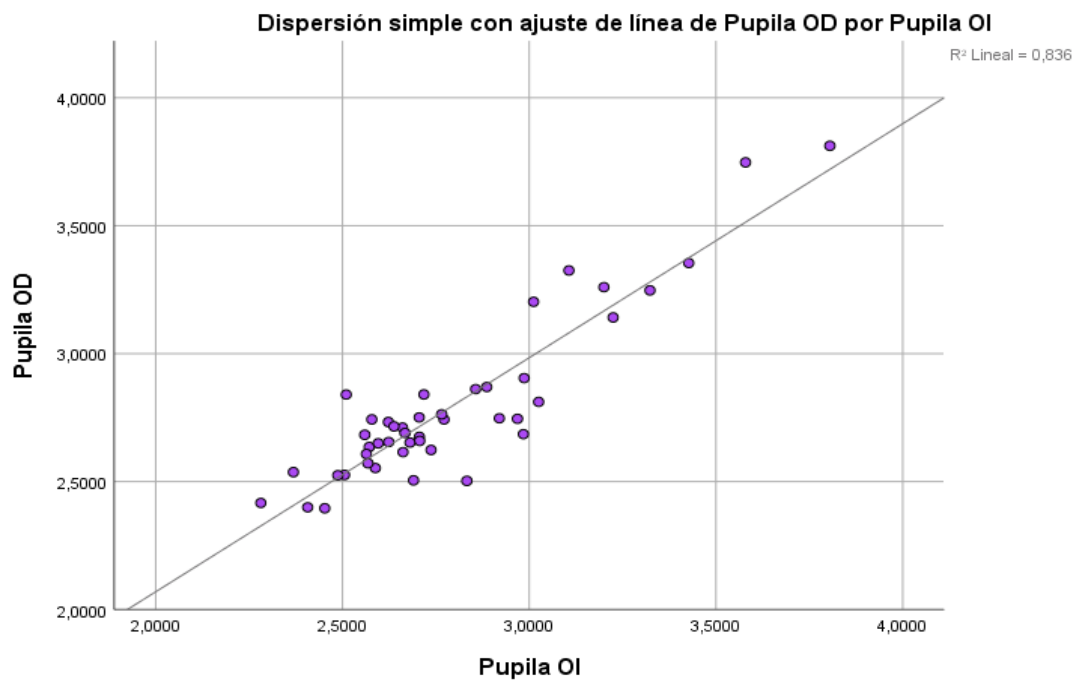


Figura 11. Diagrama de dispersión con línea de regresión

5. Discusión

El objetivo del trabajo es medir objetivamente con Eye Tracker los parámetros de la motilidad ocular al realizar el test DEM en una muestra de sujetos control jóvenes sin disfunciones visuales, puesto que no se pueden medir cuando se realiza este test de forma tradicional subjetivamente por parte del examinador. Al sacar los percentiles específicos para nuestro grupo de sujetos observamos que el tiempo vertical está en un percentil 40, mientras que el tiempo horizontal está entorno a un percentil 45. En el caso del ratio nos sale un percentil 50, estos valores se consideran normales puesto que en el test DEM (5)(6) se consideran valores normales a partir del percentil 31.

Comparando los datos específicos sacados gracias al Eye Tracker, tanto la velocidad (Test A: $0,95 \pm 0,35$ m/s, Test B: $0,96 \pm 0,53$ m/s, Test C: $1,30 \pm 0,36$ m/s) como la amplitud (Test A: $33,45 \pm 19,51$ mm, Test B: $39,04 \pm 25,68$ mm y Test C: $46,41 \pm 20,46$ mm) de los movimientos sacádicos horizontales del Test C son más rápidos que los verticales de los Test A y Test B.

Además, realizamos más del doble de sacádicos en el Test C ($186,66 \pm 96,87$) que en el Test A o el Test B ($49,96 \pm 41,95$ y $53,20 \pm 44,46$), esto se puede deber a la mayor cantidad de números y a la disposición de éstos en el Test C.

Todos los sujetos eran jóvenes y no tenían ninguna disfunción oculomotora por lo que los resultados obtenidos se consideran dentro de lo esperado y pueden servir de referencia para otras investigaciones. Así, con este estudio, se trató de sacar unos percentiles para tener una tabla normativa en cuanto a tiempo vertical, tiempo horizontal y ratio para la media de edad de 21 años, puesto que el test DEM tradicional sólo los tiene en el rango de edad de 6 a 13 años. (5)(6)

Una vez analizados nuestros resultados, buscamos estudios que nos daban información sobre el mismo test DEM, pero evaluado en niños. (5)(6) Como se ha comentado, el test DEM es una prueba estandarizada que evalúa el estado oculomotor de niños con edades comprendidas entre los 6 y los 13 años. En este caso nos fijamos en la tabla de valores normales que se usa en el rango de los 13 años, ya que es la edad que más se acerca a la de nuestros sujetos.

Comparamos el tiempo horizontal, el tiempo vertical y el ratio. El tiempo vertical de nuestros sujetos fue de 33,62 s, ligeramente inferior que el tiempo vertical ajustado teórico para sujetos de 13 años, que es de 33,75 s. En cuanto al tiempo horizontal y el ratio el resultado fue similar, en nuestro caso el tiempo horizontal fue de 35,24 s y el tiempo horizontal ajustado teórico es 37,56 s a los 13 años. Respecto al ratio en nuestro caso nos sale un valor de $1,05 \pm 0,09$, un valor menor que en el caso del ratio ajustado teórico para un grupo de 13 años ($1,12 \pm 0,12$).

Obtuvimos unos valores menores que los esperados para un grupo de sujetos de 13 años. Esto sigue la tendencia de que cuanto mayor es la edad de los sujetos más rápido se realiza el test como se ve en la Figura 12 de los creadores del DEM, Richman y colaboradores. (5)(6)

Age	Vertical Time (seconds)	Horizontal Time (seconds)	Errors	Ratio (H/V)
	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)	Mean (S.D.)
6.0 - 6.11	63.11 (16.59)	98.26 (32.61)	15.22 (11.49)	1.58 (0.45)
7.0 - 7.11	54.83 (9.20)	87.94 (28.18)	12.50 (12.91)	1.60 (0.41)
8.0 - 8.11	46.76 (7.89)	57.73 (12.32)	4.61 (6.91)	1.24 (0.18)
9.0 - 9.11	42.33 (8.20)	51.13 (13.30)	2.17 (4.10)	1.21 (0.19)
10.0 - 10.11	40.28 (7.43)	47.64 (10.11)	1.91 (2.68)	1.19 (0.17)
11.0 - 11.11	37.14 (5.42)	42.62 (7.61)	1.68 (2.34)	1.15 (0.13)
12.0 - 12.11	35.14 (5.87)	39.35 (8.11)	1.11 (1.17)	1.12 (0.10)
13.0 - 13.11	33.75 (6.53)	37.56 (7.23)	1.61 (2.15)	1.12 (0.12)

Figura 12: Media (SD) del tiempo horizontal, el tiempo vertical, los errores y el ratio en las edades de 6 a 13 años en las que está realizado el test DEM original. (5)(6)

Además de comparar nuestros resultados con los del test DEM estandarizado para niños (5), buscamos también los valores normales estandarizados para el test DEM en adultos (14), observamos que la tabla de valores normales esta diferenciada por grupos de edad (Figura 13). En este caso nos fijamos en la columna de <24 años, ya que la edad media de nuestra muestra es de 21 años.

Comparando nuestros tiempos obtenidos, correspondientes al Test A y al Test B, con los de la Figura 13, observamos que nuestros tiempos vertical ($33,58 \pm 5,56$ s) y horizontal ($35,24 \pm 6,68$ s), son menores a los valores que obtienen en el test DEM para adultos (Vaj: $52,00 \pm 7,0$ s y Haj: $55,50 \pm 7,5$ s). Hay que tener en cuenta que el test que diseñaron para adultos es diferente al que se utiliza para niños, el cual consta de menos números, siendo el DEM para adultos más complejo. Si se observa la tendencia en la Figura 13, se ve que conforme avanza la edad, cada sub-test cuesta más tiempo realizarlo. Así pues, viendo los resultados del test DEM para niños (5)(6), los nuestros para 21 años y el del test DEM para adultos (14), hay una tendencia a disminuir el tiempo de realización del test conforme se avanza en edad de los 6 a los 21 años, pero a partir de los 24 años cada vez cuesta más tiempo realizar el test.

Age groups	≤ 24 n = 26	25-34 n = 55	35-44 n = 31	45-54 n = 32	55-64 n = 65	65-74 n = 61	≥ 75 n = 32	p-value
V1 (s)	26.5 (6.0)	27.5 (8.5)	25.0 (9.0)	28.5 (7.8)	30.0 (13.0)	36.3 (17.1)	42.0 (19.8)	< 0.001
V1aj (s)	26.5 (6.0)	27.5 (8.5)	25.0 (9.0)	28.5 (7.1)	30.0 (13.0)	36.3 (17.1)	42.0 (19.1)	< 0.001
V2 (s)	25.5 (3.5)	26.2 (8.0)	25.0 (6.0)	27.5 (8.9)	28.0 (11.0)	35.0 (17.3)	40.0 (18.2)	< 0.001
V2aj (s)	25.5 (3.5)	26.2 (8.0)	25.0 (6.0)	27.2 (8.9)	28.0 (11.0)	35.0 (17.3)	40.0 (17.4)	< 0.001
Vaj (s)	52.0 (7.0)	54.3 (14.6)	49.0 (14.1)	55.5 (17.8)	57.7 (23.6)	73.0 (30.4)	82.0 (38.2)	< 0.001
H (s)	55.1 (7.5)	57.0 (13.5)	53.0 (14.0)	61.5 (18.5)	66.0 (22.0)	75.0 (32.5)	91.0 (38.3)	< 0.001
Haj (s)	55.5 (7.5)	57.0 (13.5)	54.0 (14.0)	61.5 (18.5)	65.0 (21.5)	69.1 (36.5)	92.1 (35.3)	< 0.001
Hd (s)	57.0 (9.3)	59.0 (10.5)	60.0 (16.0)	67.5 (20.8)	67.0 (21.5)	78.0 (29.5)	90.0 (27.3)	< 0.001
Hdaj (s)	56.9 (8.0)	59.0 (10.4)	60.0 (16.3)	67.5 (20.9)	67.9 (20.1)	80.0 (28.8)	90.5 (26.9)	< 0.001

Figura 13: Resultados del test ADEMD en diferentes subgrupos de edad. Se muestra la media y desviación estándar para cada subgrupo y cada parámetro, así como el valor p obtenido de la comparación global entre subgrupos de edad. H tiempo horizontal, Haj tiempo ajustado horizontal, Hd tiempo de distractor horizontal, Hdaj tiempo ajustado de distractor horizontal, Vaj tiempo ajustado vertical, V1 tiempo de primera hoja vertical, V1aj tiempo de ajuste de primera hoja vertical, V2 tiempo de segunda hoja vertical, V2aj tiempo de ajuste de segunda hoja vertical. (14)

Una vez conocidos cómo funcionan los 3 movimientos principales a nivel oculomotor durante la lectura (seguimientos, sacádicos y fijaciones), observamos varios estudios realizados en personas con disfunciones oculomotoras que evalúan el patrón de movimiento durante la lectura y exploran cómo influye en el procesamiento de la información visual (16). En estos estudios se observa como los niños con tiempos ajustados horizontal y vertical DEM más lentos tendían a tener índices de lectura más lentos (17)

Se han observado varios patrones de movimientos oculares ineficientes (más regresiones, sacádicos más cortos y peores seguimientos) en niños y adultos con mala capacidad de lectura o problemas como la dislexia. En cambio, todavía no se han encontrado diferencias en los patrones de movimiento ocular al realizar tareas cotidianas, no relacionadas con la lectura, pero entre los que tienen una buena y una mala capacidad lectora, se observó que poseen una capacidad similar de ejecutar movimientos oculares fuera del ámbito de la lectura. (13)

En un estudio realizado en Granada (18), tomando como muestra 1056 niños de entre 6 y 12 años, observaron que el 10,4% tenían problemas oculomotores. En este grupo de niños ninguno estaba siendo tratado o había sido diagnosticado previamente. Evaluaron el rendimiento académico entre los diferentes grupos y se observó que el grupo de niños con problemas oculomotores era el que peor rendimiento académico tenía, situándose muy por debajo de los niños con problemas refractivos o con anomalías acomodativas. De esta forma quisieron demostrar que existe una gran relación entre las disfunciones oculomotoras y el rendimiento escolar.

6. Conclusiones

El Eye Tracker es un método objetivo con el cual podemos evaluar la prueba DEM en pacientes con ausencia de problemas binoculares obteniendo resultados equivalentes a cuando se realiza de forma subjetiva, pero con la ventaja de medir y cuantificar parámetros de la motilidad ocular imposibles con el método tradicional subjetivo.

A continuación, se indican las conclusiones específicas obtenidas a partir de la realización del test DEM monitorizado con Eye Tracker:

- Se puede medir el tiempo de realización objetivamente del Test A, del Test B y del Test C.

- Se pudo calcular el tiempo vertical y horizontal ajustado, así como el ratio del test DEM, además de los percentiles para un grupo de adultos jóvenes sin disfunciones binoculares de 21 años.
- Los percentiles calculados en nuestra muestra de 52 pacientes pueden servir como referencia o base normalizada para realizar el test DEM en sujetos de 21 años.
- El Eye Tracker permite cuantificar el número de fijaciones y sacádicos en cada sub-test, de esta forma apreciamos que el número de sacádicos fue mayor que el número de fijaciones en todos los sub-test.
- En cuanto a la amplitud y velocidad de los sacádicos en el Test C, fue mayor en ambos casos con el OI que con el OD en cada uno de los tres test, pero se estableció una correlación significativa positiva entre la velocidad y la amplitud de ambos ojos.
- Existe una correlación significativa positiva entre el diámetro de la pupila del OD y la del OI.

7. **Bibliografía:**

1. Dell’Osso LF, Daroff RB. Características y técnicas del registro de los movimientos oculares. Neuroftalmología, Barcelona, Salvat. 1981;181–91.
2. Chapartegui Tellería J, Remón Martín L, Marcellán C. Influencia de la motilidad ocular en la velocidad de lectura en niños de primaria. Universidad de Zaragoza, TFG, 2016.
3. Erkelens CJ, Van der Steen J, Steinman RM, Collewijn H. Ocular vergence under natural conditions. I. Continuous changes of target distance along the median plane. Proc R Soc London B Biol Sci. 1989;236(1285):417–40.
4. Drieghe D, Pollatsek A, Staub A, Rayner K. The word grouping hypothesis and eye movements during reading. J Exp Psychol Learn Mem Cogn. 2008;34(6):1552.
5. Powell JM, Fan M-Y, Kiltz PJ, Bergman AT, Richman J. A Comparison of the Developmental Eye Movement Test (DEM) and a Modified Version of the Adult Developmental Eye Movement Test (A-DEM) with Older Adults. J Behav Optom. 2006;17(3):59–64.
6. Garzia RP, Richman JE, Nicholson SB, Gaines CS. A new visual-verbal saccade test: The Developmental Eye Movement test (DEM). J Am Optom Assoc. 1990;
7. Rodríguez Barrera MA, López Villamil M, Sánchez Lugo M. Diagnóstico sobre alteraciones de los Movimientos Oculomotores (MOM), con pruebas de medición

- subjetiva en niños entre 7 a 9 años con problemas de lectura y bajo rendimiento escolar en dos colegios de Bogotá. *Cienc y Tecnol para la salud Vis y Ocul.* 2006;4(6):13–23.
8. Bilbao C, Piñero DP. Diagnosis of oculomotor anomalies in children with learning disorders. *Clin Exp Optom.* 2020;103(5):597–609.
 9. Real Academia Española. Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.5 en línea] [Internet]. [cited 2022 Jun 23]. <https://dle.rae.es>
 10. Montés R, Ferrer T. Características de los movimientos oculares durante la lectura. *Gaceta óptica.* 2002;360:10–3.
 11. González Mejía J. Evaluación de los movimientos sacádicos con la prueba DEM en niños. *Imagen Óptica. Periodismo con Visión.* 2020;52-55.
 12. Ayton LN, Abel LA, Fricke TR, McBrien NA. Developmental eye movement test: what is it really measuring? *Optom Vis Sci.* 2009;86(6):722–30.
 13. Hindmarsh GP, Black AA, White SLJ, Hopkins S, Wood JM. Eye movement patterns and reading ability in children. *Ophthalmic Physiol Opt.* 2021;41(5):1134–43.
 14. Gené-Sampedro A, Monteiro PML, Bueno-Gimeno I, Gene-Morales J, Piñero DP. Validation of a modified version of the adult developmental eye movement test. *Sci Rep.* 2021;11(1):1–11.
 15. Holmqvist K, Nyström M, Mulvey F. Eye tracker data quality: what it is and how to measure it. In: *Proceedings of the symposium on eye tracking research and applications.* 2012.;45–52.
 16. Gilbert LC. Functional motor efficiency of the eyes and its relation to reading. *Univ Calif Publ Educ.* 1953;11(3),159–231.
 17. Webber A, Wood J, Gole G, Brown B. DEM test, visagraph eye movement recordings, and reading ability in children. *Optom Vis Sci.* 2011;88(2):295–302.
 18. Lázaro Suárez MM, García García JA, Perales Palacios FJ. Anomalías de la visión y rendimiento escolar en Educación Primaria: un estudio piloto en la población granadina. *Rev Interuniv Form del Profr.* 2013;27(1):101-119.