

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**



**Asociación entre la reactividad pupilar y la percepción de
movimientos oculares.**

Alberto Andrés Cuevas Pacheco

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE
MAGISTER EN NEUROCIENCIAS**

Directores de Tesis: Pedro Maldonado Arbogast, María de los Ángeles Juricic Urzúa

Dr. Pedro Maldonado Arbogast

Dra. María de los Ángeles Juricic Urzúa

Fecha:16/06/2022

UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE MEDICINA
ESCUELA DE POSTGRADO**

INFORME DE APROBACIÓN TESIS DE MAGISTER

**Se informa a la Comisión de Grados Académicos de la Facultad de Medicina,
que la Tesis de Magíster presentada por el candidato**

Alberto Andrés Cuevas Pacheco

**ha sido aprobada por la Comisión Informante de Tesis como requisito para
optar al Grado de Magíster en Neurociencia en el Examen de Defensa de
Tesis rendido el día**

**Dr. Pedro Maldonado Arbogast
Director de Tesis**

**Dra. María de los Ángeles Juricic Urzúa
Directora de Tesis**

COMISION INFORMANTE DE TESIS

Prof. Dr. Vladimir López Prof. Dr. Rodrigo Nieto Prof. Dra. Andréa Helo

Prof. Dr. Paul Delano

Presidente Comisión

Dedico esta tesis a mi familia y a todos los que me
vieron recorrer este camino.

Agradezco a mis padres, Emiliana Pacheco Navarro y Alberto Cuevas Pozo, quienes me han dado un apoyo incondicional, a mis hermanos Francisco Cuevas y

Felipe Cuevas, quienes me han ayudado con ideas para mi tesis, a mis tutores Dr. Pedro Maldonado y la Dra. María de los Ángeles Juricic, quienes me han guiado y han creído en mí en este camino a desarrollarme como científico, al Laboratorio de Neurosistemas por toda la disposición en ayudarme a aprender sobre investigación, a la Dra. Karla Padilla, Samuel Madariaga, Dr. Iván Plaza, Dra. Consuelo Aldunate. También agradezco al laboratorio de Neurodinámica de la PUC, al Dr. Vladimir López y Dr. Eugenio Rodríguez por recibirme en su laboratorio, Marcelo Malbec, Dr. Mario Villenas, Dr. Ismael Palacios, Claudio Artigas, Marcela Osorio y Evelyn Cordero por guiarme en mis pasos como científico. Agradezco también al Dr. Pablo Razeto por iluminarme en mi camino hacia el estudio de neurociencia e imaginación durante mi estadía en el IFICC. También agradezco a mis amigos, Ricardo Morales, quien me ayudó a adaptarme en este periodo de magíster, a Benjamín Mellado, quien me enseñó a programar en Python, y quien también ocupa un lugar importante en mi corazón. Tengo que agradecer a cada una de las personas que me he topado desde que recorrí este camino, tanto los buenos como malos momentos, pues cada uno de ellos me ha hecho descubrirme a mí mismo, en seguir motivandome en por qué la neurociencia es maravillosa, en por qué quiero estudiar imaginación, y más aún, en qué tipo de científico quiero llegar a ser. Muchas gracias, thank you so much, ευχαριστώ πολύ.

Resumen

En el día a día, estamos expuestos a diversos estímulos visuales, donde tendemos a cambiar nuestra mirada a los estímulos que queremos atender. Sin embargo, los seres humanos no siempre tenemos consciencia de nuestros propios movimientos oculares. En experimentos previos en nuestro laboratorio sobre atención encubierta, se les solicitó a los participantes mantener su mirada en una cruz de

fijación mientras atendían a un estímulo periférico. Un 60,7% de los participantes reportaron haber movido los ojos durante el experimento. Sin embargo, un análisis más detallado reveló que en el 75% de los reportes no se había realizado ningún movimiento sacádico. Dado que existe poca información sobre este fenómeno, resulta importante entender la disociación entre la percepción de movimiento ocular y la ejecución de movimientos oculares *per se*.

Se ha reportado que la percepción de realización de una sacada, y la ejecución de sacadas se pueden disociar, debido a que las personas tienen dificultades en reportar sus sacadas realizadas. Por otra parte, se ha demostrado que la dilatación de la pupila refleja una preparación motora de un movimiento sacádico, incluso antes de realizar un movimiento sacádico. Bajo este contexto, surge la hipótesis de que el reporte de sacadas no realizadas se debe a un cambio atencional que es percibido como un movimiento sacádico. Como corolario de esta hipótesis se espera observar un aumento del tamaño pupilar como indicador de un cambio atencional, asociado al reporte de sacadas no realizadas.

Para examinar este fenómeno, se analizaron datos conductuales y de videoculografía de 28 sujetos (de 19 a 34 años) en una tarea de atención encubierta, centrada en la percepción del movimiento ocular reportado por los participantes. Se analizó el tamaño pupilar antes y después de: a) un reporte de un movimiento sacádico no realizado y b) un movimiento sacádico no reportado.

De los sujetos analizados, 15 fueron utilizados para el análisis, donde se encontraron sujetos con tres o más reportes, sin sacadas (N= 4), y con tres o más sacadas no reportadas (N=13). Se alinearon los valores de diámetro pupilar respecto al tiempo de reporte y sacada, respectivamente, y se analizó ventana

temporal 1000ms antes y después del evento a analizar para luego hacer un promedio de ensayos por cada sujeto, seguido de un promedio de sujetos para tener curvas comparativas. Se construyeron surrogados respecto al número de reportes sin sacadas y sacadas no reportadas, respectivamente.

Para la condición de reportes sin sacadas, se encontraron diferencias significativas tanto antes como después de un reporte sin sacada, mientras que para sacadas no reportadas, solo se encontraron diferencias significativas posterior a una sacada ($p < 0.05$). Estos resultados sugieren que previo al reporte existe un cambio atencional manifestado como una contracción pupilar. Esto es coherente con la teoría premotora de la atención (Craighero & Rizzolatti, 2005; Smith et al., 2012). Además, los resultados arrojan que reportar no es lo mismo que realizar una sacada, lo cual sugiere que el fenómeno es bidireccional.

Este estudio contribuye a entender cómo la percepción de realización de un movimiento ocular puede estar vinculado a un cambio en el foco atencional más que a un movimiento ocular *per se*.

Abstract

In everyday life, we are exposed to various visual stimuli, where we tend to change our gaze to the stimuli we want to attend to. However, humans are not always conscious of our eye movements. In previous experiments in our laboratory on covert attention, where participants were asked to keep their gaze on a fixation cross, 60.7% of the participants reported having moved their eyes during the experiment. However, a more detailed analysis revealed that in 75% of the reports, no saccadic movement had been performed. Since there is little information on this

phenomenon, it is essential to assess whether there is a dissociation between the perception of eye movement and the execution of eye movements per se.

It has been reported that the perception of performing a saccade and the execution of saccades can be dissociated because people have difficulties in reporting their saccades. On the other hand, pupil dilation has been shown to reflect motor preparation for a saccadic movement, even before performing a saccadic movement. In this context, the hypothesis arises that the report of unrealized saccades is due to an attentional change perceived as a saccadic movement. As a corollary to this hypothesis, it is expected to observe an increase in pupil size associated with the report of saccades not performed.

To assess this phenomenon, behavioral and videoculography data from 28 subjects (ages 19 to 34) were analyzed as they were subjected to a covert attention task focused on the perception of eye movement reported by the participants. The pupil size was analyzed before and after a) a report of a saccade not performed and b) a saccade not reported.

Of the subjects analyzed, 15 were used for the analysis, where subjects were found with three or more reports without saccades (N= 4) and with three or more saccades not reported (N=13). Pupillary diameter values were aligned with respect to the reporting and saccade time, respectively, and a time window of 1000ms before and after the event to be analyzed was analyzed to average the number of trials for each subject, followed by an average number of subjects to obtain comparative curves. Surrogates were constructed regarding the number of reports without saccades and saccades not reported, respectively.

For the condition of reports without saccades, significant differences were found both before and after a report without saccades, while for saccades not reported, significant differences were only found after a saccade ($p < 0.05$). These results suggest that prior to the report, there was an attentional change manifested as a pupillary contraction. This is consistent with the premotor theory of attention. In addition, the results show that reporting is not the same as performing a saccade, which suggests that the phenomenon is bidirectional.

This study contributes to understanding how the perception of performing an eye movement can be linked to a change in the attentional focus rather than an eye movement per se.

1. Introducción

Cuando estamos explorando un lugar, ya sea un paisaje, o una fotografía, nuestro sistema visual se expone a diversos estímulos visuales, con lo que se tiende a generar una interpretación del mundo, sobre todo para aquellos estímulos que captan nuestro interés (Spering & Carrasco, 2015). Sin embargo, a pesar de que los sujetos pueden mover los ojos hacia distintas regiones de interés que estén observando, los seres humanos no poseen una buena capacidad de percibir sus propios movimientos oculares dentro de este proceso (Theeuwes, Kramer, Hahn & Irwin, 1998; Wu & Remington, 2003; Godijn & Theeuwes, 2003), llegando a confundir muchas veces el cuándo ejecutan un movimiento sacádico hacia algún objeto, creyendo que en realidad nunca movieron los ojos hacia un punto. Bajo este

marco, queda abierta la pregunta de si, así como los sujetos creen no haber realizado movimientos oculares, existe la posibilidad de que perciban haber movido los ojos hacia algún sector, pero que sin embargo nunca ejecutaron un movimiento ocular.

A continuación se hablará sobre las conductas oculomotoras más relevantes para abordar esta pregunta, sobre la atención visual y sus modelos de procesamiento, la percepción visual y sus características, para luego ahondar en torno a la disociación que puede existir entre estos procesos. Finalmente, se profundizará en una propuesta que permita describir este fenómeno a partir de cambios de tamaño pupilar y su relación con los movimientos oculares.

1.1 Conductas oculomotoras y atención visual.

Durante la exploración visual existen dos componentes principales que permiten el muestreo de información durante la exploración visual, el primero corresponde a las conductas oculomotoras, y el segundo a la atención visual (Stelmach, Campsall & Herdman, 1997). Las conductas oculomotoras se pueden definir como aquellas conductas del ojo asociadas a una actividad motora. Dentro de las conductas oculomotoras más relevantes se encuentran los movimientos sacádicos (o sacadas) y las fijaciones. Las sacadas corresponden a movimientos balísticos coordinados, donde el movimiento de los ojos permite desplazar la mirada a una nueva ubicación que se encuentre lejana respecto a la ubicación actual de la fóvea (Liversedge, Gilchrist, & Everling, 2011), mientras que las fijaciones se refieren al momento en los que la posición del ojo se encuentra relativamente estacionaria,

como ocurre normalmente entre dos sacadas consecutivas (van Zoest & Donk, 2010).

Respecto a la atención visual, cuando nos enfocamos en una determinada ubicación o aspecto de una escena visual, la atención visual nos permite procesar selectivamente los estímulos visuales, priorizando la información de aquellos estímulos que logran captar nuestro interés, mientras que se dejan a un lado los estímulos menos relevantes (Carrasco, 2003). La atención visual además se puede categorizar según si existe o no participación de movimientos sacádicos cuando se atiende visualmente un estímulo de interés. Cuando existe participación de movimientos sacádicos para fijar un objeto de interés en la fóvea, entonces se habla de Atención descubierta, mientras que cuando no existe participación de movimientos sacádicos, y el procesamiento de información de nuestro foco atencional se lleva a cabo utilizando únicamente la visión periférica, entonces se habla de Atención encubierta (Bisley, 2010).

La información visual, luego captada durante la atención visual, debe ser procesada por nuestro cerebro para entender cómo es el entorno. Dentro de este procesamiento, existen al menos dos teorías que explican cómo es el procesamiento de la atención visual. La primera corresponde a la teoría tradicional de procesamiento de información, mientras que el segundo corresponde a la teoría premotora de la atención. En la teoría tradicional del procesamiento de información se concibe a la atención como una función cognitiva superior, similar al lenguaje o memoria (Smith & Schenk, 2012). En cambio, la teoría premotora de la atención postula que la atención es en realidad un acto pre-motor, es decir, esta proviene de la activación motora y precede al acto motor. Esto considera que la atención se superpone temporalmente con el proceso de planificación motora, y que por lo tanto

podemos hablar de que existe una atención pre-sacádica (Bielas & Michalczyk, 2019). En este caso, los cambios de atención visual se logran mediante la planificación de una acción motora dirigida hacia un objetivo, como es el caso de los movimientos sacádicos (Smith & Schenk, 2012).

1.2 Percepción Visual

Cuando el sujeto interpreta la información del mundo a partir del sistema visual y la representa mentalmente, hablamos de **percepción visual** (de-Wit & Wagemans, 2012), seleccionando la información de interés y obteniendo así una interpretación del objeto atendido (Bajcsy, & Campos, 1992). Para efectos de este trabajo, de ahora en adelante se definirá **percepción de movimientos oculares** como el fenómeno consciente de interpretar el haber realizado o no un movimiento sacádico. Además, se definirá como **percepción de un movimiento ocular ilusorio** al fenómeno de percibir haber realizado movimientos oculares que en realidad nunca fueron ejecutados.

La percepción visual requiere de la información percibida a través del sistema visual durante la exploración visual, por lo que la participación de los movimientos oculares parece ser bastante relevante en cómo construimos nuestra noción de mundo, sin embargo, existe evidencia de que estos dos procesos pueden dissociarse (Spering & Carrasco, 2015). A continuación se detallarán algunas evidencias de cómo la percepción de movimientos oculares y los movimientos oculares pueden dissociarse.

1.3 Evidencias de disociación de percepción de movimientos oculares y movimientos sacádicos.

Dentro de las evidencias referentes a la disociación de la percepción de movimientos oculares y la ejecución de movimientos sacádicos, se encuentra el estudio de Theeuwes y colaboradores (1998), donde se utilizó el paradigma de captura oculomotora, el cual consiste en que los sujetos deben dirigir su mirada a un objeto relevante mientras que en paralelo se les presenta un objeto distractor que captura su mirada. En este estudio, se encontró que los participantes tuvieron dificultad para reportar cuál era la dirección en la que se dirigieron sus sacadas, percibiendo incluso que sus ojos nunca se dirigieron hacia los objetos distractores a pesar de que los análisis revelaron que los sujetos ejecutaron sacadas hacia los distractores. Resultados similares fueron hallados en estudios que replicaron este paradigma (Wu & Remington, 2003; Godijn & Theeuwes, 2003; Hunt, Olk, Mühlénen, & Kingstone, 2004; Hunt et al., 2007). Más aún, estudios posteriores nuevamente sustentan que los sujetos tienen problemas para reportar sus propios movimientos oculares (Clarke, Mahon, Irvine & Hunt, 2015). Otro estudio, bajo el paradigma de identificación de objetos con mayor prominencia visual, es decir, aquellos estímulos que subjetivamente percibimos como sobresalientes dentro de una escena visual, se encontró que un porcentaje importante de las sacadas realizadas tendían a dirigirse erróneamente a objetos de menor saliencia, sin embargo, los sujetos reportaban que sus ojos realmente se dirigieron a los objetos de mayor saliencia (van Zoest & Donk, 2010).

La evidencia hasta ahora sugiere entonces que la ejecución de movimientos oculares y la percepción de los mismos se pueden disociar, pero que además los sujetos tienen una falta de percepción de movimientos oculares propios.

1.4 Problemática: Falta de percepción de movimientos oculares propios.

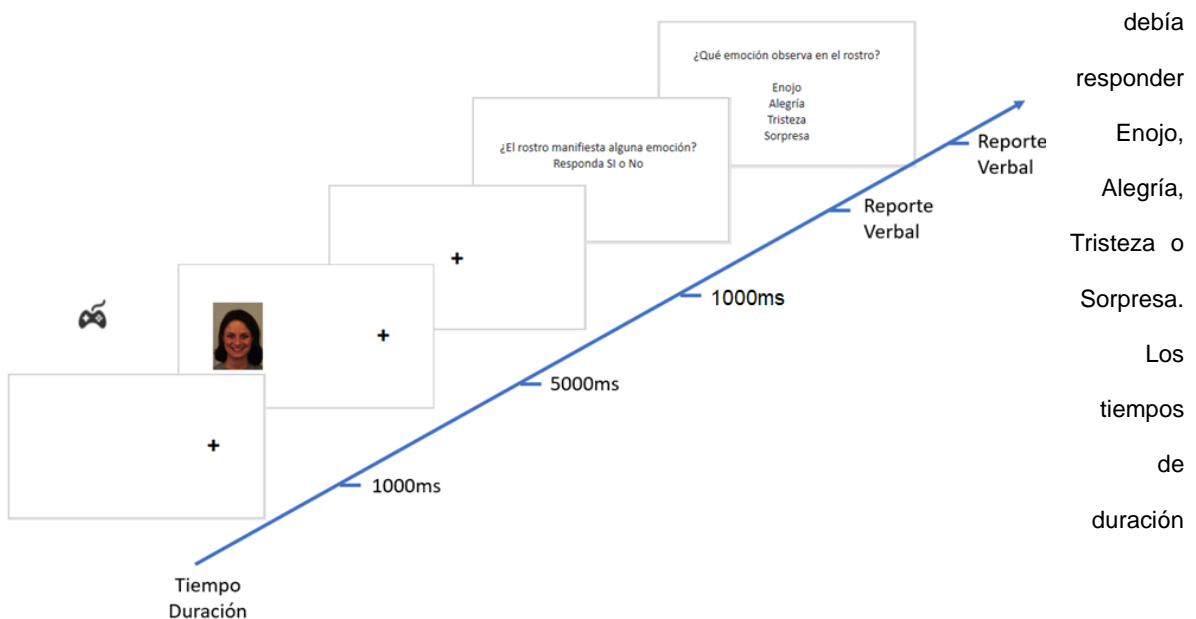
La mayoría de esta evidencia se centra en que los sujetos tienen problemas para reportar los movimientos oculares que fueron ejecutados por ellos mismos, percibiendo, sin embargo, poco se habla sobre la posibilidad de percibir movimientos oculares que en realidad nunca fueron ejecutados. La evidencia que más se acerca a esta problemática es la del trabajo de Marti y cols (2015). En este estudio se buscaba explorar las diferencias entre el reporte subjetivo y el comportamiento ocular. Para ello, se les pidió a los sujetos detectar en una pantalla de computador una letra "T" de color rojo entre un grupo de letras distractoras de igual o diferente color. Posterior a la exposición de los estímulos, los sujetos debían reportar rápidamente la presencia o ausencia de la letra objetivo, y una vez realizado el reporte, se les pedía realizar una introspección sobre los lugares donde aterrizaron sus propias fijaciones. Se encontró que el 20% de los lugares indicados por los sujetos como puntos de fijación no coincidían con los lugares donde realmente aterrizaron sus fijaciones, si no que en realidad se habían dirigido a otro lugar adyacente.

Más aún, en trabajos previos dentro de nuestro laboratorio, en una tarea de atención encubierta donde el sujeto debía reconocer emociones utilizando exclusivamente su visión periférica mientras se mantenía fija su mirada en una cruz de fijación, se encontró que hubo sujetos que reportaron haber movido los ojos hacia el estímulo presentado, no obstante, un análisis más profundo de la conducta ocular reveló que los sujetos en realidad nunca habían ejecutado un movimiento sacádico fuera de la cruz de fijación.

En esta tarea, se le solicitó a los participantes mantener su mirada fija en una cruz de fijación de tamaño de 2° visuales ubicada a 17° visuales a la derecha respecto al centro, la cual fue proyectada durante un intervalo de 1000 ms. Luego, se proyectó una imagen de un rostro a 34° visuales respecto a la cruz de fijación durante 5000 ms, donde el sujeto debía atender la imagen del rostro sin mover los ojos hacia ella y reconocer que emoción presentaba. Además, se instruyó al sujeto que durante el intervalo de exposición del rostro reportara inmediatamente, presionando un botón de joystick, cualquier movimiento ocular que percibiera haber realizado. Luego, en el centro de la pantalla, se proyectó una cruz de fijación durante 500ms. Finalmente, se le preguntó al sujeto: “¿El rostro manifiesta alguna emoción? Responda Sí o No”, a lo cual el sujeto debía responder de manera verbal con un sí o un no, y en caso de que su respuesta fuera afirmativa, se le aplicaba la segunda pregunta: “¿Qué emoción se observa en el rostro?”, a lo cual el participante debía responder de manera verbal cuál de las siguientes emociones reconoció: Enojo, Alegría, Tristeza o Sorpresa, tal como se observa en la **Figura 1**. Cabe destacar que los participantes mantenían su atención en el desempeño del

reconocimiento de emociones, y reportar el movimiento ocular realizado era considerada una tarea secundaria.

Figura 1. Esquema de tarea de atención encubierta. En este experimento previo del laboratorio, primero se mostró una cruz de fijación de 2° visuales ubicada a 17° visuales (con respecto al centro) durante 1000 ms, posteriormente se proyectó a 34° visuales a la izquierda de la cruz de fijación una imagen de un rostro durante 5000ms. Los sujetos debían reconocer la emoción del rostro, mientras que, en caso de haber percibido realizar un movimiento sacádico, debían reportarlo al presionar un botón. Posteriormente, se proyectó una cruz de fijación en el centro de la pantalla durante 500ms. Luego, se le preguntó al participante “¿El rostro manifiesta alguna emoción? Responda Si o No”, pregunta que debía responder verbalmente con un Sí o No. Finalmente, en caso de que respondiera afirmativamente, se le preguntaba “¿Qué emoción observa en el rostro?” en la cual



de cada pregunta fueron relativos al tiempo de respuesta del participante.

Bajo este marco, se denominará **Reporte sin sacada (RSS)** cuando los sujetos realizaron un reporte, pero no realizaron una sacada mayor a 2° visuales (referente al tamaño de la cruz de fijación) previa al reporte, y se hablará de **Sacada no reportada (SNR)** cuando el sujeto realizó un movimiento ocular mayor a 2° visuales (referente al tamaño de la cruz de fijación), pero este no fue reportado por el sujeto.

En esta tarea de atención encubierta se encontró que el 56.6% de los sujetos (N=28) reportaron haber realizado movimientos oculares, y sin embargo, de ese 56,6%, el 75% de los sujetos no habían realizado movimientos sacádicos fuera de la cruz de fijación, es decir, realizaron RSS. Esto podría entregar una nueva arista de lo que se sabe en torno a la percepción de movimientos oculares, en particular sobre la percepción de un evento ilusorio asociado a los propios movimientos oculares. Más aún, esto podría evidenciar que la disociación entre la ejecución de movimientos oculares y la percepción de los propios movimientos oculares tiene un carácter bidireccional, es decir, puede ocurrir tanto que el sujeto ejecute movimientos oculares y no los perciba, como que el sujeto no ejecute movimientos oculares, pero perciba que si los realizó. Además, esto podría sugerir que, así como la ausencia de reporte de realización de un movimiento ocular podría reflejar que estos no son percibidos por los sujetos, el fenómeno inverso de reportar un movimiento ocular que no fue ejecutado podría ser una evidencia a favor de la teoría premotora de la atención, ya que en basándose en esta teoría que sugiere que la atención visual es un acto premotor, el "atender" a un estímulo visual podría ser interpretado erróneamente como "mover la mirada" hacia el estímulo, lo que podría explicar el fenómeno de percepción de un movimiento ocular ilusorio. Resulta

necesario entonces encontrar una manera de examinar este fenómeno de percepción de movimiento ocular ilusorio.

1.5 Propuesta: Evaluación en cambios del tamaño pupilar.

Una propuesta que podría ayudar a entender este fenómeno de percepción de movimiento ocular ilusorio es examinar si existe un cambio atencional en los sujetos en el momento en el que este reporta haber realizado un movimiento ocular. Una forma de evaluar un cambio de atención visual es mediante la medición del cambio en el tamaño pupilar.

El cambio de tamaño pupilar es controlado tanto por el Sistema Nervioso Autónomo Parasimpático (SNA Parasimpático) como por el Sistema Nervioso Autónomo Simpático (SNA Simpático). El SNA Parasimpático se encarga principalmente de la contracción de la pupila, la cual se encuentra regulada por el núcleo olivar pretectal, el núcleo de Edinger-Westphal y el ganglio ciliar; mientras que el SNA Simpático controla la dilatación pupilar mediante la actividad antagonista del músculo dilatador de la pupila, que es impulsado por un circuito simpático que se origina en el hipotálamo (Loewenfeld, 1999).

Además, el cambio de tamaño pupilar se regula tanto por el reflejo de la luz de la pupila (RLP), como también por procesos cognitivos. En relación al RLP, se ha descrito que los cambios de tamaño pupilar ocurren como un proceso de adaptación frente a cambios de luminancia mediante contracción o dilatación de la pupila (Becket & Moore, 2017). Respecto a los procesos cognitivos, dentro de la literatura se ha descrito que estos también se involucran en los cambios de tamaño pupilar, tales como la memoria de reconocimiento, la memoria de trabajo y la atención visual (van der Wel & van Steenbergen, 2018). En relación a la memoria

de reconocimiento, se ha visto que en tareas de reconocimiento la pupila tiende a dilatarse en mayor medida frente a objetos conocidos por el sujeto en comparación con objetos novedosos, conocido también como el efecto viejo/nuevo (Otero, Weekes & Hutton, 2011). En relación a la memoria de trabajo, se ha reportado que la pupila tiende a dilatarse progresivamente mientras más memoria de trabajo se involucra en una tarea (Aminihajibashi, Hagen, Foldal, Laeng & Espeseth, 2019). Finalmente, en relación a la atención visual, se ha encontrado que atender encubiertamente a objetos con alta luminancia produce una contracción pupilar (Binda, Pereverzeva & Murray, 2013).

1.6 Relación tamaño pupilar y la atención visual.

Existen más evidencias que sustentan un vínculo entre la atención y los cambios en el tamaño pupilar. Una de estas evidencias sugiere que el cambio de tamaño pupilar refleja la atención del sujeto basada en las características de una superficie, en particular al nivel de luminancia. Al medir el tamaño pupilar de los sujetos mientras atendían selectivamente dos superficies, una brillante y otra oscura, las cuales eran definidas por puntos en movimiento, se encontró que el tamaño pupilar era pequeño cuando se atendía una superficie brillante, mientras que se dilata cuando se atendía una superficie oscura (Binda et al., 2014). Estudios similares llegan a conclusiones que también apuntan a cómo el RLP refleja el foco atencional de los sujetos según niveles de luminancia del objeto. (Mathöt et al, 2013; Mathöt et al, 2015; Brocher, Harbecke, Graf, Memmert & Hüttermann, 2018).

1.7 Relación entre preparación de movimientos sacádicos, percepción visual y tamaño pupilar.

Existen además evidencias sobre la relación entre la preparación de movimientos sacádicos y el cambio del tamaño pupilar, como es el caso del estudio de Jainta y cols (2011), donde se encontró que un cambio en el tamaño pupilar refleja la preparación de un movimiento sacádico, manifestado principalmente como una dilatación pupilar. Este fenómeno ocurre incluso antes de realizar una sacada, donde a mayor latencia de realización de una sacada, menor es el grado de dilatación pupilar. Así mismo, estudios posteriores indican que el RLP revela una preparación de un movimiento sacádico hacia el objeto según su grado de luminancia, donde el ojo toma entre 220-500 ms para adaptarse a cambios de luminancia, a lo cual autores argumentan que esto se debe a la preparación sacádica (Mathöt et al, 2015).

Considerando la evidencia hasta ahora, donde los sujetos tienen dificultad de reportar sus propios movimientos oculares, y los antecedentes del experimento previo realizado en el laboratorio, surge la pregunta de si el reporte de la percepción de movimientos sacádicos propios que no fueron realizados podría deberse a un cambio de foco atencional del sujeto durante la tarea de atención encubierta.

2. Hipótesis y objetivos

2.1 Hipótesis

La percepción de un movimiento ocular ilusorio se relaciona con un cambio de foco atencional, el cual se manifiesta en una dilatación pupilar.

2.2 Objetivo General

Analizar si existe asociación entre el cambio de diámetro pupilar como medida atencional y la percepción de realización de movimientos sacádicos.

2.3 Objetivos específicos cumplidos hasta la fecha:

1. Examinar los datos sobre conducta de los movimientos oculares en una tarea de atención encubierta.
2. Comparar la dinámica pupilar entre las condiciones de reportes sin sacadas, sacadas no reportadas y condiciones controles.
3. Determinar si existe correlación entre la dinámica pupilar con la ocurrencia de reportes sin sacadas y sacadas no reportadas.

3 Metodología:

3.1 Descripción de datos usados:

Para este trabajo se examinaron los datos de videoculografía de sujetos sometidos a un experimento de atención encubierta realizado previamente en el laboratorio.

El tamaño muestral de los datos utilizados consistió en 28 sujetos (15 mujeres) entre 18 a 35 años. Dentro de los criterios de inclusión se consideró a participantes con consentimiento informado firmado, de ambos sexos, de un rango de 18 a 65 años y que tuvieran una visión 20/20 o participantes con visión corregida 20/20. Dentro de los criterios de exclusión, se excluyó a aquellos participantes que presentaron algún deterioro cognitivo que impidiera tener un consentimiento informado firmado. Este proyecto correspondía al proyecto OAIC 942/18,

autorizado por Comité Ético Científico o de Investigación del Hospital Clínico de la Universidad de Chile, asociadas a las muestras del grupo control, y que el propósito de este proyecto no era principalmente el utilizado para este trabajo, si no que es un reanálisis de los datos.

La tarea de este experimento consistió en reconocer emociones provenientes de imágenes de rostros, donde los sujetos debían utilizar únicamente su visión periférica mientras mantenían su mirada fija en una cruz de fijación de 2° visuales de tamaño en la pantalla. Para ello, se sentó a los participantes frente a la pantalla de un computador, con una resolución de 1920 x 1080 píxeles, a una distancia de 70 cm respecto a la pantalla. Adicionalmente, se instruyó al participante de poner su cabeza en una mentonera para restringir los movimientos de su cabeza, para así asegurar que cualquier movimiento registrado fueran solamente de movimientos oculares. Se aplicó un total de 4 bloques, donde cada bloque constaba de 10 ensayos, y cada ensayo se dividía en 5 partes. La primera parte del ensayo consistió en proyectar una cruz de fijación de 2° visuales durante un intervalo de 1000 ms, la cual se encontraba ubicada a 17° visuales respecto al centro de la pantalla en el extremo derecho, y se instruyó al participante de mantener su mirada fija en la cruz de fijación. Durante la segunda parte de cada ensayo, se proyectó una imagen de un rostro, de dimensiones 460 x 662 píxeles, durante 5000 ms a 34° visuales a la izquierda respecto de la cruz de fijación, y se le instruyó al sujeto reconocer la emoción del rostro utilizando únicamente su visión periférica mientras mantenía su mirada fija en la cruz de fijación proyectada previamente, tal como se ve en la **Figura 1**. Además, se le instruyó al participante de que en caso de que percibiera haber realizado un movimiento ocular durante el intervalo de tiempo de exposición del rostro en la pantalla, lo reporte inmediatamente presionando un

botón de joystick. En la tercera parte de cada ensayo, se proyectó otra cruz de fijación durante 500 ms en el centro de la pantalla, con el fin de que el sujeto dirigiera su mirada al centro de la pantalla. Finalmente, la última parte de cada ensayo consistió en una ronda de preguntas, las cuales debían ser respondidas en forma verbal y cuyas respuestas fueron registradas por el experimentador. La primera pregunta fue: “¿El rostro manifiesta alguna emoción? Responda Sí o No”, a lo cual el sujeto debía responder de manera verbal con un sí o un no. Si el sujeto respondía con un “no”, el experimentador anotaba la respuesta, y marcaba la emoción como “Neutral”, y se continuaba con el siguiente ensayo. En cambio, si el sujeto respondía un “sí”, se le aplicaba la segunda pregunta: “¿Qué emoción observa en el rostro? Enojo, Alegría, Tristeza o Sorpresa”, a lo cual el participante debía responder de manera verbal cuál de las emociones de las alternativas reconoció. Cabe destacar que los participantes mantenían su atención en el desempeño del reconocimiento de emociones, y reportar el movimiento ocular realizado era considerada una tarea secundaria. Las imágenes de rostros utilizadas en el experimento provienen de una selección de la base de datos de Karolisnka Directed Emotional Faces (KDEF), donde se seleccionaron los rostros relativos a Enojo, Alegría, Tristeza, Sorpresa y Neutral (Lundqvist, Flykt & Ohman, 1998).

Los datos de videoculografía de los sujetos sometidos a una tarea de atención encubierta fueron registrados mediante el uso de eye-tracker, modelo Eye-Link 1000 (SR Research), en el Laboratorio de Neurosistemas de la Universidad de Chile. Para efectos de este trabajo, se trabajó solamente con la información referente al intervalo de tiempo de exposición de la imagen del rostro, correspondiente a la segunda parte de cada ensayo, con una duración de 5000 ms del estímulo. A partir de este intervalo, se extrajo la siguiente información: 1)

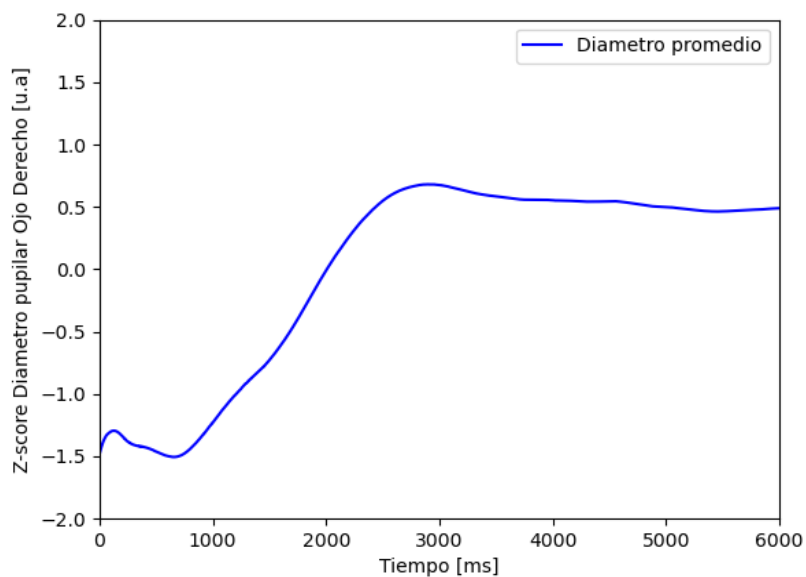
Tamaño pupilar. El tamaño pupilar corresponde al diámetro de la pupila del ojo derecho. El eye-tracker entrega los valores de diámetro pupilar como unidades arbitrarias que varían entre 400 a 1600 unidades, con una precisión de 1 unidad. 2) Intervalo de tiempo inalterado por cambio de luminancia. Dado que la exposición del estímulo de rostros provoca cambios autonómicos producto del cambio de luminancia, los cuales no son relevantes para este estudio, se requirió examinar en qué momento de todo el intervalo deja de haber una alteración del diámetro pupilar producto del estímulo. Para ello, se necesitó realizar un promedio de todos los datos del intervalo de tiempo del ensayo seleccionado. Dado que la dinámica pupilar de cada individuo es distinta por razones biológicas y estructurales, se realizó una normalización mediante z-score, un método de normalización basada en el número de desviaciones en la que se encuentra el dato respecto a la media, para luego realizar un promedio general de todos los ensayos, tal como se ve en la **Figura 2**. Según esta gráfica, el comportamiento del diámetro pupilar se vuelve estable alrededor de los 2500 ms, sin embargo, dado que el número de RSS se redujo drásticamente al considerar la ventana temporal a partir de los 2500 ms, se decidió

considerar como ventana temporal para el análisis a partir de 2000 ms hasta 6000 ms de la tarea, quedando entonces con un intervalo útil de 4000 ms.

Figura 2. Promedio global del diámetro pupilar. En azul, Z-score de diámetro pupilar promedio del ojo derecho de todos los ensayos con respecto al tiempo.

3) Tiempo de inicio y término de movimientos sacádicos. Estos tiempos están definidos por el eye tracker como el momento en que el sujeto realizó una sacada arrojando el tiempo de inicio y término de la sacada, junto con la posición inicial y final de la

sacada tanto en el eje X como en el eje Y. Los datos que registra este Eye-Tracker son: movimiento



horizontal (Eje X), movimiento vertical (Eje Y), diámetro pupilar y tiempo de registro. Cabe destacar que para efectos de este trabajo se definirá como sacada aquellos movimientos oculares que recorren una distancia mayor a 2° visuales, debido a que el tamaño de la cruz de fijación en la que se mantenía la mirada era de 2° visuales.

4) Número de movimientos sacádicos. Estos corresponden al número de sacadas mayores a 2° visuales ejecutadas por cada sujeto en la ventana de tiempo de 4000 ms de análisis de la tarea. 5) Tiempo de reporte, el cual se define como el momento en que el sujeto presiona un botón para reportar haber realizado un movimiento ocular, el cual luego es registrado en el eye-tracker. 6) Número de reportes. Corresponden al número de reportes realizados por cada sujeto durante la tarea en el intervalo de 4000 ms de análisis de estudio.

3.2 Estrategia de análisis computacional para procesamiento y análisis de datos.

Se diseñó una estrategia de procesamiento de datos y posterior análisis, donde primero se adquirieron competencias computacionales en el lenguaje de programación de Python versión 3.8. Posterior a ello, se diseñó una estrategia de procesamiento de datos, con el fin de verificar la conducta ocular a partir de los datos obtenidos. La estrategia utilizada fue la siguiente: a) Extracción de datos, donde se seleccionaron todos los datos pertenecientes al intervalo de tiempo de exposición del estímulo de rostros, correspondiente a 5000 ms, donde finalmente se terminó utilizando 4000 ms debido a la influencia de los cambios de luminancia producto del estímulo, b) Depuración de datos, donde se realizó un filtrado de datos que presentaran una pérdida importante de información, además de una

Interpolación para rellenar aquella información faltante de datos producto de pestañeos y un filtro de pasa baja para suavizar los datos, c) Clasificación de ensayos, donde se clasificaron los datos según la presencia o ausencia de reportes y sacadas, y los ensayos según la presencia de RSS y SNR. Los programas creados para el procesamiento de los datos pueden ser encontrados en el siguiente repositorio en Github: <https://github.com/AlbertoCuevasP/C-digo-tesis.git>, el cual contiene los códigos utilizados para cumplir todos los objetivos de este trabajo. A continuación se detalla cada proceso realizado a partir de la estrategia computacional.

3.3 Extracción de datos:

A partir de los datos del experimento previo del laboratorio, se aplicó un programa de extracción de datos para cada sujeto sometido a la tarea de atención encubierta. Dado que la ventana de análisis de interés de cada ensayo corresponde al momento en que se proyectó la imagen del rostro, se seleccionó la ventana temporal desde el inicio de la proyección del rostro hasta el término de exposición del rostro, correspondiente a 5000 ms, tal como se observa en la **Figura 1**, sin embargo, dado que el estímulo del rostro provoca cambio autonómicos producto del cambio de luminancia, se eliminaron los primeros 1000 ms, quedándose con 4000 ms de análisis. Para más detalles, revisar **Figura 2**. De esta ventana temporal, se extrajeron los datos referentes al diámetro pupilar relativo del ojo derecho, posición de pupila del ojo derecho en eje X, posición de pupila del ojo derecho en el eje Y, tiempo de registro, tiempo de Inicio y término de un movimiento sacádico, y tiempo de reporte subjetivo.

3.4 Depuración de datos:

A partir de los datos obtenidos mediante la extracción de datos, se filtraron aquellos sujetos que presentaron una pérdida de datos mayor o igual al 80% de los ensayos totales de cada sujeto. Dado que la señal de diámetro pupilar suele estar contaminada por los pestañeos que realizan los sujetos durante la tarea, lo cual provoca artefactos en la señal, se aplicaron dos programas de limpieza y suavización de datos, los cuales son: a) Interpolación y b) Filtro de pasa baja. Para la Interpolación de datos, es decir, rellenar los datos faltantes producto de los pestañeos de los sujetos, se tomaron puntos de referencia para poder realizar el rellenado. Para ello, se consideró el inicio y término de cada pestañeo dentro de cada ensayo, y luego se utilizaron aproximadamente 50 puntos antes del inicio y término del pestañeo para estimar y rellenar los datos faltantes producto del pestañeo obteniendo así una curva libre de pestañeos. Para el caso del filtro de pasa baja, dado que la interpolación no logró eliminar todos los artefactos, sobre todo de aquellas curvas que presentaron una pérdida grande de datos en el ensayo, se aplicó un filtro de pasa baja, eliminando así las señales que fueran menores a 1 Hz. Luego de aplicar la interpolación y el filtro de pasa baja, se eliminaron todos los ensayos que, a pesar de haber aplicado los programas de interpolación y filtro de pasa baja, no se pudieron recuperar, los cuales presentaron una pérdida de datos mayores o iguales al 80% de los datos.

3.5 Criterios de clasificación de ensayos:

A partir de los datos depurados, se utilizaron los datos de diámetro pupilar, tiempo de inicio de sacada y tiempo de momento de reporte, con el fin de poder examinar en qué momento a lo largo de los ensayos ocurrieron los eventos de inicio de

reporte. Para el caso de las sacadas, se utilizaron los valores de tiempo de inicio y término de sacada, y sus respectivas posiciones en el eje X e Y, con el fin de poder calcular la distancia recorrida por las sacadas. Luego, se clasificaron los ensayos según la presencia de eventos de sacadas y/o reportes según los siguientes criterios: 1) *Reportes sin sacadas (RSS)*: Se consideró un RSS como aquel reporte que no presentó un movimiento sacádico mayor a 2° visuales en una ventana de tiempo de 300 ms a 1000 ms previo al reporte, tal como se ve en la **Figura 3**. Este intervalo de tiempo fue elegido en base al tiempo de reacción de una persona frente a la percepción de un estímulo visual, el cual se definió como 1000ms previo al reporte (Abbasi-Kesbi, Memarzadeh-Tehran, H., & Deen, 2017). 2) *Sacadas no reportadas (SNR)*: Se consideró como SNR como aquellas sacadas que no fueron reportadas durante un periodo de tiempo de 1000ms luego del inicio de una sacada. Esta consideración también se basa en el tiempo de reacción de una persona frente a la percepción de un estímulo visual (Abbasi-Kesbi et al., 2017). 3) *Condición control*. Se consideró como ensayo control todos aquellos ensayos que no presentaron ni reportes ni movimientos sacádicos mayores a 2° visuales. A partir de estos ensayos, se realizó un surrogado respecto a la condición de RSS y SNR, donde se utilizaron ensayos controles aleatorios basados en el número de RSS y SNR en cada sujeto, y donde cada surrogado construido ocupó el mismo tiempo de ocurrencia de cada RSS y SNR respectivamente.

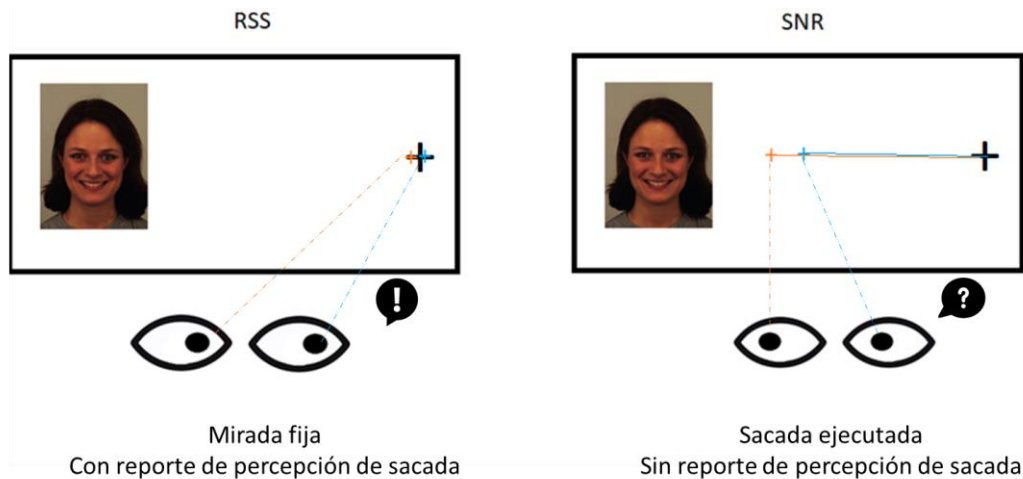


Figura 3. Esquema de RSS y SNR. El centro del estímulo se encontraba a 17° visuales con respecto al centro de la pantalla, al igual que la cruz de fijación, teniendo un total de 34° visuales desde la cruz de fijación al centro del estímulo. Se define como RSS cuando el sujeto, durante el ensayo, mantuvo su mirada fija en la cruz de fijación y reportó haber realizado un movimiento sacádico, pero que nunca los hizo, mientras que una SNR se define cuando el sujeto, durante el ensayo, realizó una sacada mayor a 2° visuales, y sin embargo no la reportó. En este esquema, el color naranja refleja la mirada del ojo izquierdo, mientras que el color celeste refleja la mirada del ojo derecho. La línea achurada y la cruz representa donde el sujeto mantenía su mirada, mientras que la línea continua representa el desplazamiento de la sacada.

3.6 Cómputo de datos:

Una vez obtenida la clasificación de sacadas y reportes, se realizó un cómputo de datos tanto antes como después de realizar el filtrado de datos, con el fin de examinar la población de datos de cada variable a ser estudiada. El cómputo de datos contenía la siguiente información: a) Total sujetos, b) Total ensayos, c) número de reportes, d) Ensayos con RSS, e) Número de sacadas $> 2^\circ$ visuales, f) Ensayos con SNR, g) Ensayos con sacadas reportadas.

3.7 Comparación dinámicas pupilares:

Con el objetivo de analizar si existe asociación entre el cambio del diámetro pupilar con la percepción de realizar movimientos sacádicos, se requirió comparar las

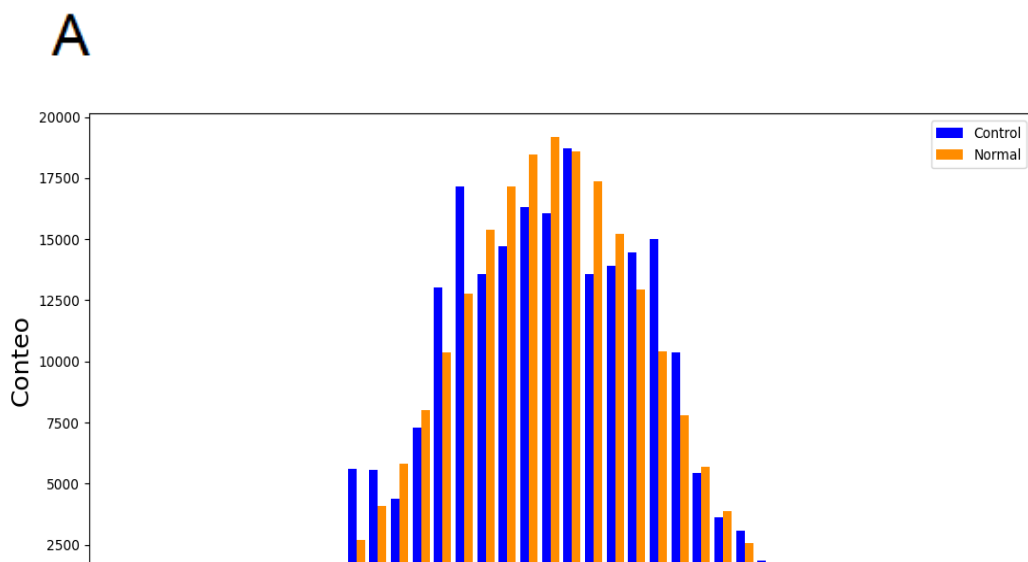
dinámicas pupilares entre cada una de las condiciones de estudio, es decir, RSS, SNR y sus respectivos surrogados. La comparación utilizada fue mediante la creación de curvas promedio para la condición de RSS, SNR y control, y para ello, se creó una estrategia de análisis comparativo de curvas, la cual requiere la creación de programas para los siguientes procedimientos: a) Normalización de los datos, donde se realizarán normalizaciones para poder comparar las distintas dinámicas pupilares de cada sujeto, b) Promedio de ensayos, donde para poder comparar los ensayos dentro de cada sujeto, se aplicará un programa que promedie cada ensayo que tenga RSS, SNR, y los surrogados construidos, c) Promedio de sujetos, donde para poder comparar la dinámica pupilar entre cada sujeto, se aplicará un programa que permita promediar todos los sujetos que presenten RSS, SNR, y los surrogados respectivos, y d) Análisis estadístico, con el fin de poder evaluar el test de hipótesis respectivo.

Los programas creados para la comparación de las curvas de promedio de sujetos pueden ser encontrados en el siguiente repositorio en Github: <https://github.com/AlbertoCuevasP/C-digo-tesis.git>, el cual contiene los códigos utilizados para cumplir todos los objetivos de este trabajo. A continuación se detallará cada uno de estos procedimientos mencionados anteriormente.

3.8 Normalización de los datos:

Tal como se describió en procedimientos anteriores, la dinámica pupilar en cada sujeto es variable entre sí, por lo tanto, para poder realizar un promedio entre los ensayos, y posteriormente de sujetos, resulta necesario hacer una normalización de los datos.

Uno de los requisitos para la normalización es verificar que los datos de diámetro pupilar a lo largo del tiempo presentan una distribución normal, es por esto que se procedió a aplicar un test de Kolgomorov-Smirnov, correspondiente a una prueba no paramétrica que determina la bondad de ajuste de dos distribuciones de probabilidad, lo cual se probó tanto para el grupo de datos de diámetro pupilar cuando presentaron RSS, SNR, como también para la condición control. Sin embargo, dado que el número de datos es mayor a $N = 5000$, los valores de p-value obtenidos no son precisos (p-value RSS = indefinido, p-value = SNR = $6.209 \text{ e-}116$, p-value Control = $3.295 \text{ e-}79$), dado que el test no soporta una cantidad de datos enormes, por teorema de límite central se asume normalidad cuando el $N \geq 5000$, tal como se observa en la **Figura 4**.



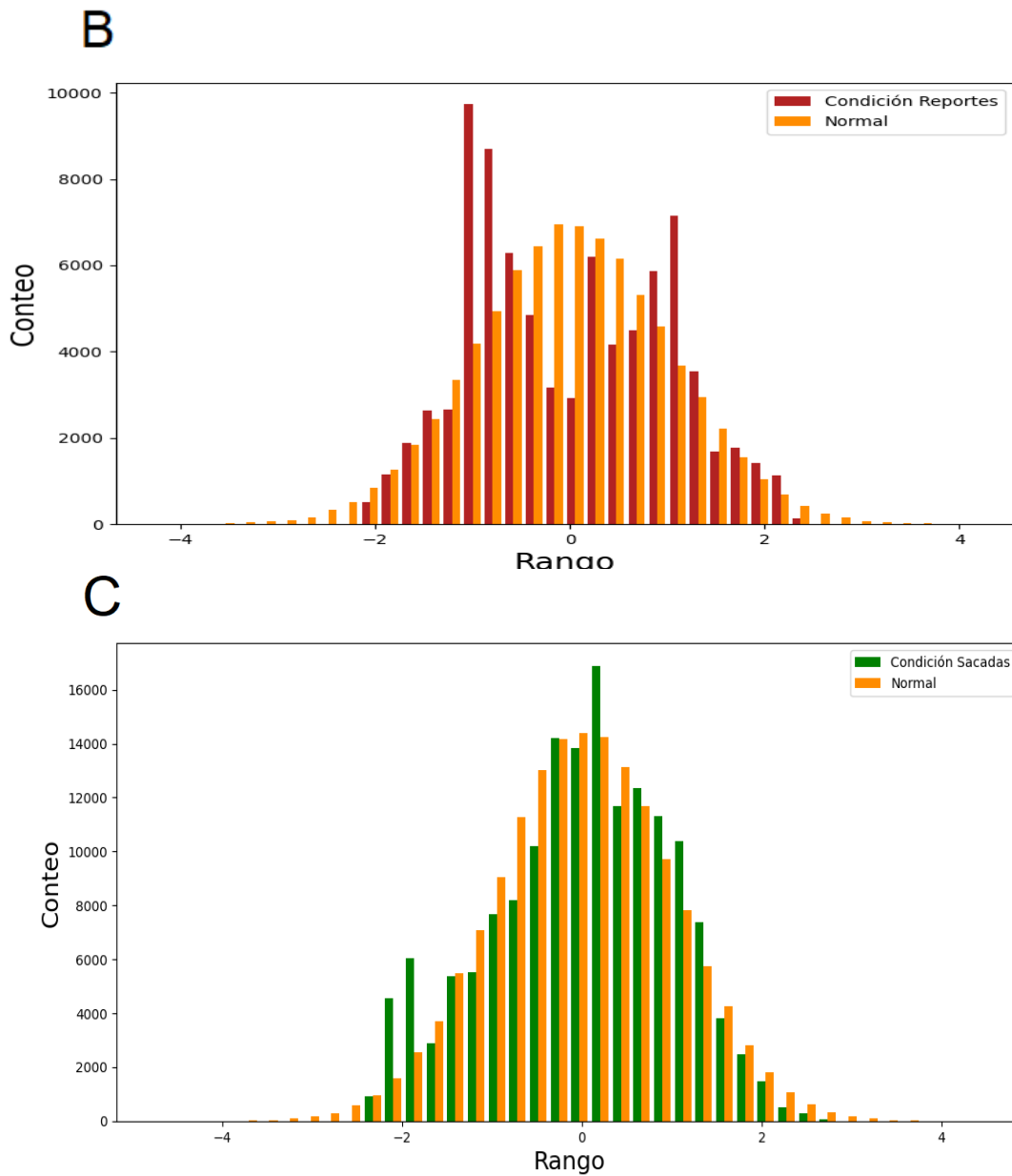


Figura 4. Histograma de distribución de datos: Se realizó un histograma de ajuste de normalidad para los datos de todos los valores de tamaño pupilar de cada ensayo que presenta RSS, SNR, y Control, con el fin de verificar que los datos siguieran una distribución normal. En A, Distribución normal (Naranja) respecto a Controles (Azul). En B, Distribución Normal (Naranja) respecto condición Reportes (Rojo), En C, Distribución Normal (Naranja) respecto a Condición

Sacadas(Verde). Se aplicó además un test de Kolgomorov-Smirnov para corroborar normalidad, sin embargo, dado que el número de datos es mayor a $N = 5000$, los valores de p-value obtenidos no son precisos (p-value RSS = indefinido, p-value SNR = $6.209e-116$, p-value Control = $3.295e-79$), debido a que el test no soporta una cantidad de datos enormes, por lo que finalmente, por teorema de límite central, se asume normalidad cuando el $N \geq 5000$.

Con el fin de corroborar que los análisis son coherentes, y los resultados no son sólo producto de la normalización empleada, se realizaron dos tipos de normalizaciones y estandarizaciones. Por una parte, se realizó una estandarización y normalización mediante el método de Z-score, el cual indica el número de desviaciones estándar se encuentra el dato con respecto a la media. Este procedimiento se aplicó antes de la realización del promedio de ensayos. Por otra parte, se realizó una normalización mediante el método de Corrección por Línea de Base, el cual se realizó antes de realizar un promedio de sujetos. Mediante este tipo de normalización, se seleccionaron 50 puntos antes de cada ensayo, para después calcular el promedio de estos puntos y restar los valores al resto del ensayo, teniendo así un gráfico de promedio de ensayos por sujeto.

3.9 Promedio de ensayos:

Se realizó un promedio de todos los ensayos que presentaron RSS y SNR en cada sujeto. Para poder obtener un promedio que sea representativo, es necesario tener al menos 3 o más ensayos por sujeto que presenten tres o más RSS y SNR, respectivamente. Aquellos sujetos que presentaron menos de tres ensayos por sujeto fueron excluidos del análisis. Luego del conteo de sujetos que cumplieron con el criterio necesario, se procedió a hacer el promedio de ensayos en cada sujeto. Para ello, para los ensayos de RSS y SNR de la población de sujetos que

cumplió con el criterio, se tomó como referencia el momento de ejecución de RSS y SNR como tiempo 0, y a partir de ese momento se extrajo una ventana temporal de 1000ms antes y 1000 ms después del evento de referencia. Finalmente, para cada condición evaluada se procedió a hacer un promedio punto por punto, es decir, se promediaron todos los valores de diámetro pupilar de cada ensayo asociado a un milisegundo en particular, y luego se creó una curva promedio de ensayos con todos los promedios obtenidos para cada ms de la ventana temporal extraída.

Para el caso de los surrogados, estos se construyeron a partir de los ensayos controles, es decir, aquellos que no presentaron ni reportes ni sacadas a lo largo del ensayo. Para ello, por cada número de ensayos que presentaron RSS o SNR, se tomaba un ensayo aleatorio en el sujeto, se tomaba como referencia el tiempo de ejecución del RSS o SNR, y se seleccionaba una ventana temporal de 1000 ms antes y 1000 ms después del punto de referencia, siendo este punto el tiempo 0, y posteriormente se volvieron a promediar las ventana temporales tal como se describió en el procedimiento anterior.

3.10 Promedio de sujetos:

Posterior al cálculo de promedios de ensayos, se realizó un promedio de sujetos de los valores de tamaño pupilar para ambas normalizaciones y para cada condición, es decir, cuando presentaban RSS, SNR y sus respectivos surrogados, con el fin de obtener curvas promedio del tamaño pupilar normalizado que pueda ser comparables entre sí. Para ello, nuevamente se realizó el procedimiento de promedio punto por punto, tal cual fue descrito anteriormente, sin embargo, esta vez el promedio se realizó respecto a las curvas promedio de ensayos de cada

sujeto, para luego tener una curva promedio final de todos los sujetos que presentaron RSS, SNR y sus respectivos surrogados. Posterior a ello, se graficó la condición de RSS y SNR con sus respectivos surrogados, para luego comparar el comportamiento de las curvas.

3.11 Análisis estadístico:

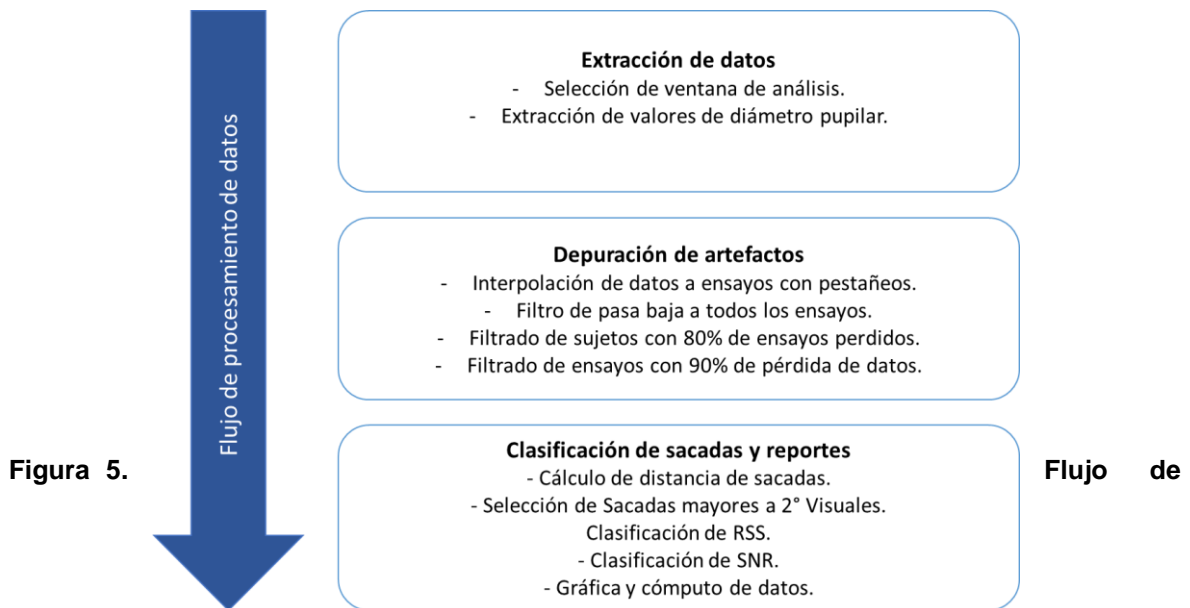
Una vez terminado de crear las curvas promedios, se aplicó un análisis estadístico, mediante un test de ANOVA para verificar si existían diferencias entre la condición evaluada y su respectivo surrogado. Finalmente, se aplicó un t-test para cada segundo de la ventana de análisis de los valores de diámetro pupilar normalizado mediante Z-score y corrección por línea de base, con el fin de establecer en qué tiempo existen diferencias significativas entre la población de RSS y su respectivo surrogado, y de SNR con su respectivo surrogado. Los programas creados para el análisis estadístico pueden ser encontrados en el siguiente repositorio en Github: <https://github.com/AlbertoCuevasP/C-digo-tesis.git>.

4. Resultados:

4.1 Verificación de conducta ocular.

Para examinar los datos sobre conducta ocular de los movimientos oculares, se realizó un cómputo de datos, la cual se realizó a partir de la Estrategia de procesamiento de datos. Esta estrategia constaba de los siguientes pasos: a)

Extracción de datos, b) Depuración de datos, y c) Clasificación de eventos, tal como se indica en la **Figura 5**.



procesamiento de datos mediante estrategia de análisis de datos. La estrategia de procesamiento de datos para verificar la conducta ocular siguió los siguientes pasos: a) Extracción de datos, b) Limpieza de datos, c) Interpolación de datos, d) Filtro de pasa baja, e) Clasificación de sacadas y reportes realizados.

4.1.1 Extracción de datos:

A partir del programa de extracción de datos, se pudo obtener para cada ensayo de los 28 sujetos iniciales una ventana temporal de 4000 ms de la región de interés, teniendo en total la información de 1120 ensayos. De esta información se pudo obtener: a) Diámetro pupilar relativo del ojo derecho, b) posición de pupila del ojo derecho en eje X, c) Posición de pupila del ojo derecho en el eje Y, d) Tiempo de registro, e) Tiempo de Inicio y término de un movimiento sacádico, y f) Tiempo de

reporte subjetivo. A partir de los datos de inicio y término de movimientos sacádicos, y de diámetro pupilar en posición en el eje X e Y, se procedió a hacer un cálculo de distancia para ver cuantas sacadas tenían una distancia mayor a 2° visuales, para lo cual se obtuvo que el valor total fue 126 sacadas mayores a 2°Visuales. Con el tiempo de reporte subjetivo, se realizó un conteo de reportes, donde se encontró que el número de reportes totales fue de 83. A partir de esta información, se obtuvo el cómputo inicial de datos, tal como se observa en la **Tabla 1**.

Cómputo inicial	
Total Sujetos	28
Total Ensayos	1120
n° de Reportes	83
n° de Sacadas	126

Tabla 1. Cómputo inicial de total de sujetos, ensayos, reportes y sacadas.

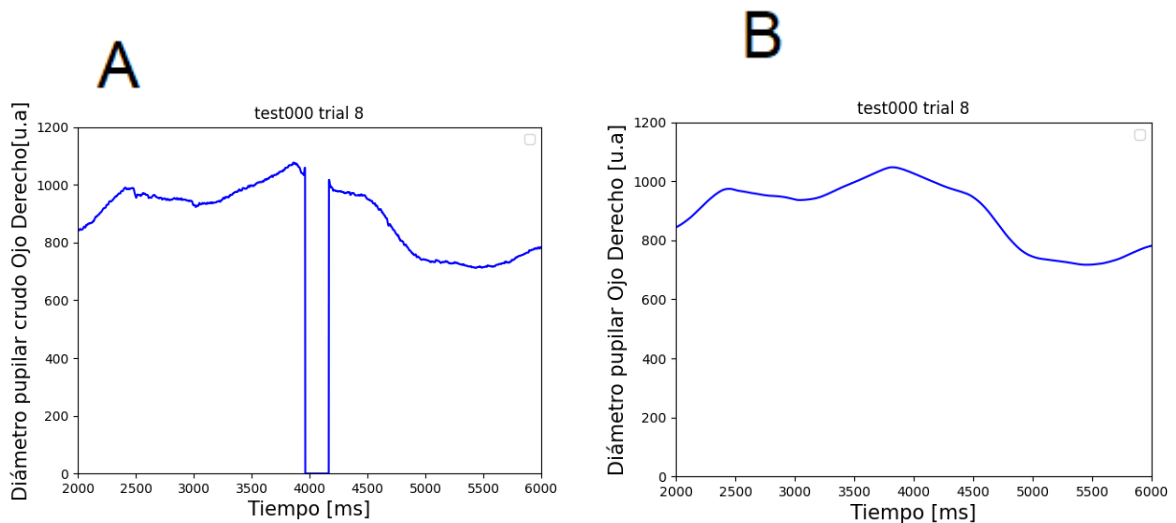
4.1.2 Depuración de datos.

Dado que se necesitó filtrar aquellos sujetos y datos que podrían estar estar alterados producto de pestañeos, o pérdida de datos, se realizó una depuración de datos, donde se aplicó una interpolación y un filtro de pasa baja.

Para la interpolación, esta se aplicó en todos los ensayos que presentaron un pestañeo, rellenando así cualquier falta de datos en base a la reconstrucción basada en los puntos adyacentes a la pérdida de datos. Para el filtro de pasa baja, esta se aplicó para suavizar los datos, dado que a pesar de que se realizó una interpolación, para algunos ensayos se requirió de otro tipo de procedimiento.

Posterior al proceso de filtrado, se logró la eliminación de artefactos, tal como se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6. Ejemplo de gráfico de ensayos antes y después de tratamiento de filtrado. Los gráficos muestran la influencia tanto antes como después del tratamiento mediante interpolación y filtro de pasa baja. En **A**, gráfica de datos antes del tratamiento de interpolación y filtro de pasa baja, con un artefacto producto de un pestañeo entre ~3800 y ~4300 ms. En **B**, gráfica de datos después



del tratamiento con interpolación y filtro de pasa baja. Notar los cambios de escala en el eje Y.

Al comparar las curvas antes del proceso del tratamiento por interpolación y filtro de pasa baja (**Figura 6A**), como después del tratamiento (**Figura 6B**), se puede observar que no se altera la integridad de los datos, ni tampoco se altera el comportamiento de las curvas, por lo tanto, el tratamiento de interpolación y filtrado de datos es adecuado.

Luego del proceso de filtrado, para completar la depuración de datos se procedió a descartar los sujetos y ensayos con pérdida de datos. Para el caso de los sujetos, de los 28 sujetos se descartaron 2 sujetos debido a una falta importante de datos referentes al valor de diámetro pupilar del ojo derecho, superando más del 80% de

ensayos sin datos, quedando con 26 sujetos útiles, correspondiente a 1040 ensayos totales. De los 26 sujetos, se eliminó un total de 67 ensayos por presentar una falta de datos mayor al 80% de datos por ensayo, quedando con un total de 973 ensayos a analizar.

4.1.3 Clasificación de sacadas y reportes

Luego de la depuración de datos, se realizó una clasificación de los ensayos según la presencia de RSS y SNR. Primero, se examinó cuál era el número de reportes y sacadas luego del filtrado, a lo cual se encontró que el número de reportes era de 19, y las sacadas 103. Luego se hizo un conteo sobre cuáles de los reportes correspondían a RSS, cuantas de las sacadas correspondían a SNR, y cuales de las sacadas correspondían a sacadas reportadas. Se encontró que de los 19 reportes, 18 correspondían a RSS, mientras que de las 103 sacadas, 102 eran SNR. Finalmente, se hizo un conteo de aquellos los sujetos que cumplieran con la condición de presentar 3 o más ensayos con más RSS y 3 o más ensayos SNR, de lo cual se encontró que solo 15 presentaron 3 o más eventos de estudio, teniendo así un total de 550 ensayos. De los 15 sujetos que cumplían con la condición, 4 sujetos presentaron 3 o más RSS, y 13 sujetos presentaron 3 o más SNR, tal como se observa en la **Tabla 2**.

	Cómputo después de depuración
Total Sujetos	15
Total Ensayos	550
n° de Reportes	19
Ensayos con RSS	18

n° de Sacadas	103
Ensayos con SNR	102
Sujetos con 3 o más RSS	4
Sujetos con 3 o más SNR	13

Tabla 2. Cómputo de datos después de depuración de datos.

Adicionalmente, se hizo un análisis antes y después del depurado de datos para examinar cuantos ensayos presentaron sacadas reportadas, a lo cual se encontró que antes del depurado habían 6 ensayos con sacadas reportadas, y después del depurado solo 1 sacada reportada.

4.1.4 Cómputo de datos:

Finalmente, se hizo una tabla comparativa de los resultados antes de la depuración y después de la depuración, tabulando también el porcentaje de datos restantes, con el fin de verificar si el número de datos es suficiente para seguir adelante con el análisis, tal como se observa en la **Tabla 3**.

	Cómputo antes de depuración	Cómputo después de depuración	Porcentaje datos restantes
Total Sujetos	28	15	57,69 %
Total Ensayos	1120	550	49,10 %
n° de Reportes	83	19	22,89 %
Ensayos con RSS	77	18	23,37 %
n° de Sacadas	126	103	81,74 %
Ensayos con SNR	120	102	85 %

Tabla 3. Cómputo de datos antes y después del proceso de filtrado.

A partir de la **tabla 3** se desprende que hubo 4 tipos de comportamientos oculares durante la tarea de atención encubierta: a) RSS, b) SNR, c) Sacadas reportadas y d) condición control.

En la **Tabla 3** se puede observar que la reducción de datos es cercana o superior al 50% de los datos iniciales, a excepción del caso del número de reportes y el número de ensayos con RSS, el cual corresponde a aproximadamente el 20% de la muestra original, sin embargo, sigue teniendo un número de sujetos considerable para tener un promedio que sea representativo de los datos ($N = 4$). Esto quiere decir que efectivamente hay datos suficientes para decir que hubo RSS, SNR y condiciones controles.

4.2 Comparación de conductas oculares

Con el fin de comparar la dinámica pupilar en las distintas condiciones a examinar, se aplicó una estrategia de análisis de datos, que consistía en: a) Normalización de datos, b) Promedio de ensayos y c) Promedio de sujetos, donde el flujo del proceso para comparación de datos con más detalles se puede observar en la **Figura 7**.

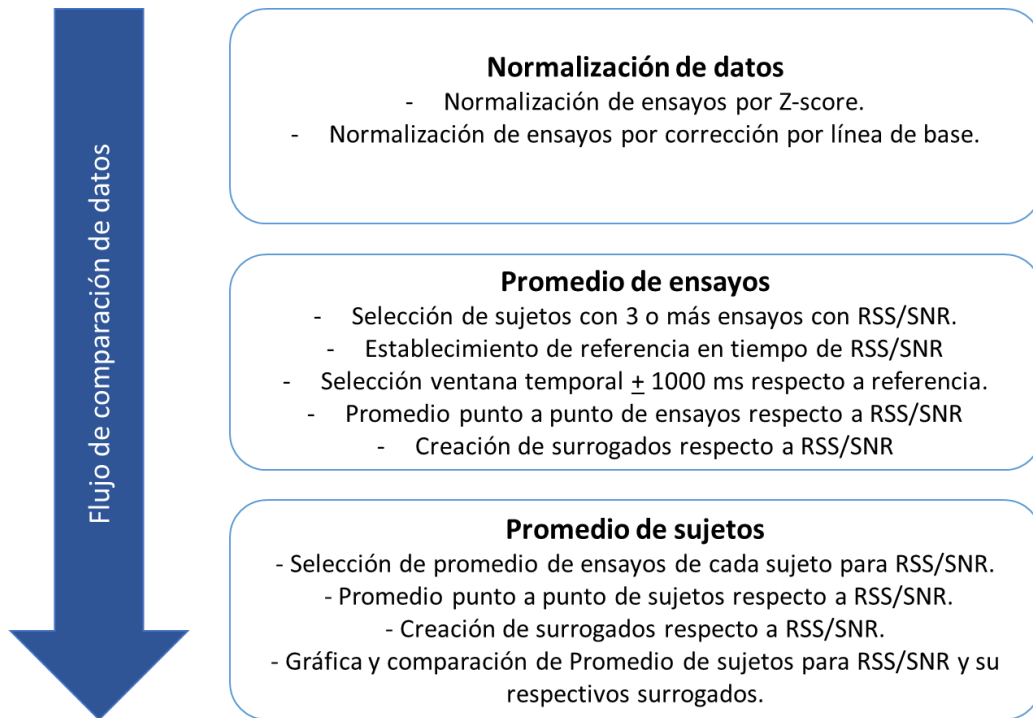


Figura 7. Flujo de procedimiento para comparación de datos.

4.2.1 Normalización de datos:

Se aplicaron dos tipos de normalizaciones a lo largo de la ventana temporal de análisis luego de la depuración de datos, una mediante Z-score, y otra mediante Corrección de línea de base, con el fin de poder promediar a los ensayos provenientes de distintos sujetos que presentaran RSS y SNR, tal como se observa en la **Figura 8**.

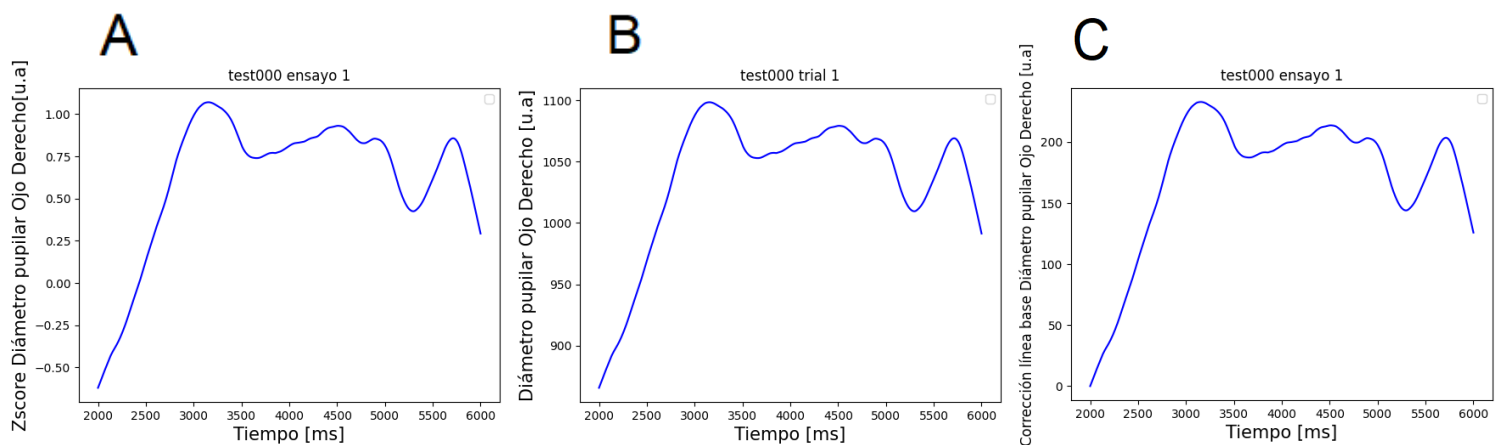


Figura 8. Normalización mediante el método de Z-score y corrección por línea de base.

Ejemplos representativos del efecto de normalizaciones. En A, ejemplo de ensayo filtrado previo a ser normalizado, En B, ejemplo de ensayo posterior a una normalización mediante Z-score, en C, ejemplo de ensayo posterior a una normalización por corrección de línea de base.

A partir de la **Figura 6** se desprende que, tanto el dato crudo (**Figura 6A**), como el dato normalizado por Z-score (**Figura 6B**) como por corrección por línea Base (**Figura 6C**) presentan el mismo comportamiento de la curva, sin presentar algún cambio a parte de la escala del valor de diámetro pupilar, por lo tanto, se desprende que las normalizaciones son adecuadas para hacer el análisis.

4.2.2 Promedio de ensayos:

Se realizó un promedio punto por punto de los ensayos de cada sujeto que cumplieron con la condición de tener 3 o más RSS, correspondiente a 4 sujetos, y que tuvieran 3 o más SNR, correspondientes a 13 sujetos. Para la construcción de surrogados, a partir de cada RSS y SNR se tomó un ensayo aleatorio, y se hizo un promedio punto a punto de cada segundo de estos ensayos. Las curvas de Diámetro pupilar quedaron alineadas respecto al evento de referencia correspondiente, donde para RSS quedó alineado en 0 al tiempo de ocurrencia de

reporte, y para SNR quedó alineada en 0 respecto al inicio de un movimiento sacádico, tal como se observa en la **Figura 9**.

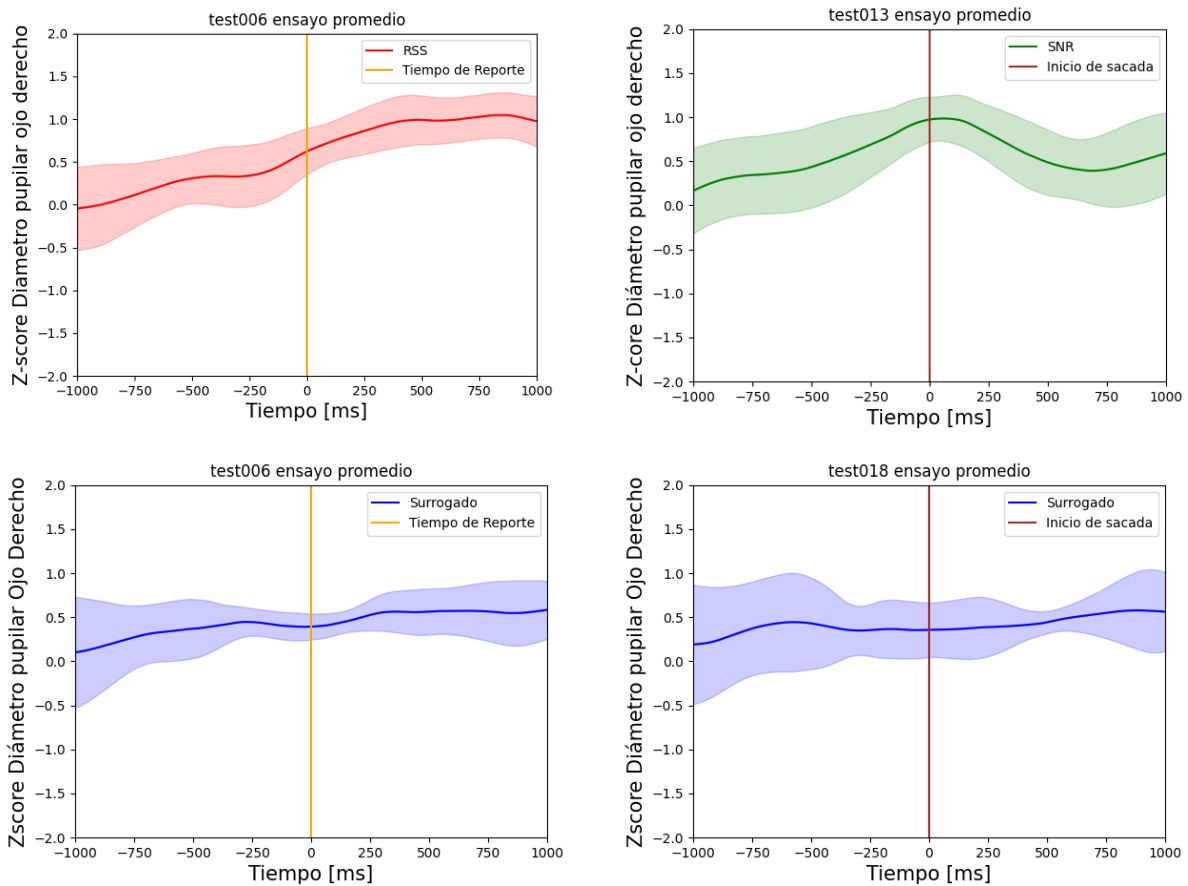


Figura 9. Ejemplo de Promedio de ensayos.

Ejemplos representativos de promedios de ensayos de sujetos que presentaron 3 o más RSS y 3 o más SNR, junto a sus respectivos surrogados. Las curvas se encuentran alineadas al tiempo 0, correspondiente al momento de ocurrencia del evento (RSS o SNR). En **A**, la curva roja junto a sus desviaciones estándar corresponde un ejemplo de promedio de ensayos luego de aplicarle Z-score al diámetro pupilar ojo derecho de los ensayos donde se presentaron RSS. En **B**, la curva verde corresponde un ejemplo de promedio de ensayos luego de aplicarle Z-score al diámetro pupilar del ojo derecho de los ensayos donde se presentaron SNR, en **C**, surrogado de Figura **A**, y en **D**, surrogado de Figura **B**.

A partir de los gráficos de ejemplo de la **Figura 9**, para el caso de RSS se puede (**Figura 9A**), al compararla con su respectivo surrogado (**Figura 9C**), se observa

que el comportamiento de la curva de RSS presenta comportamientos distintos tanto antes como después del tiempo de reporte, donde antes del reporte existe un comportamiento de contracción pupilar y que lentamente, posterior al reporte, existe una dilatación pupilar, mientras que para el caso del surrogado, el comportamiento tiende a ser homogéneo a lo largo de la ventana temporal. Algo similar se puede observar en el caso de la condición de SNR (**Figura 9B**) al compararla con su surrogado de sacadas (**Figura 9D**), donde en la **Figura 9B** aproximadamente entre -500 ms y 500 ms existe un comportamiento de dilatación pupilar que va decayendo lentamente, en comparación con el surrogado, el cual presenta un comportamiento homogéneo a lo largo de toda la ventana temporal. Estos resultados sugieren que la conducta ocular cambia cuando ocurre un RSS, y cuando ocurre una SNR.

4.2.3 Promedio de sujetos:

A partir del promedio de ensayos se realizó un promedio de sujetos tanto para la condición de RSS (N=4), SNR (N=13), y sus respectivos surrogados. Tanto la condición de RSS como la de SNR fue graficada con su respectivo surrogado. Este procedimiento se realizó tanto para la normalización por Z-score como para la normalización por corrección de línea base, tal como se observa en la **Figura 10**.

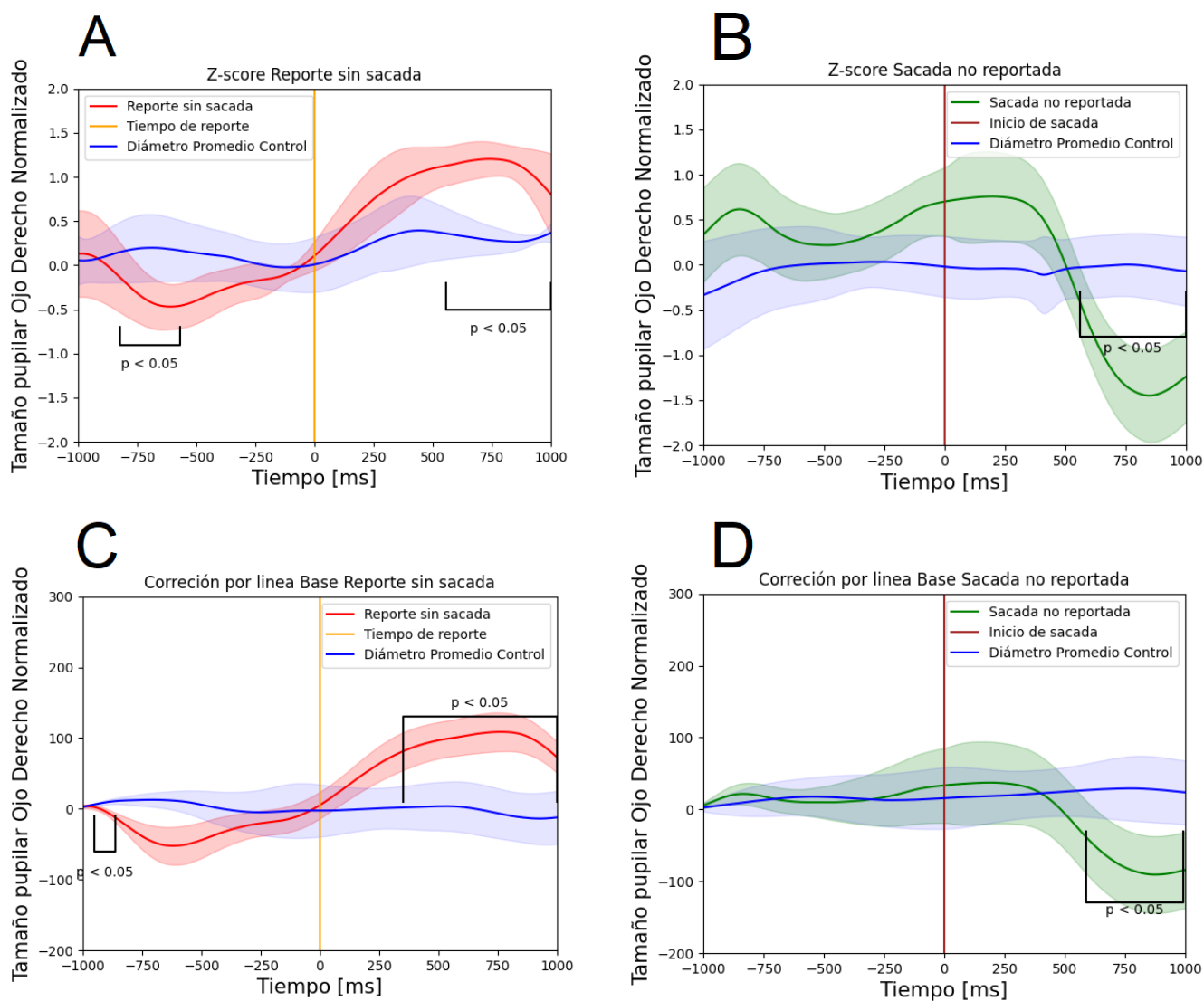


Figura 10. Comparación comportamiento ocular en promedio de sujetos revela posible cambio atencional. Curvas de promedio de sujetos, con sus respectivos valores de significancia de t-test punto por punto para ambos tipos de normalizaciones. Cada curva fue alineada al tiempo 0, donde la línea vertical negra representa el momento en que ocurrió el evento (RSS y SNR). En **A**, la curva roja representa el promedio de sujeto del Z-score del diámetro pupilar con respecto al tiempo cuando ocurren RSS, mientras que la curva azul corresponde a su respectivo surrogado, en **B** cuando se aplica la normalización por corrección por línea de base. En **C**, la curva verde representa el promedio de sujeto del Z-score del diámetro pupilar con respecto al tiempo cuando

ocurren SNR, y en azul su respectivo surrogado, en **D** cuando se aplica la normalización por corrección por línea de base.

A partir de la **Figura 10**, se puede observar el comportamiento de RSS y SNR tanto para la normalización mediante Z-Score como para la normalización por Corrección por línea de base. Para los cuatro casos, el surrogado se observa que se mantiene homogéneo durante todo el intervalo de tiempo, indicando que efectivamente estos pueden ser usados como curvas comparativas para la condición de RSS y SNR para ambas normalizaciones.

Para el caso de RSS en la normalización por Z-Score (**Figura 10A**), se observa que existe un comportamiento diferido tanto antes como después de la ocurrencia de un reporte. Antes del reporte, en el intervalo de [-800, -600] ms de la curva asociada a RSS, al compararla con la condición control se observa un comportamiento de contracción pupilar, que luego a lo largo de la ventana temporal, comienza a tornarse en una dilatación pupilar, donde el peak se observa entre el intervalo de [450, 900] ms.

Para el caso de RSS en la normalización por corrección por línea de base (**Figura 10C**), al igual que en la normalización por Z-score, al comparar la curva asociada a RSS con la curva control se observa un comportamiento de contracción pupilar previo al reporte en el intervalo [-900, -800] ms, y posterior al reporte se observa una dilatación pupilar en el intervalo de [480, 780] ms. Estos resultados sugieren que la contracción pupilar previa al RSS podría manifestar que hubo un cambio atencional y que posterior al RSS se manifiesta una dilatación producto de un nuevo foco atencional.

Para el caso de SNR en la normalización por Z-Score (**Figura 10B**), al comparar la curva asociada a SNR con su curva control, se observa que antes del inicio de una sacada se ve una leve dilatación pupilar en el intervalo [-1000, -750] ms, mientras que posterior al inicio de la sacada, en la curva afectada por SNR se observa un comportamiento de contracción pupilar posterior al inicio de la sacada en el intervalo [550,1000] ms.

Para el caso de SNR en la normalización por corrección por línea de base, al comparar con su surrogado, previo al inicio de sacada se observa un comportamiento similar entre la curva SNR y su surrogado, mientras que posterior al inicio de la sacada, en el intervalo [550,1000] ms se observa un comportamiento ocular de contracción pupilar en comparación con su surrogado. Este resultado sugiere que la dilatación pupilar previo a la SNR podría sugerir una preparación de un movimiento sacádico, es decir, un cambio atencional, y que posterior a una SNR, existe una dilatación pupilar producto del nuevo cambio atencional.

4.3 Correlación entre dinámica pupilar y ocurrencia de RSS y SNR

Con el fin de poder asociar la dinámica pupilar con la ocurrencia de percepción de un movimiento ocular ilusorio, se crearon programas usando librerías de python. Estos códigos permiten las siguientes acciones: a) Aplicación de t-test por segundo, b) Aplicación de ANOVA. Los códigos utilizados se pueden encontrar en el siguiente link de repositorio Github: <https://github.com/AlbertoCuevasP/C-digo-tesis.git>.

4.3.1: Análisis estadístico mediante ANOVA.

A partir de los gráficos de promedio de sujetos para RSS, SNR y sus respectivos surrogados, tanto para la normalización por Z-Score como de normalización por

línea de base, se aplicó un análisis de ANOVA para ver diferencias entre RSS, SNR y sus surrogados. Al aplicar un ANOVA al promedio de sujetos con la normalización mediante Z-Score, se obtienen diferencias significativas para RSS (F-value = $4,61 \times 10^{-21}$) y para SNR (F-value = $2,56 \times 10^{-20}$). En relación al ANOVA para la normalización mediante Corrección por línea base, se obtuvo diferencias significativas para la condición de RSS (F-value = $3,11 \times 10^{-8}$) y para la condición de SNR (F-value = $1,65 \times 10^{-77}$). Los resultados indican que, tanto para la condición de RSS y SNR para ambas normalizaciones, existen diferencias significativas con sus respectivos surrogados, por lo tanto, efectivamente existe una correlación entre realizar un reporte y realizar una sacada con un cambio en el tamaño pupilar.

4.3.2: Análisis estadístico mediante t-test punto a punto.

Posterior al ANOVA, se procedió a realizar un análisis estadístico mediante t-test punto a punto de la línea temporal establecida, con el fin de examinar en qué momento ocurren las diferencias significativas, y si estas se pueden asociar a un cambio de diámetro pupilar en un rango de tiempo determinado y un comportamiento en particular.

Cabe mencionar que, para corroborar el test de hipótesis mediante un t-test, se requiere que el promedio de los datos tengan una distribución normal, lo cual se puede evaluar usando un test como Shapiro-Wilks, sin embargo, los tests de normalidad están diseñados para soportar una cierta cantidad de tamaños muestrales, por lo que al aplicar estos tests en muestras muy pequeñas no puede asegurarse un poder de distribución normal con el mismo nivel de significancia que cuando se trabaja con muestras más grandes, mientras que cuando el número de datos es excesivamente alto, por teorema de límite central, cuando existe un

número grande de muestra ($N \geq 30$) se puede asumir normalidad (Hanusz & Tarasińska, 2015). Dado que la finalidad de este trabajo es aplicar un t-test para evaluar la hipótesis planteada, donde se aplicará el t-test en cada segundo de la ventana temporal analizada para la condición de RSS y SNR con sus respectivos surrogados, alineadas según la ocurrencia de Reportes y Sacadas, se procederá a asumir normalidad de los datos. Además, a pesar de que el número de datos para la condición de RSS y su respectivo surrogado es relativamente pequeño ($N = 4$), según evidencias se puede aplicar un t-test con un N relativamente pequeño (De Winter, 2013).

Al aplicar el t-test punto a punto, para la normalización de Z-score en la condición de RSS, al comparar la curva de RSS con su respectivo surrogado se encontraron diferencias significativas en el intervalo de [-1000, -864] ms previo al reporte ($p < 0.05$), mientras que en el intervalo de [-860, 350] posterior al reporte no hubo diferencias significativas (n.s). Adicionalmente, se observaron diferencias significativas en el intervalo de [352, 1000] ms ($p < 0.05$), tal como se ve en la **Figura 10A**.

Para la normalización mediante corrección por línea de base, al comparar la curva de RSS con su respectivo surrogado se encontraron también diferencias significativas al igual que en la normalización de Z-score, mostrando diferencias significativas en el intervalo en el intervalo de [-900, -800] ms previo al reporte ($p < 0.05$), mientras que en el intervalo de [-860, 350] posterior al reporte no hubo diferencias significativas (n.s). Adicionalmente, se observaron diferencias significativas en el intervalo de [480, 780] ms ($p < 0.05$), tal como se ve en la **Figura 10C**.

Los resultados de t-test punto por punto para la condición de RSS, tanto antes como después de un reporte para la normalización por Z-Score y por corrección por línea de base, sugieren que efectivamente existe una correlación entre la dinámica de contracción pupilar previo al reporte, y la dilatación pupilar posterior al reporte, con la ocurrencia de RSS.

Analizando el caso para la normalización mediante Z-score en la condición de SNR no se encontraron diferencias significativas anterior al inicio de la sacada, la cual comprendía desde [-1000, 574] ms (n.s), sin embargo, sí se presentaron diferencias significativas posterior al inicio de una sacada en el intervalo [574,1000] ms ($p < 0.05$), tal como se observa en la **Figura 10B**.

Para el caso de la normalización mediante corrección por línea de base, al comparar la curva de SNR con su respectivo surrogado se encontró que tampoco no hubo diferencias significativas antes del inicio de una sacada en el intervalo que comprende [-1000, 550] ms (n.s), sin embargo, sí hubo también diferencias significativas posterior al inicio de la sacada en el intervalo [550-1000] ms ($p < 0.05$), tal como se ve en la **Figura 10D**.

En función de los resultados de t-test punto por punto para la condición de SNR, tanto para la normalización mediante Z-Score y Corrección por línea de base, se puede desprender que existe una correlación entre la dinámica de contracción pupilar posterior a la sacada con el hecho de haber realizado una SNR.

5. Discusión

5.1 Verificación de conducta ocular.

Si bien en la literatura se ha descrito parte del fenómeno de ejecución de movimientos oculares sin estar al tanto de ellos, no hay mucha información que describa el fenómeno de reportar movimientos oculares que en realidad nunca fueron ejecutados. En este trabajo se encontró la presencia de reportes de movimientos oculares ilusorios (**Tabla 2**), lo cual es coherente con lo descrito en el experimento previo en el laboratorio y con estudios que describen la presencia de reportes errados de movimientos oculares (Marti et al., 2015).

Con respecto al cómputo de datos, el hecho de que inicialmente se presentaron 77 ensayos con RSS quiere decir que no es un fenómeno aislado, sino que representa un evento en al menos el 7% de los ensayos totales de todos los sujetos.

Para el caso de las sacadas, el hecho de que se presentaran solo 103 sacadas es debido al criterio de que tuvieran una distancia recorrida mayor a 2° visuales, correspondiente al tamaño necesario para salir de la cruz de fijación. De estas, 102 fueron SNR, lo cual es un número considerable para realizar un análisis. Sin embargo, queda pendiente examinar qué sucede con aquellos movimientos oculares menores a 2° visuales, es decir, las microsacadas y su vínculo el estar al tanto de sus movimientos oculares.

5.2 Comparación de conductas oculares

Dado que existe poca literatura respecto al fenómeno de realizar reportes de movimientos oculares ilusorios, se hizo una comparación respecto a cómo es el cambio de tamaño pupilar cuando el sujeto realiza un RSS y una SNR, considerando el comportamiento ocular tanto antes como después que ocurra un RSS y una SNR.

5.2.1 Comportamiento previo a RSS.

Si bien la hipótesis planteada sugería que habría una dilatación pupilar previo a un movimiento ocular, tal como sugieren estudios sobre el vínculo entre la respuesta pupilar frente a la luz y la preparación de un movimiento sacádico (Mathöt et al.,2015), al analizar los resultados previo al reporte se observa una contracción pupilar en un intervalo de [-800, -600] ms en la normalización por Z-score (**Figura 10A**) y [-900, -800] ms para la normalización por corrección por línea base (**Figura 10C**). Una posible explicación de porqué se dió una contracción pupilar en vez de una dilatación pupilar previo al reporte es debido a la diferencia de luminancia entre el estímulo del rostro y el fondo blanco, dado que los sujetos se encontraban realizando una tarea de atención encubierta sobre un fondo blanco de alta luminancia y un estímulo, ubicado a 34° visuales respecto a la cruz de fijación con un grado de luminancia más bajo, los sujetos podrían haber estado atendiendo a algún punto de la pantalla fuera de la cruz de fijación y de la imagen del rostro, es decir, en el fondo blanco, donde al tener una luminancia más elevada se gatilla una contracción pupilar. Además, los tiempos de duración de contracción pupilar luego de un estímulo son de aproximadamente ~500 ms, lo cual coincide con los tiempos de duración de dinámica pupilar que gatilla una contracción pupilar (Tekin et al.,2012), lo cual sugiere que efectivamente los sujetos observaron un punto con mayor grado de luminancia. Además, es un periodo de tiempo suficiente para que en un intervalo de tiempo de entre [-1000, -300] ms previo al reporte, el sujeto haya sido capaz de estar al tanto de un movimiento ocular ilusorio, y reportarlo, tal como sugieren los tiempos de percepción visual (Abbasi-Kesbi et al., 2017). Esto es congruente con los estudios que muestran una relación entre el RPL y la luminancia del objeto atendido durante una tarea de atención encubierta (Binda et al.,2013;

Mathöt et al.,2013). Siguiendo por esta línea, el hecho de que se manifieste una dinámica pupilar diferente a la condición control, como una contracción pupilar previo al reporte, y que aumente progresivamente en el tiempo, podría estar dando señales de que previo al reporte hay indicadores de que hubo un cambio atencional. Sin embargo, se requiere de otro tipo de procedimientos para corroborar que efectivamente este fenómeno se debe a un cambio atencional, como por ejemplo hacer el experimento con luminancias inversas de los ensayos mostrados, lo cual dada la contingencia se encuentra imposibilitado de realizar.

Además, el resultado de que haya un cambio atencional previo a un RSS es coherente con la teoría premotora de la atención, ya que esta sugiere que antes de realizar una sacada existe un cambio atencional (Smith & Schenk, 2012)

5.2.2 Comportamiento posterior a RSS.

La dinámica pupilar posterior al reporte también es coherente con los resultados previos. Al observar la dinámica pupilar posterior al reporte del sujeto, se puede observar una dinámica pupilar de dilatación pupilar en un intervalo de [450, 900] ms en la normalización por Z-score (**Figura 10A**) y [480, 780] ms para la normalización por corrección por línea base (**Figura 10C**). Una posible explicación para esta dinámica pupilar se basa en la explicación de cambio atencional previo al reporte, como también en las evidencias de la relación entre el RPL y la luminancia del objeto atendido durante una tarea de atención encubierta (Binda et al.2013, Mathöt et al, 2013). Dada que la tarea pedía estrictamente que mantuvieran su mirada fija en una cruz de fijación, y atendieran al estímulo presentado usando solo su visión periférica, en el momento que percibieron un movimiento ocular ilusorio, lo reportaron y volvieron a la tarea señalada, donde el estímulo posee una baja

luminancia respecto al fondo blanco, por lo que la dinámica pupilar ahora sería de una dilatación pupilar.

5.2.3 Comportamiento previo a SNR

Previo a la SNR se observa un comportamiento de dilatación pupilar en la normalización por Z-score en una ventana temporal del [-1000,-750] ms (**Figura 10B**), lo cual es congruente con lo descrito en la literatura sobre la preparación de un movimiento sacádico (Jaina et al., 2011; Mathöt et al.,2015), sin embargo, para la normalización por Corrección por línea de base esto no se observa. Esto podría deberse al método de corrección por línea de base en sí, donde el hecho de que se alinea en el eje Y en 0 hace que existan problemas en distinguir lo que ocurre en el inicio de la curva entre el surrogado y la SNR.

5.2.4 Comportamiento posterior a SNR.

Para la condición de SNR, los resultados obtenidos mostraron una dinámica pupilar de contracción pupilar posterior al inicio de una sacada, tanto para la normalización mediante Z-score (**Figura 10B**) como para la normalización mediante Corrección por línea de base. (**Figura 10D**) en un intervalo de tiempo de [550-1000] ms posterior al inicio de una sacada.

Una posible explicación es que la contracción pupilar se deba también a un cambio atencional. Dado que realizar una sacada implica que a posteriori la fovea se encontrará en un nuevo punto, posiblemente la caída de diámetro pupilar se deba a que se está atendiendo un nuevo punto de la pantalla, en particular a un punto con un grado de luminancia elevado en comparación con la cruz de fijación atendida inicialmente. Una extensión de la ventana de análisis podría indicar esto, sin

embargo, la distribución de movimientos sacádicos mayores a 2° visuales ocurrió de manera muy homogénea durante los ensayos, por lo que al extender la ventana temporal, tal como se ve observa en el la **Figura 11**. se obtiene que, al extender la señal en 1000 ms adicionales, esta señal se ve afectada por estímulos posteriores a la ventana de análisis, lo cual por la naturaleza del bloque, corresponde a un movimiento sacádico producto de la aparición de una cruz de fijación en el centro de la pantalla.

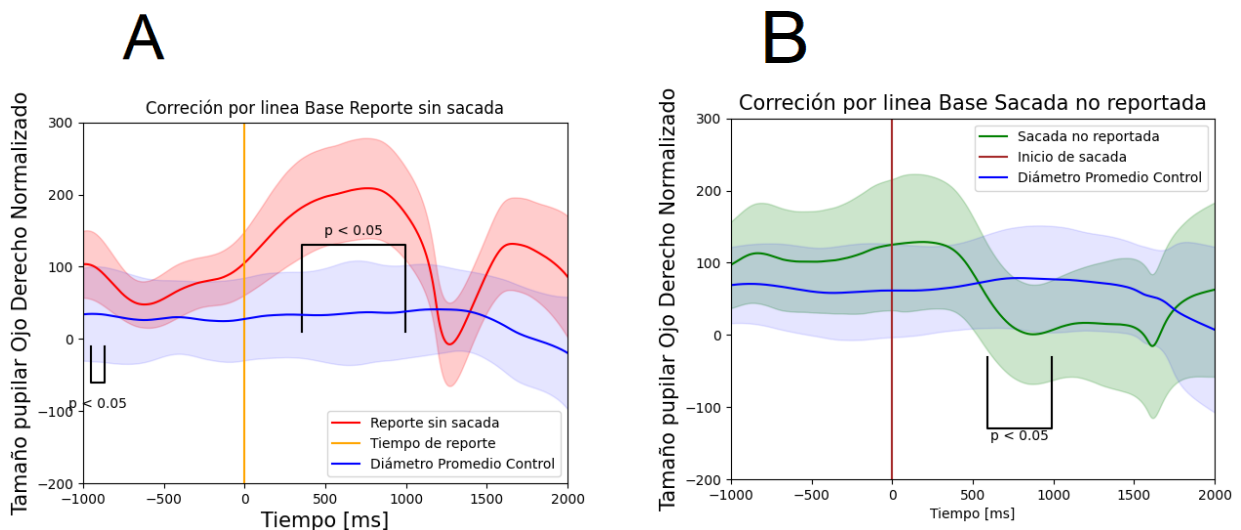


Figura 11. Extensión ventana temporal. Gráficos de promedio de sujetos en ventana de observación de 1000ms previo al evento y 2000ms posterior al evento. En **A**, la curva roja representa el promedio de sujeto del diámetro pupilar normalizado por corrección de línea base con respecto al tiempo cuando ocurren RSS , mientras que la curva azul corresponde a su respectivo surrogado, en **B**, la curva verde representa el promedio de sujetos de diámetro pupilar normalizado por corrección por línea de base cuando se ejecutan SNR, mientras que la curva azul corresponde a su respectivo surrogado.

Se requeriría entonces una ventana de tiempo mucho más extensa para obtener una cantidad de sacadas que no se vean afectadas por otros procesos dentro de la tarea.

Otra posible explicación de esta contracción pupilar posterior al inicio de una sacada es que, al realizar un movimiento sacádico, el eye tracker lo detecta como una contracción pupilar, lo cual en realidad es una deformación de la señal de eye tracker, también conocidas como oscilaciones post-sacádicas (Hooge, Nyström, Cornelissen & Holmqvist, 2015).

5.3 Correlación entre dinámica pupilar y ocurrencia de RSS y SNR

A través de los test estadísticos, se pudo correlacionar la dinámica pupilar con la ocurrencia de RSS y SNR. Tras los resultados de diferencias significativas al haber aplicado el test de ANOVA refleja que efectivamente los cambios de tamaño pupilar se deben al hecho de haber realizado un RSS y una SNR, respectivamente.

Para el caso de la significancia dada por el t-test en la condición de RSS, el hecho de que existiera significancia en el intervalo [-800, -600] ms en la normalización por Z-score (**Figura 10A**) y [-900, -800] ms para la normalización por corrección por línea base (**Figura 10C**), sugiere que efectivamente el fenómeno de contracción pupilar podría estar dando luces de que en ese intervalo de tiempo se dió el fenómeno de cambio atencional. No se pudo realizar un análisis de tamaño efecto sobre el promedio de sujetos debido a un número bajo de sujetos, por lo que se requeriría de un número mayor de sujetos para corroborar si es que efectivamente este fenómeno se debe a un cambio atencional.

Se esperaba que previo a la SNR existiera una diferencia significativa en el intervalo [-1000, -750], tanto en la normalización por Z-score como en la normalización por corrección por línea de base, tal como sugieren los estudios de la preparación de un movimiento sacádico (Jainta, 2011; Wang, Brien & Munoz, 2015), sin embargo, el t-test no arrojó diferencias significativas. Una posible explicación se debe a que posiblemente el número de datos para ver este fenómeno previo a una sacada no fue suficiente para este estudio, por lo que se requeriría un número más alto de SNR.

Otra explicación es que, para este estudio, se analizaron todas las sacadas que fueran mayor a 2° visuales, sin embargo, la distribución de grados visuales de las sacadas fue bastante homogénea. Muchas de las sacadas ejecutadas mostraron distintos valores, las cuales se pueden clasificar por aquellas que seguían cercanas a la cruz de fijación, otras que se encontraban cercanas al centro de la pantalla (~17° Visuales respecto a cruz de fijación), y otras que se dirigieron a la imagen del rostro (sacadas de ~34° visuales respecto a cruz de fijación), por lo que si se hiciera el análisis según el n° de grados visuales recorridos, posiblemente la dinámica pupilar se podría acercar a lo mostrado en la literatura (Jainta et al., 2011). Sin embargo, el número de sacadas fue desproporcionada, en particular para aquellas que aterrizaron en el rostro, donde solo se encontraron 3 sacadas para esta condición, por lo que al no contar con un número elevado de sacadas con este valor se descartó este análisis para este estudio.

El hecho de que tanto la curva de RSS y la curva de SNR presentan comportamientos distintos, como también que el t-test arrojó significancia al cambio de tamaño pupilar en distintas ventanas temporales, sugiere que reportar no es lo mismo que realizar una sacada. Esto sugiere que efectivamente, el fenómeno de

realizar una sacada y no reportarlo, y de reportar un movimiento ocular que en realidad nunca ocurrió, es un fenómeno bidireccional.

Lamentablemente, para este estudio solo se pudo hacer una comparativa entre la curva de RSS y SNR con sus respectivos surrogados, esto debido a que inicialmente la comparación se iba a realizar respecto a aquellas sacadas que si fueron reportadas, la cual podría dar luces sobre qué tan distinta es la dinámica pupilar cuando se reporta un movimiento ocular ilusorio en comparación con una sacada que si fue ejecutada, sin embargo, la cantidad de sacadas que fueron reportadas fue de un total de 6 de 126 sacadas totales, donde después del filtrado de datos solo terminó quedando 1 sacada reportada, tal como se observa en la **Tabla 1**. Más aún, no se encontró a ningún sujeto que presentara 3 o más sacadas reportadas, lo cual hizo que se descartara finalmente el análisis de sacadas reportadas. Esta ausencia de sacadas reportadas es coherente con los estudios que sugieren que los sujetos tiene una baja capacidad de poder reportar sus propios movimientos oculares (Theeuwes et al.,1998 ; Hunt et al., 2004 ; Clarke et al., 2015). Se requeriría entonces otro tipo de estudios para corroborar qué sucede cuando el sujeto reporta sacadas que fueron ejecutadas.

5.4. Conclusiones

- 1) Se logró cumplir los objetivos propuestos para la corroboración de la hipótesis propuesta para este trabajo a partir de los datos de un experimento realizado previamente en el laboratorio.
- 2) Se logró crear una estrategia de análisis para la extracción y posterior análisis de datos, con el fin de examinar las conductas oculomotoras de una tarea de atención encubierta a partir de datos de experimentos previamente realizados en el

laboratorio. Se pudo comprobar la presencia de RSS, tal como se reportó en los análisis previos del estudio previo en el laboratorio, como además la presencia de SNR.

3) Se logró avanzar en la comparación de dinámica pupilar para la condición de RSS y SNR con sus respectivos surrogados, donde se logró crear un promedio de sujetos para cada una de las condiciones evaluadas, y donde se pudo comparar la dinámica para dos normalizaciones distintas, a) mediante Z-score y b) mediante corrección por línea de base. .

4) Se logró avanzar en la asociación de la dinámica pupilar con la ocurrencia de RSS, donde se aplicó un análisis estadístico de t-test por segundo y de un ANOVA.

5) Los resultados obtenidos podrían tener una implicancia importante en torno a la hipótesis planteada en este trabajo, teniendo una evidencia atencional relacionada con el cambio de tamaño pupilar que revelaría que los sujetos perciben el cambio atencional como un movimiento ocular, lo cual podría explicar el porqué los sujetos reportan haber realizado movimientos oculares a pesar de que nunca movieron los ojos fuera de la cruz de fijación.

6. Referencias:

- Abbasi-Kesbi, R., Memarzadeh-Tehran, H., & Deen, M. J. (2017). Technique to estimate human reaction time based on visual perception. *Healthcare technology letters*, 4(2), 73-77.
- Alnæs, D., Sneve, M. H., Espeseth, T., Endestad, T., van de Pavert, S. H. P., & Laeng, B. (2014). Pupil size signals mental effort deployed during multiple object tracking and predicts brain activity in the dorsal attention network and the locus coeruleus. *Journal of vision*, 14(4), 1-1.
- Aminihajibashi, S., Hagen, T., Foldal, M. D., Laeng, B., & Espeseth, T. (2019). Individual differences in resting-state pupil size: Evidence for association between working memory capacity and pupil size variability. *International Journal of Psychophysiology*, 140, 1-7.
- Bajcsy, R., & Campos, M. (1992). Active and exploratory perception. *CVGIP: Image Understanding*, 56(1), 31-40.
- Bergamin, O., & Kardon, R. H. (2003). Latency of the pupil light reflex: sample rate, stimulus intensity, and variation in normal subjects. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 44(4), 1546-1554.
- Bielas, J., & Michalczyk, Ł. (2019). Is the premotor theory of attention essentially about pre-reflective intentionality?. *Theory & Psychology*, 29(6), 757-774.
- Binda, P., Pereverzeva, M., & Murray, S. O. (2013). Attention to bright surfaces enhances the pupillary light reflex. *Journal of Neuroscience*, 33(5), 2199-2204.
- Binda, P., Pereverzeva, M., & Murray, S. O. (2014). Pupil size reflects the focus of feature-based attention. *Journal of neurophysiology*, 112(12), 3046-3052.
- Bisley, J. W. (2011). The neural basis of visual attention. *The Journal of physiology*, 589(1), 49-57.
- Boynton, G. M. (2005). Attention and visual perception. *Current opinion in neurobiology*, 15(4), 465-469.
- Brocher, A., Harbecke, R., Graf, T., Memmert, D., & Hüttermann, S. (2018). Using task effort and pupil size to track covert shifts of visual attention independently of a pupillary light reflex. *Behavior research methods*, 50(6), 2551-2567.
- Carrasco, M., & Hanning, N. M. (2020). Visual perception: attending beyond the eyes' reach. *Current Biology*, 30(21), R1322-R1324.
- Carrasco, M., & McElree, B. (2001). Covert attention accelerates the rate of visual information processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(9), 5363-5367.
- Craighero, L., & Rizzolatti, G. (2005). The premotor theory of attention. In *Neurobiology of attention* (pp. 181-186). Academic Press.
- Deubel, H., & Schneider, W. X. (1996). Saccade target selection and object recognition: Evidence for a common attentional mechanism. *Vision research*, 36(12), 1827-1838.
- De Winter, J. C. (2013). Using the Student's t-test with extremely small sample sizes. *Practical Assessment, Research, and Evaluation*, 18(1), 10.
- Findlay, J. M. (2005). Covert attention and saccadic eye movements. In *Neurobiology of attention* (pp. 114-116). Academic Press.
- Godijn, R., & Theeuwes, J. (2003). Parallel allocation of attention prior to the execution of saccade sequences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(5), 882-896.
- Hanusz, Z., & Tarasińska, J. (2015). Normalization of the Kolmogorov–Smirnov and Shapiro–Wilk tests of normality. *Biometrical Letters*, 52(2), 85-93.

- Hoffman, J. E. (1998). Visual attention and eye movements. *Attention*, 31, 119-153.
- Hunt, A. R., & Cavanagh, P. (2009). Looking ahead: The perceived direction of gaze shifts before the eyes move. *Journal of Vision*, 9(9), 1-1.
- Hunt, A. R., vonMühlénen, A., & Kingstone, A. (2007). The time course of attentional and oculomotor capture reveals a common cause. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(2), 271-284.
- Hupé, J. M., Lamirel, C., & Lorenceau, J. (2009). Pupil dynamics during bistable motion perception. *Journal of vision*, 9(7), 10-10.
- Itti, L. (2007) Visual salience. *Scholarpedia*, 2(9):3327.
- Jainta, S., Vernet, M., Yang, Q., & Kapoula, Z. (2011). The pupil reflects motor preparation for saccades-even before the eye starts to move. *Frontiers in human neuroscience*, 5, 97.
- Kowler, E., Anderson, E., Doshier, B., & Blaser, E. (1995). The role of attention in the programming of saccades. *Vision research*, 35(13), 1897-1916.
- Kumnick, L. S. (1956). Aging and the latency and duration of pupil constriction in response to light and sound stimuli. *Journal of gerontology*, 11(4), 391-396.
- Kim, T. K., & Park, J. H. (2019). More about the basic assumptions of t-test: normality and sample size. *Korean journal of anesthesiology*, 72(4), 331.
- Li, H. H., Hanning, N. M., & Carrasco, M. (2021). To look or not to look: dissociating presaccadic and covert spatial attention. *Trends in Neurosciences*.
- Liversedge, S., Gilchrist, I., & Everling, S. (Eds.). (2011). *The Oxford handbook of eye movements*. Oxford University Press.
- Lundqvist, D., Flykt, A., & Öhman, A. (1998). The Karolinska directed emotional faces (KDEF). *CD ROM from Department of Clinical Neuroscience, Psychology section, Karolinska Institutet*, 91(630), 2-2.
- Mahon, A., Clarke, A. D., & Hunt, A. R. (2018). The role of attention in eye-movement awareness. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 80(7), 1691-1704.
- Marti, S., Bayet, L., & Dehaene, S. (2015). Subjective report of eye fixations during serial search. *Consciousness and Cognition*, 33, 1-15.
- Mathôt, S., Van der Linden, L., Grainger, J., & Vitu, F. (2013). The pupillary light response reveals the focus of covert visual attention. *PloS one*, 8(10), e78168.
- Mathôt, S., van der Linden, L., Grainger, J., & Vitu, F. (2015). The pupillary light response reflects eye-movement preparation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 41(1), 28.
- Otero, S. C., Weekes, B. S., & Hutton, S. B. (2011). Pupil size changes during recognition memory. *Psychophysiology*, 48(10), 1346-1353.
- Rios-Lago, M., Muñoz-Céspedes, J. M., & Paúl-Lapedriza, N. (2007). Alteraciones de la atención tras daño cerebral traumático: evaluación y rehabilitación. *Rev Neurol*, 44(5), 291-7.
- Salvi, C., Simoncini, C., Grafman, J., & Beeman, M. (2020). Oculometric signature of switch into awareness? Pupil size predicts sudden insight whereas microsaccades problem-solving via analysis. *NeuroImage*, 116933.

- Smith, D. T., & Schenk, T. (2012). The premotor theory of attention: time to move on?. *Neuropsychologia*, 50(6), 1104-1114.
- Spering, M., & Carrasco, M. (2015). Acting without seeing: eye movements reveal visual processing without awareness. *Trends in neurosciences*, 38(4), 247-258.
- SR Research. (2005). EyeLink User Manual.
- Stelmach, L. B., Campsall, J. M., & Herdman, C. M. (1997). Attentional and ocular movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(3), 823.
- Tekin, K., Sekeroglu, M. A., Kiziltoprak, H., Doguizi, S., Inanc, M., & Yilmazbas, P. (2018). Static and dynamic pupillometry data of healthy individuals. *Clinical and Experimental Optometry*, 101(5), 659-665.
- Theeuwes, J., Kramer, A. F., Hahn, S., & Irwin, D. E. (1998). Our eyes do not always go where we want them to go: Capture of the eyes by new objects. *Psychological Science*, 9(5), 379–385.
- van der Wel, P., & van Steenbergen, H. (2018). Pupil dilation as an index of effort in cognitive control tasks: A review. *Psychonomic bulletin & review*, 25(6), 2005-2015.
- van Zoest, W., & Donk, M. (2010). Awareness of the saccade goal in oculomotor selection: Your eyes go before you know. *Consciousness and Cognition*, 19(4), 861-871.
- Wang, C. A., Brien, D. C., & Munoz, D. P. (2015). Pupil size reveals preparatory processes in the generation of pro- saccades and anti- saccades. *European Journal of Neuroscience*, 41(8), 1102-1110.
- Wilhelm, B., Giedke, H., Lüdtke, H., Bittner, E., Hofmann, A., & Wilhelm, H. (2001). Daytime variations in central nervous system activation measured by a pupillographic sleepiness test. *Journal of sleep research*, 10(1), 1-7.
- Woodman, G. F., & Luck, S. J. (2003). Dissociations among attention, perception, and awareness during object-substitution masking. *Psychological Science*, 14(6), 605-611.
- Wu, S. C., & Remington, R. W. (2003). Characteristics of covert and overt visual orienting: Evidence from attentional and oculomotor capture. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(5), 1050–1066.

