

# Análisis de la Disposición Espacial de Contenido en entornos de Realidad Aumentada y su Efecto en la Carga Cognitiva de los Usuarios

Analysis of the Spatial Layout of Content in Augmented Reality Environments and its Effect on Users' Cognitive Load

  **Dr. Luis Eduardo Bautista**

Profesor Titular de Universidad. Universidad Industrial de Santander. Colombia

  **Dra. Fernanda Maradei**

Profesora Titular de Universidad. Universidad Industrial de Santander. Colombia

  **Dr. Gabriel Pedraza**

Profesor de Planta. Universidad Industrial de Santander. Colombia

Recibido: 2024/07/03; Revisado: 2024/08/30; Aceptado: 2024/10/09; Online First: 2024/11/03; Publicado: 2025/07/01

## RESUMEN

La disposición espacial de los espacios de información en entornos de realidad aumentada (RA) juega un papel crucial en la modulación del esfuerzo mental de los usuarios. Este estudio tiene como objetivo investigar cómo la contigüidad y discontigüidad entre los objetos físicos y los espacios de información, tanto en el plano horizontal como en el vertical, afectan la carga cognitiva durante la interacción con contenido procedimental. Se realizaron cuatro experimentos diferenciados, midiendo la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones como indicadores del esfuerzo mental. Estas medidas ofrecen una visión integral sobre la influencia de la disposición espacial. Los hallazgos se discuten dentro del marco de la literatura existente, contrastando los resultados obtenidos con estudios previos y proporcionando una base para futuras investigaciones en el diseño de materiales educativos y entornos de aprendizaje. Los resultados obtenidos a lo largo de los cuatro experimentos muestran que la disposición espacial de la información en entornos de RA afecta significativamente el esfuerzo mental de los participantes, medido a través de la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones. Estas medidas son consistentes con literatura previa que indica que el aumento de la dilatación pupilar es un indicador de mayor esfuerzo mental.

## ABSTRACT

The spatial layout of information spaces in augmented reality (AR) environments plays a crucial role in modulating users' mental effort. This study aims to investigate how contiguity and discontiguity between physical objects and information spaces, both horizontally and vertically, affects cognitive load during interaction with procedural content. Four separate experiments were conducted, measuring pupil dilation and fixation duration as indicators of mental effort. These measures provide a comprehensive view on the influence of spatial layout. The findings are discussed within the framework of the existing literature, contrasting the results with previous studies and providing a basis for future research in the design of educational materials and learning environments. The results obtained across the four experiments show that the spatial arrangement of information in AR environments significantly affects participants' mental effort, as measured by pupil dilation and fixation duration. These measures are consistent with previous literature indicating that increased pupil dilation is an indicator of increased mental effort.

## PALABRAS CLAVES · KEYWORDS

Realidad Aumentada; carga cognitiva; esfuerzo mental; tecnologías emergentes; procesamiento cognitivo; diseño instruccional

Augmented Reality; Cognitive Load; Mental Effort; Emerging Technologies; Cognitive Processing; Instructional Design

## 1. Introducción

### 1.1 Realidad Aumentada en el aprendizaje

La realidad aumentada (RA) es una tecnología que se ha utilizado ampliamente en el aprendizaje, especialmente en el aprendizaje de habilidades complejas. Diversos estudios han demostrado su eficacia en mejorar las habilidades espaciales de los estudiantes de ingeniería (Guntur et al., 2020), el mantenimiento de vehículos y equipos militares (Malta et al., 2023; Chow, 2021), así como en la industria manufacturera (Doolani et al., 2020; Wang et al., 2022). Además, la RA ha demostrado ser una herramienta prometedora para el entrenamiento de tareas de mantenimiento y ensamblaje industrial, mostrando mejoras significativas en el rendimiento de los operarios que la utilizaron (Drouot et al., 2022; Danielsson et al., 2020). En el ámbito médico, la RA ha facilitado el entrenamiento en procedimientos quirúrgicos, ofreciendo ventajas para el desarrollo de habilidades básicas y avanzadas (Tene et al., 2024; Singh et al., 2024), y permitiendo una orientación precisa durante las etapas iniciales de entrenamiento (Evans et al., 2023).

Además de las ventajas mencionadas, la RA ofrece retroalimentación háptica realista, evaluación objetiva del desempeño y la posibilidad de documentar procedimientos para revisión posterior. Sin embargo, se ha observado una dependencia de la información proporcionada durante el entrenamiento, lo que puede afectar negativamente el desempeño una vez retirado el soporte (Hernán et al., 2021; Trávez, 2023). Por ello, se recomienda un diseño cuidadoso de las experiencias de RA para integrar la visualización de manera efectiva en el entorno, minimizando la interferencia con la tarea y maximizando la utilidad de la información visual relacionada con objetos o espacios específicos (Huang et al., 2015).

Una de sus principales ventajas radica en su capacidad para combinar objetos reales y virtuales en un entorno de aprendizaje, proporcionando información en tiempo real al alumno durante la ejecución de las tareas (Garzón & Acevedo, 2019). La información proporcionada mediante la interfaz gráfica de usuario (IGU), ofrece una guía práctica para el estudiante (Acosta et al., 2019; Czok et al., 2023; Anderson & Campbell, 2015; LeBel et al., 2017). La organización espacial de esta información es importante, ya que la presentación inadecuada, puede sobrecargar los procesos cognitivos del alumno durante la práctica (Evans et al., 2017; Yang et al., 2023), generados principalmente por sobrecarga en la memoria de trabajo. La memoria de trabajo se encarga de realizar el procesamiento cognitivo de la información recibida en tiempo real (Bertrand et al., 2017; Mayer, 2020; Rasmussen et al., 2016), y es fundamental para garantizar la utilidad de la información y el adecuado desempeño del estudiante.

### 1.2 Teoría de la carga Cognitiva en el aprendizaje

La Teoría de la Carga Cognitiva (TCC) es un marco de trabajo conceptual que busca describir la forma en la que los seres humanos filtran, procesan, almacenan y recuperan información necesaria durante los procesos de aprendizaje. En este capítulo se describirá la TCC propuesta por Sweller y que se fundamenta en la capacidad limitada de procesamiento de la memoria de trabajo. Baddeley (2003), define la Memoria de Trabajo (MT) como un sistema dedicado que mantiene y almacena información a corto plazo, en periodos entre 15 y 30 segundos, y es la base de los procesos de pensamiento humano relacionados con la actividad consciente que una persona desarrolla. Con base en la limitada

capacidad de procesamiento de la MT, Hanley (2016) plantea una Teoría de la Carga Cognitiva y posteriormente Mayer (2005) propone la Teoría Cognitiva del Aprendizaje Multimedia (TCAM) (Andrade-Lotero, 2012). Estas teorías plantean premisas relacionadas con el uso de recursos cognitivos limitados y la capacidad limitada de un aprendiz al enfrentarse con nueva información. Según la teoría de la carga cognitiva (TCC), aplicada al aprendizaje multimedia, el mismo material de aprendizaje puede inducir diferentes cantidades de carga en la memoria de trabajo (Sweller, 2020). Esto se debe, al uso de diferentes estrategias para la presentación, y a que las diferentes tareas cognitivas requeridas por estas estrategias pueden dar lugar a cantidades variables de carga cognitiva extrínseca. Según, Brünker, los recursos cognitivos libres están definidos por la diferencia entre la capacidad de la memoria de trabajo y la carga cognitiva total. Cuando esta diferencia es mínima, se origina una sobrecarga cognitiva, que afecta el desempeño del aprendiz durante el entrenamiento. Cheng et al. (2015) menciona que la carga cognitiva extrínseca proviene principalmente del diseño de materiales defectuosos o interfaces de baja calidad, esto hace, que los aprendices consuman recursos cognitivos adicionales en el procesamiento de la información no relacionada durante la actividad de aprendizaje. Esta carga cognitiva ineficaz se puede reducir mediante el diseño y organización adecuada del material.

### 1.3 Principios Multimedia para el aprendizaje

Con el propósito de diseñar y organizar adecuadamente el material, Van Merriënboer y Kester (2014), proponen un conjunto de catorce principios multimedia, dentro de los que se destacan para el contenido procedimental: el principio de Señalización, que indica que el aprendizaje puede mejorarse si la atención del alumno se centra en los aspectos críticos de la tarea de aprendizaje o la información presentada; y el Principio de Contigüidad Espacial, que presenta el mayor tamaño de efecto según Sweller et al. (2019).

#### 1.3.1 Contigüidad Espacial

El concepto de contigüidad espacial asociado al principio multimedia afirma que los estudiantes aprenden más eficazmente cuando las palabras y las imágenes correspondientes se presentan cerca unas de otras en la página o la pantalla, lo que minimiza la carga cognitiva requerida para integrar la información, según Schroeder et al. (2018) y facilitan una mejor retención y transferencia de conocimientos al permitir a los alumnos retener simultáneamente la información visual en la memoria de trabajo, tal como lo menciona Seraji et al. (2020) y Paek et al. (2017). Los estudios empíricos han demostrado de manera consistente los beneficios de la contigüidad espacial. Por ejemplo, los diseños integrados en los que el texto y los diagramas están alineados espacialmente han mostrado mejoras significativas en los resultados del aprendizaje en comparación con los diseños separados, como lo establece Hidayat et al. (2018) y Craig et al. (2015). Además, según Chikha et al. (2021), las investigaciones han indicado que incluso el aprendizaje incidental mejora cuando se mantiene la contigüidad espacial, lo que sugiere que este principio ayuda al procesamiento cognitivo automático. La eficacia del principio se extiende a varios formatos multimedia, incluidos los entornos de aprendizaje electrónico y las interacciones humanas virtuales, donde se ha demostrado que los gestos específicos de cada elemento cerca del contenido relevante mejoran la retención, como lo menciona Mayer (2008).

Además, los estudios que compararon diferentes presentaciones multimedia, como la contigüidad del texto en la imagen con el texto vinculado a las imágenes a través de hipervínculos, no encontraron diferencias significativas en las ganancias de aprendizaje, lo que indica que la contigüidad espacial se puede mantener mediante varios métodos, según Çeken y Taşkın (2022). De igual forma, según Noetel et al. (2022), el principio de contigüidad espacial puede ser usado para dirigir la atención visuoespacial y mejorar el procesamiento cognitivo facilitando a las personas concentrarse y procesar la información visual de ubicaciones específicas del entorno, lo que le ayuda a comprender e interactuar con el entorno de manera efectiva. Este tipo de atención es crucial para las tareas que requieren un enfoque visual preciso, esto se logra debido a que el cerebro procesa las señales visuales y auditivas combinadas de manera más eficaz cuando están alineadas espacialmente, lo que resulta en respuestas cerebrales más fuertes y un mejor rendimiento en las tareas visuales.

El propósito de estas pruebas experimentales es recopilar evidencia empírica sobre el principio de contigüidad espacial aplicado en un entorno de realidad aumentada. Teniendo en cuenta aspectos como la inclusión de material 3D (objeto-espacio de información), la contigüidad en profundidad y la posición relativa entre objeto 3D-contenido. Para lograr esto, se diseñaron y ejecutaron un conjunto de cuatro pruebas experimentales: Contigüidad Espacial de Campo visual, Contigüidad Espacial en profundidad, Contigüidad con posición relativa horizontal, y Contigüidad con posición relativa vertical. Estas pruebas fueron ejecutadas con un grupo de 34 participantes. Se diseñó un material de instrucción extendido para anatomía de rodilla visualizado en unas gafas de realidad aumentada Hololens2®. Se empleó el rastro ocular (eyetracking) para capturar datos de los participantes con las gafas SMI®. Los datos de Dilatación pupilar del participante y Duración de fijaciones entre el objeto 3D y el Espacio de Información, se procesaron en el software BeGaze®. Los principales resultados mostraron que, en relación al Esfuerzo mental, se encontró que la contigüidad espacial de campo y la posición relativa vertical, afectan el esfuerzo mental de los participantes. Sin embargo, no se puede confirmar que el esfuerzo mental se ve afectado por la contigüidad de profundidad y la posición relativa horizontal. Estos resultados, si bien aportan evidencia empírica acerca del conocimiento, muestran condiciones en las cuales el efecto de aplicación del principio aún no es concluyente. Estos datos aportan evidencia útil para el diseño de material de aprendizaje para nuevas plataformas de aprendizaje interactivo como la realidad aumentada y permiten la toma de decisiones informadas respecto a la organización de la información en el entorno, con fines de reducción de la carga cognitiva y esfuerzo mental. Esta información sin duda ayudará a los diseñadores de estos entornos a aplicar de forma informada el principio de contigüidad espacial.

## 2. Metodología

Con el propósito de conocer el conocer, no solo los efectos, sino también la forma de aprovechar este principio, se han desarrollado diversas investigaciones. En entornos bidimensionales, las investigaciones más recientes, se evaluó la proximidad entre imágenes y texto en entornos para el aprendizaje. Por ejemplo, de Koning et al. (2020) evaluó una distancia espacial mayor aumentaría la carga cognitiva y perjudicaría el aprendizaje de fundamentos de electricidad y circuitos electrónicos. El estudio mostro mejores resultados de aprendizaje, especialmente en la recordación, al aplicar menores distancias. Sin embargo, mencionan la necesidad de más investigaciones par establecer las condiciones

en las que este principio es aplicable. De igual forma, Beege et al. (2019) evaluó la influencia de distintas proximidades entre la información relacionada., dado que considera que puede promover o dificultar el aprendizaje. En dos experimentos, se manipuló la proximidad espacial entre una presentación pictórica y etiquetas de texto. Los resultados del primer experimento mostraron un efecto significativo de la proximidad espacial en el rendimiento de aprendizaje. En el experimento 2, los resultados mostraron mayor retención y transferencia en distancias intermedias. Estos hallazgos indican que la transferencia es óptima a una distancia intermedia entre la representación y el texto. En este estudio, se evaluaron distancias angulares inferiores a  $10^\circ$ , dado que son distancias usadas en contenido bidimensional para implementar la contigüidad. Adicionalmente, no se evalúan otras condiciones como la posición relativa, dado que la distancia se toma como un único componente espacial y bidimensional. También, Cammeraat et al. (2020) evaluó la separación espacial acompañada del principio de señalización en material clásico para el aprendizaje de un sistema de embrague, que utilizó una imagen y texto. En este experimento, solo se evaluaron dos niveles de separación (cercana y Lejana), sin especificar los valores de separación. De igual forma, la separación se aplica entre la imagen y el texto, la imagen tomada como un solo objeto, pero no entre la sección de la imagen mencionada y el texto. Esto podría influir en la aplicación del principio. Los resultados no mostraron efectos significativos de la separación espacial en el aprendizaje ni el esfuerzo mental. Como se observa en las investigaciones, si bien hay resultados favorables de la aplicación de la contigüidad espacial, estos no son concluyentes y requieren de más investigación.

De otro lado, en entornos 3D espaciales, que usaron realidad aumentada, Ens et al. (2014) estudiaron las propiedades de las pantallas para visualizar información en realidad aumentada. En un experimento, se evaluó el impacto en el desempeño de los usuarios variando la separación angular entre pantallas ( $15^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $55^\circ$ ), en tareas que requerían la interacción con el contenido. Se encontró que tanto el tiempo de tarea como la precisión en la selección se degradó proporcionalmente al aumento de la distancia angular, es decir, a mayor ángulo mayor tiempo y mayor error. Adicionalmente, en ángulos mayores a  $35^\circ$  el efecto es significativamente negativo. Finalmente, en un experimento posterior se utiliza una separación angular de  $27.5^\circ$  para el uso de cuatro Display en mosaico. Müller et al. (2016), evaluó la conexión por proximidad espacial cercana en un entorno de realidad aumentada, en tareas sencillas de vinculación de información gráfica. Los resultados mostraron para los dispositivos evaluados (HAR- Tablet, Video see-through y Optical see-through), el tiempo, la carga mental subjetiva y el error medio fueron menores. Adicionalmente, el autor propone otros mecanismos de integración que podrían ser efectivos para en relacionamiento de información. Lei et al. (2019) estudió el desempeño en la realización de dos tareas: a. Alta frecuencia de cambio y b. Baja frecuencia de cambio. Se usaron tres displays, el principal A, el secundario B y el de apoyo C. Se identificó que la distancia de separación entre displays es un factor que afecta el desempeño del usuario. A pesar de no especificar un valor de distancia, la separación fue mayor en un layout diagonal seguido de un layout horizontal y menor con un layout vertical, Los resultados mostraron menor satisfacción para la moderada distancia diagonal para tareas de alta frecuencia de cambio, pero no para las tareas de baja frecuencia. Sin embargo, el mejor comportamiento en términos de tiempo de tarea y tiempo de cambio, fue para la disposición vertical, ya que tenía la distancia más corta. En estudios más recientes, por ejemplo, en Bautista et al. (2022), los entornos de realidad aumentada han aprovechado la contigüidad espacial al integrar estrechamente los elementos visuales y textuales, lo que ha mejorado la gestión

de la carga cognitiva y la retención del conocimiento. Este principio ha sido particularmente beneficioso en la formación procedimental, en la que la realidad aumentada puede mostrar los recursos visuales y auditivos de forma espacialmente contigua, lo que ayuda a los alumnos a asociar la información con tareas específicas, según Krüger y Bodemer (2022). En la educación experimental, según Zhang et al. (2020), los entornos multimedia basados en la realidad aumentada permiten a los estudiantes manipular objetos virtuales en tiempo real, lo que garantiza que el contenido didáctico esté alineado espacialmente con las tareas experimentales, lo que mejora la participación y los resultados del aprendizaje. Además, las aplicaciones de la realidad aumentada en la enseñanza de la geometría espacial han demostrado que la presentación de objetos 3D cerca de la información textual relacionada ayuda a los estudiantes a comprender y visualizar mejores conceptos complejos, mejorando así sus habilidades espaciales, como mencionan Amir Alkodri et al. (2020). En general, según Paek et al. (2017), la aplicación coherente del principio de contigüidad espacial en los entornos de aprendizaje de AR subraya su eficacia para mejorar los resultados educativos al reducir la carga cognitiva y mejorar la asociación entre el contenido instructivo y las tareas prácticas (Craig et al., 2015; Putri et al., 2022; Solehatin et al., 2023).

Todos los estudios revisados midieron la separación de forma angular medida desde el observador. Los estudios mostraron que, para las tareas de comparación en pantallas convencionales, el comportamiento negativo en el rendimiento o la carga de trabajo, comienza a presentarse en separaciones superiores a  $45^\circ$ . No se encontró algún efecto asociado a la rotación de la cabeza. Para tareas que implican interacción con el contenido, se identificó que el efecto negativo en el tiempo de la tarea y la precisión se degrada proporcionalmente a medida que la separación aumenta. Sin embargo, el efecto aumenta significativamente para separaciones mayores a  $35^\circ$ . Se identificó que un ángulo de separación de  $27^\circ$  entre displays, podría mostrar mejores resultados de desempeño para ambientes de realidad aumentada. Así mismo, en los estudios revisados no se evalúa la contigüidad en profundidad, a pesar de involucrar una interfaz de usuarios espacial (3D), solo se evalúa la contigüidad en el campo visual. Lo anterior, no permite conocer la influencia de la separación en profundidad entre contenidos. Así mismo, la ubicación usada siempre mostró contigüidad horizontal en el campo, pero no se evaluaron otras posiciones del contenido con respecto a la imagen. De otro lado, los materiales que fueron evaluados, generalmente fueron materiales bidimensionales como imágenes y texto, pero no se evaluaron objetos de origen espacial como modelos 3D y la integración: Modelo-texto o modelo-imagen. Esto crea una posible limitación sobre el estado actual de conocimiento del principio y su aplicabilidad en entornos espaciales. Igualmente, aún no hay consenso sobre el efecto en la carga cognitiva, ni en el desempeño del participante al aplicar el principio. Esto refuerza lo que menciona Krüger y Bodemer (2022), al sugerir la necesidad de más estudios relacionados con este principio. Esto debido a que los resultados de los estudios encontrados no son concluyentes, frente la reducción de la carga cognitiva, como establece Geng y Yamada (2020). Posiblemente, como hipotetiza Kapp, porque logre una reducción de la carga cognitiva extrínseca (Thees et al., 2020) que es más compleja de distinguir con las herramientas generales. Así mismo, pocos de los estudios revisados mostraron evaluaciones con herramientas objetivas, lo que sugiere la necesidad de usar tecnologías como el eye tracking (Suzuki et al., 2024).

## 2.1 Experimento 1: Contigüidad Espacial De Campo

### 2.1.1 Materiales y Métodos

**Hipótesis H1.** Con el propósito de conocer el comportamiento del esfuerzo mental en los participantes que usan contenido instruccional en condiciones de Contigüidad/Discontigüidad de campo en un entorno de realidad aumentada, se propuso el estudio bajo la siguiente hipótesis, H1: *El esfuerzo mental del participante cuando el espacio de información esta contigüo al objeto es diferente a cuando el espacio de información está discontigüo.*

**Diseño Experimental.** El estudio planteó como variable independiente la Contigüidad de Campo, descrita en dos categorías: a. Contigüo: cuando la separación entre el objeto y el espacio de información es de 30 grados y b. Discontigüo: cuando la separación es de 65 grados. Como variable dependiente se tomó: El Esfuerzo Mental, medido con la Dilatación pupilar y la Duración de Fijaciones en el AOI (espacio de información). Para tomar estos datos se usaron unas gafas de Eyetracking SMI® y los datos fueron procesados con el software BeGaze 3.7. El grupo de participantes estuvo compuesto por 34 estudiantes universitarios con edad promedio 22,4 años, con bajo conocimiento previo de la temática de instrucción.

Para la ejecución del estudio, se diseñó la escena para el aprendizaje de anatomía de superficie de rotula y ligamento rotuliano de rodilla. La escena usa un simulador de rodilla Prodelphus® y los Espacios de Información son visualizados en unas gafas Hololens2. Se realizaron dos niveles de tratamiento para ubicar el espacio de información: a. Contigüo y b Discontigüo, que fueron asignados aleatoriamente.

**Procedimiento.** El procedimiento inició con la realización del test de conocimiento previo. Una vez verificado el nivel bajo de conocimiento previo, se procedió a la lectura y firma mecánica del consentimiento informado. Posteriormente, el participante realizó el tutorial para aprender el manejo del dispositivo Hololens y luego descansó cinco minutos. Luego, se instrumentó al participante con las gafas SMI y se calibró el eye-tracker. Finalmente, se colocó al participante las gafas Hololens2 y se inició el tratamiento asignado por aleatorización.

**Análisis de Datos.** Los datos del eyetracking fueron procesados en el software BeGaze 3.7. Posteriormente, los análisis estadísticos fueron realizados en el software SPSS v26. Se realizaron análisis estadísticos descriptivos para conocer el comportamiento interno de los datos. Finalmente, se evaluó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-Wilk y la homogeneidad con el test de Levene, con un nivel de significancia de 5%. Se realizó una comparación de medias mediante la prueba T-student pareada para los datos paramétricos y Prueba de Rangos de Wilcoxon para datos no paramétricos, donde el nivel de significancia se estableció en 5%, por lo que los valores de  $p < 0,05$  se consideran estadísticamente significativos. En referencia al sistema de numeración indicamos, que cuando la unidad tiene el valor cero, éste no se asienta, utilizando punto en vez de coma, tal y como recomienda APA. Ejemplo: " $p < .005$ ". Las unidades de millar, por su parte, se separarán con una coma y los decimales con punto: 1,532.27.3.

**Consideraciones éticas:** Este conjunto de experimentos ha sido aprobado por el comité de Comité de Ética e Investigación Científica de la Universidad Industrial de Santander (CEINCI) mediante Acta No. 18 de 8 de octubre de 2021. El experimento requirió la instrumentación de los participantes con dispositivos de medición. Sin embargo, no fue

invasivo y por lo tanto clasificado como: Sin Riesgo. Además, la información de los participantes fue codificada para garantizar el manejo confidencial de los datos.

## 2.1.2. Resultados

### 2.1.2.1. Esfuerzo mental

**Dilatación Pupilar:** Se observa que la media es mayor para el tratamiento Discontigüo con un valor de 0,16 con una DE ( $\pm 0,28$ ) mm. en comparación con el tratamiento Contigüo cuya media fue de -0,03 DE ( $\pm 0,13$ ) mm. Se confirmó la distribución normal de los datos con la prueba Shapiro-Wilk (p-valor = 0,22). Se realizó la prueba T-Student, obteniendo un (p-valor= 0,001), evidenciando diferencias significativas en la dilatación pupilar entre los tratamientos. Se calculó el tamaño del efecto con el D de Cohen, se obtuvo un efecto grande ( $d=0,87$ ). Los datos, sugieren que el esfuerzo mental es afectado por la Contigüidad/Discontigüidad de campo entre el objeto y el espacio de información. Específicamente, la Discontigüidad de Campo aumenta el esfuerzo mental en los estudiantes, tal como se observa en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración de Fijaciones entre AOIs para la Contigüidad de Campo*

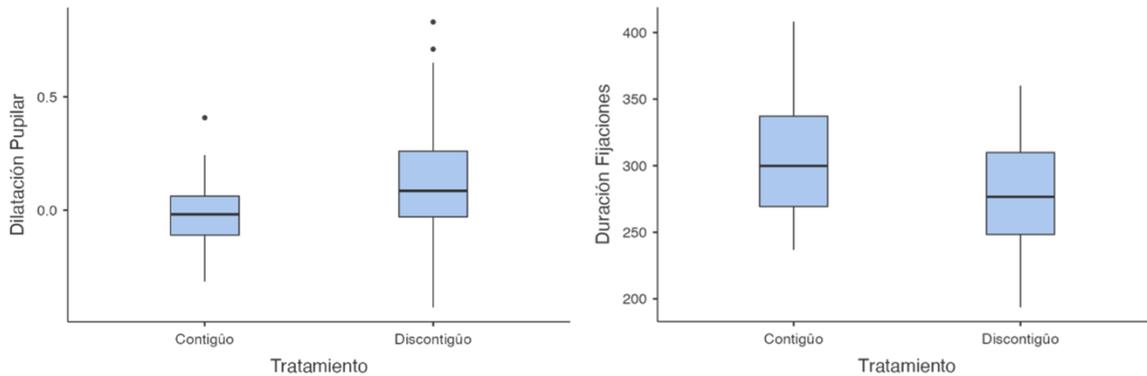
	Dilatación Pupilar (mm)				Duración Fijaciones en el AOI (ms)			
	Tratamiento Contigüidad de Campo		Prueba de Contraste	Tamaño del Efecto	Tratamiento		Prueba de Contraste	Tamaño del Efecto
	Contigüo	Discontigüo	T-student	D-Cohen	Contigüo	Discontigüo	T-student	D-Cohen
<b>Media</b>	-0,03	0,16	p-valor =	d=0,87	302,55	286,02	p-valor =	d=0,29
<b>DE</b>	0,13	0,28	0,001		54,6	57,6	0,046	

Fuente: Autor

**Duración de Fijaciones en el AOI:** El promedio de Duración de Fijaciones para el tratamiento Contigüo es de 302,55 ms. con una DE (54,6) siendo mayor que para el tratamiento Discontigüo que muestra una duración promedio de 286,02 ms. Con una DE (57,6 ms). Se aplicó el test Shapiro-Wilk (p-valor = 0,413) para verificar la normalidad de los datos. Se realizó la prueba T-Student, obteniendo un p-valor=0,046. Se calculó el tamaño del efecto usando el D-Cohen obtenido un efecto pequeño ( $d=0,29$ ). Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que existen diferencias en el Duración de Fijaciones entre los tratamientos. Lo anterior indica que, la proximidad espacial entre los elementos visuales afecta el esfuerzo mental del usuario. En este caso el tratamiento Discontigüo genera un mayor esfuerzo mental, evidenciado en la duración de fijaciones. tal como se observa en la Figura 1.

**Figura 1**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Contigüidad de Campo*



### 2.1.3. Discusión del Experimento 1

Con el propósito de establecer diferencias significativas en el esfuerzo mental de los participantes, cuando el participante es expuesto a los tratamientos de espacio de información Contigüo y Discontigüo en campo, se midió la Dilatación pupilar y duración de fijaciones en el AOI (espacio de información).

En la evaluación del esfuerzo mental, mediante la dilatación pupilar, se identificaron diferencias significativas ( $p\text{-valor}=0,001$ ) entre los tratamientos. El análisis mostró que para el tratamiento Discontigüo, la dilatación pupilar es mayor en comparación con el tratamiento Contigüo. Lo anterior, podría indicar la posible presencia de esfuerzo mental en el participante, tal como lo afirma Jarodzka et al. (2015) el aumento de la dilatación pupilar indica mayor esfuerzo mental, y posiblemente generada por la Discontigüidad de Campo visual. De igual forma, como lo muestra Rodemer et al. (2023) y Franklin et al. (2013) en la evaluación de esfuerzo mental las actividades de aprendizaje, un valor promedio de dilatación pupilar cercano a 0,2 evidencia, la presencia de esfuerzo mental. Eso es posiblemente generado, por el incremento de la búsqueda de información requerida en el tratamiento Discontigüo. Estos resultados son consistentes con la hipótesis planteada, ya se esperaba una diferencia en el esfuerzo mental bajo las condiciones de Contigüidad/Discontigüidad de Campo. También como lo menciona Holsanova et al. (2009), es posible que la presencia de Contigüidad, fomentará el procesamiento de la información presente en el conjunto Objeto-Espacio de Información, como una sola fuente, lo que reduciría el esfuerzo mental del participante. Estos resultados muestran que cuando la información está separada espacialmente, los estudiantes requieren un mayor esfuerzo mental para procesarla, lo que puede afectar su concentración y eficiencia en el aprendizaje. En contraste, la información presentada de manera unida y cercana facilita su procesamiento y reduce la carga cognitiva. La aplicación del principio de contigüidad espacial permite a los estudiantes comprender y recordar la información de manera más efectiva, contribuyendo a un proceso de aprendizaje más eficiente.

Para el Duración de Fijaciones en el AOI, se identificó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos ( $p\text{-valor}= 0,046$ ). Identificando que la Duración de Fijaciones en el AOI, para el tratamiento Contigüo fue mayor, en comparación con el

tratamiento Discontigüo. Como lo indica Zu et al. (2018), la Duración de Fijaciones en el AOI es una medida de esfuerzo mental. Es decir, los participantes mantuvieron fijaciones más prolongadas en el AOI en el tratamiento Contiguo, mientras que fue menor para el tratamiento Discontiguo. Esto sugiere un nivel de esfuerzo mental de los participantes en el tratamiento Discontigüo, realizando un procesamiento menos profundo, por lo que es posible que se presente un procesamiento superficial en el tratamiento Discontiguo. Esto es coherente con la literatura relacionada. Por ejemplo, en Tao et al. (2019) afirman en una revisión reciente de las medidas de rastreo ocular que la demanda mental de tarea en tareas de vuelo y conducción simulada aumentó a medida que la duración de la fijación disminuyó. De igual forma, Liu et al. (2022) descubrieron que las duraciones fijaciones eran más bajas en tareas con alta carga perceptiva. Los hallazgos están en línea con la teoría de la carga cognitiva, ya que, según Zu et al. (2018), la duración de la fijación se puede considerar una medida del esfuerzo mental que afecta la memoria de trabajo, ya que el participante debe almacenar las indicaciones en la memoria de trabajo, lo que reduce su esfuerzo mental. Estos resultados implican que cuando la información se presenta de manera contigua, los estudiantes mantienen fijaciones más prolongadas en las áreas relevantes, lo que indica un procesamiento cognitivo más profundo y un mayor esfuerzo mental dedicado a entender el material. Por el contrario, la presentación discontigua reduce la duración de las fijaciones, sugiriendo un procesamiento más superficial y potencialmente menos efectivo. Esto implica que organizar la información de forma integrada y cercana puede facilitar la concentración y la comprensión de los estudiantes, mejorando su capacidad para procesar y retener la información.

## 2.2 Experimento 2: Contigüidad Espacial de Profundidad

Esta característica está documentada por Rashid et al. (2012) como la contigüidad de profundidad, la cual se describe como la diferencia en profundidad que existe entre el objeto y el espacio de información, medida con respecto al observador. Se define la Contigüidad de profundidad, cuando el objeto y el espacio de información se encuentran a la misma profundidad con respecto al observador, y la Discontigüidad de profundidad cuando esta relación se rompe, haciendo que el espacio de información esté en una profundidad diferente al objeto. Por tanto, la contigüidad espacial de profundidad se refiere a la relación entre la separación física entre objetos y su entorno, y cómo esta separación influye en la carga cognitiva.

### 2.2.1. Materiales y Métodos

**Hipótesis H2.** Para conocer el comportamiento del esfuerzo mental en los participantes que usan contenido instruccional en condiciones de Contigüidad/Discontigüidad de profundidad en un entorno de realidad aumentada, se propuso el estudio bajo la siguiente hipótesis, H2: *El esfuerzo mental del participante cuando el espacio de información esta contigüo en profundidad al objeto es diferente a cuando el espacio de información está discontigüo en profundidad.*

**Diseño Experimental.** El estudio planteó como variable independiente la Contigüidad de Profundidad, descrita en dos categorías: a. Contigüo: cuando el espacio de información está a la misma profundidad que objeto vinculado, medido con respecto al observador y b.

Discontigüo: cuando el espacio de información no está a la misma profundidad que objeto vinculado, es decir, el EI se ubicó 15 más cerca al observador. Como variable dependiente se tomó: El Esfuerzo Mental, medido con la Dilatación pupilar y la Duración de Fijaciones en el AOI (espacio de información). Para tomar estos datos se usaron unas gafas de Eyetracking SMI® y los datos fueron procesados con el software BeGaze 3.7. El grupo de participantes estuvo compuesto por 34 estudiantes universitarios con edad promedio 24,3 años, con bajo conocimiento previo de la temática de instrucción.

Para la ejecución del estudio, se diseñó la escena para el aprendizaje de anatomía de superficie y ósea de tibia y peroné. La escena usa un simulador de rodilla Prodelphus® y los Espacios de Información son visualizados en unas gafas Hololens2. Se realizaron dos niveles de tratamiento para ubicar el espacio de información: a. Contigüo en Profundidad y b Discontiguo en Profundidad, que fueron asignados aleatoriamente.

**Procedimiento.** El procedimiento seguido fue el mismo ejecutado en el experimento 1 de Contigüidad de Campo.

**Análisis de datos.** Se aplicaron el mismo análisis que en el experimento 1.

**Consideraciones Éticas.** Las mismas que en el Experimento 1.

## 3.2.2 Resultados

### 3.2.2.1 Esfuerzo mental

**Dilatación Pupilar:** La media de la dilatación pupilar es mayor para el tratamiento Discontigüo con una media de (0,20 con una DE 0,25) mm, en comparación con el tratamiento Contigüo cuya media (-0,05 con una DE 0,18) mm. Se verificó la normalidad de los datos con el test Sharpiro-Wilk (p-valor = 0,15). Posteriormente, se realizó la prueba T-Student pareada, obteniendo un p-valor= 0,000. Se encontró un efecto mediano (d=0,68) calculado con el delta de cohen. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando diferencias significativas de la dilatación pupilar entre los tratamientos de Contigüidad/Discontigüidad de profundidad. Por tanto, los datos sugieren que la Contigüidad/Discontigüidad de profundidad afecta el esfuerzo mental en los estudiantes. Específicamente, el tratamiento de Discontigüidad de profundidad aumenta el esfuerzo mental, cómo se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2**

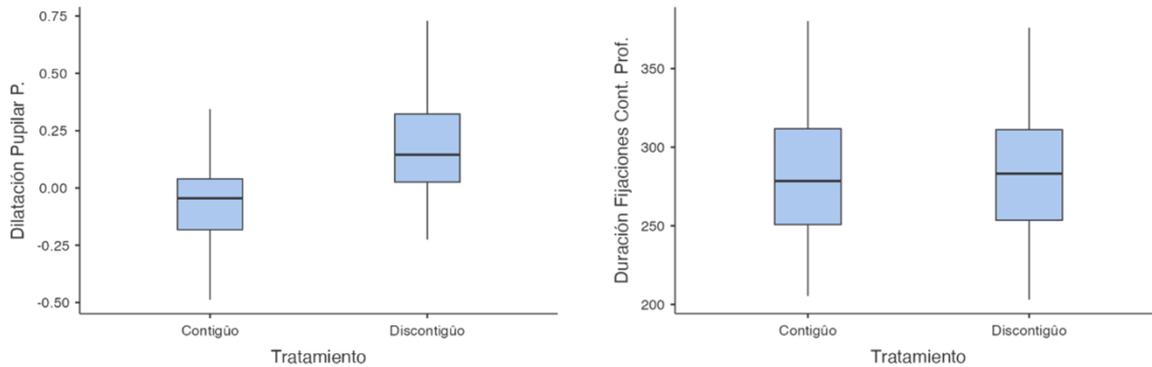
*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración de Fijaciones en el AOI para la contigüidad de Profundidad*

	Dilatación Pupilar (mm)				Duración Fijaciones en el AOI (ms)			
	Tratamiento Contigüidad de Campo		Prueba de Contraste	Tamaño del Efecto	Tratamiento		Prueba de Contraste	Tamaño del Efecto
	Contigüo	Discontigüo	T-student	D-Cohen	Contigüo	Discontigüo	T-student	D-Cohen
<b>Media</b>	-0,05	0,2	p-valor =	0,68	279,48	284,37	p-valor =	-
<b>DE</b>	0,18	0,25	0,000		42,71	41,35	0,204	

Fuente: Autor

**Figura 2**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Contigüidad de Profundidad*



**Duración de Fijaciones en el AOI:** El promedio la Duración de Fijaciones para el tratamiento Contigüo (279,48 ms. con una DE 42,71) es muy cercano al promedio del tratamiento Discontigüo (284,37 ms con una DE 41,35). Se verificó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-Wilk ( $p$ -valor = 0,166). Se realizó la prueba T-Student ( $p$ -valor= 0,204). Por tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, evidenciando que no existen diferencias significativas entre los tratamientos. Es decir, que la duración de fijación en el AOI es indiferente para los tratamientos. Lo que sugiere que la Contigüidad de profundidad, podría no afectar el esfuerzo mental de los estudiantes, tal como se observa en la Figura 2.

Finalmente, los datos indican que, no hay información concluyente sobre la influencia de la Proximidad espacial (Discontigüidad) en profundidad, que permita afirmar que el tratamiento Discontigüo puede ocasionar un mayor esfuerzo mental en el participante.

### 2.2.3 Discusión del Experimento 2

Para evaluar la hipótesis, relacionada con el esfuerzo mental, se analizó la Dilatación pupilar y la Duración de las Fijaciones en un AOI (Espacio de Información). Se observaron diferencias significativas ( $p$ -valor 0,000) entre los tratamientos, siendo mayor para el tratamiento Discontigüo en profundidad, en comparación con el tratamiento Contigüo en Profundidad. Estas diferencias mostraron un tamaño de efecto mediano ( $d=0,68$ ). Estos resultados, están alineados con las expectativas del experimento, ya que se esperaba una diferencia en la dilatación pupilar entre tratamientos. Así mismo, coinciden con la literatura, especialmente, con las investigaciones previas, como las planteadas por Jarodzka et al. (2015), Rodemer et al. (2023) y Frankling et al. (2013). Adicionalmente, Huckauf et al. (2010), reporta un costo cognitivo superior para la Discontigüidad de profundidad. Esto es posiblemente originado por que la percepción de profundidad y la ubicación del estímulo respecto al usuario afectan el esfuerzo mental, especialmente debido a la diferencia en profundidad entre el objeto y el Espacio de Información, lo que introduce la necesidad de un ajuste permanente de la acomodación y vergencia del ojo del participante cuando se usan dispositivos HMD como Hololens 2. También, como lo menciona Pielage et al. (2022), el conflicto entre acomodación y vergencia, genera posibles alteraciones en la respuesta de la pupila. En este experimento, el tratamiento Contigüo en Profundidad, no tuvo diferencia de profundidad entre el objeto y el espacio de información, lo que pudo haber

evitado el conflicto de acomodación y vergencia de mencionado por Huckauf, esto podría haber tenido un impacto en la disminución del costo cognitivo. De forma inversa, el tratamiento Discontiguo, pudo haber fomentado la acomodación vergencia del ojo durante la actividad, incrementando la dilatación pupilar. En otras palabras, estos resultados muestran que cuando la información en realidad aumentada se presenta con discontigüidad en profundidad, los estudiantes experimentan un mayor esfuerzo mental, reflejado en una mayor dilatación pupilar. Esto sugiere que las diferencias de profundidad entre el objeto y el espacio de información aumentan la carga cognitiva, posiblemente debido a ajustes constantes en la acomodación y vergencia ocular. Al diseñar materiales educativos en realidad aumentada, es fundamental mantener la contigüidad en profundidad entre los elementos para reducir el esfuerzo mental y promover un aprendizaje más eficiente y cómodo para los estudiantes.

Las medidas de Duración de fijaciones en el AOI, no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos ( $p$ -valor 0,204). A pesar de esto, se presentó un mayor tiempo de fijación en el AOI cuando se presentó el tratamiento Discontiguo. A pesar de como establece Guy et al. (2020), la duración de la fijación, se ve modulada por la complejidad del procesamiento de la información de profundidad, como la distinción entre disparidades posicionales simples y relativas; estas últimas requieren tiempos de procesamiento más prolongados debido a la necesidad de calcular múltiples diferencias angulares. También, en tareas de búsqueda visual, la duración de la fijación aumenta con la heterogeneidad de los distractores, la similitud entre el objetivo y el distractor y la densidad de los estímulos, aunque su contribución al tiempo de búsqueda varía con la complejidad del estímulo (Hans et al., 2014), factor que no varió entre tratamientos, ya que el contenido fue el mismo para los dos. También, como lo indica Macramalia y Bridgeman (2009), las señales de profundidad, como la dirección de la iluminación, las sombras y el balance de color, son esenciales para una percepción precisa de la profundidad en imágenes bidimensionales, y el esfuerzo mental necesario para procesar estas señales puede variar según la complejidad de la tarea visual. En este experimento, no se incluyó ninguna señal de profundidad, por tanto, es posible que la falta de señales de profundidad, mantenga un nivel de esfuerzo bajo, por lo tanto, no se evidencia dificultad cuando se usó el tratamiento Discontiguo en Profundidad. Sin embargo, es claro que la Contigüidad/Discontigüidad de profundidad, podría estar relacionada con la percepción de profundidad de los objetos. Como lo menciona Kemma et al. (2020), la percepción de la profundidad es crucial para controlar el comportamiento en un mundo tridimensional. Sin embargo, contrario a como se formuló en la hipótesis, las investigaciones indican que el esfuerzo mental parece influir en la percepción de profundidad (Takeuchi et al., 2011). Es decir, como lo menciona Kalia et al. (2016), la presencia de esfuerzo mental adicional puede afectar a la percepción de la profundidad, especialmente cuando se utilizan técnicas de realidad aumentada para mejorar la visualización. Es decir, cuando, el participante presenta un alto esfuerzo mental, puede percibir de forma incorrecta la profundidad del espacio de información, dando lugar a dificultades en la asociación por proximidad. Adicionalmente, es posible que la distancia de separación usada no generó el efecto de Discontigüidad en Profundidad. Así mismo, la posición del espacio de información tuvo un reposicionamiento mínimo en el campo visual, entre tratamientos, lo que podría no representar una tarea de búsqueda visual, sino un proceso fisiológico de acomodación visual para asociar el material mostrado en el espacio de información. Luego, las posibles afectaciones en el esfuerzo mental, podrían haberse originado en el proceso de acomodación y vergencia, y no directamente por una búsqueda visual. Es decir, que la ausencia de señales de profundidad

y la mínima separación entre elementos podrían haber mantenido bajo el esfuerzo mental en el tratamiento discontiguo. Esto sugiere que, para mejorar la percepción y reducir la carga cognitiva, es esencial incorporar señales de profundidad y considerar la proximidad en profundidad al diseñar materiales educativos. Al hacerlo, se facilita una correcta percepción espacial, evitando que un esfuerzo mental adicional afecte negativamente la comprensión y la interacción de los estudiantes con el contenido educativo.

## 2.4 Experimento 3: Contigüidad - Posición Relativa Horizontal

### 2.4.1. Materiales y Métodos

**Hipótesis H3.** Para conocer el comportamiento del esfuerzo mental en los participantes que usan contenido instruccional en condiciones de Contigüidad y Discontigüidad de Campo y profundidad, pero con posición relativa horizontal, se propuso el estudio bajo la siguiente hipótesis: *El esfuerzo mental de los participantes cuando el espacio de información está a la derecha del objeto físico, es el mismo, ya sea que el espacio de información esté contiguo o Discontiguo al objeto.*

**Diseño Experimental H3.** En este estudio se aplicó un diseño factorial univariado con la variable independiente definida como la contigüidad del espacio de información ubicado a la derecha del objeto. La contigüidad se evaluó en dos niveles: Contiguo, donde el espacio de información está alineado (en campo y profundidad) con el objeto, y Discontiguo, donde el espacio de información está desalineado (en campo y profundidad) respecto al objeto. La variable dependiente fue el Esfuerzo Mental, medido a través de la Dilatación Pupilar y la Duración de Fijaciones en el Área de Interés (AOI). Los datos se registraron utilizando gafas de Eye-tracking SMI® y se analizaron con el software BeGaze 3.7. El grupo de participantes consistió en 34 estudiantes universitarios con una edad promedio de 21.8 años y con un conocimiento previo limitado sobre la anatomía de los ligamentos colaterales de la rodilla, el tema de estudio. Para la ejecución del experimento, se diseñó una escena utilizando el simulador de rodilla Prodelphus®. Los Espacios de Información fueron visualizados mediante las gafas Hololens2. Se asignaron aleatoriamente dos niveles de tratamiento para la ubicación del espacio de información: Contiguo y Discontiguo. El procedimiento experimental y los análisis estadísticos aplicados fueron los mismos utilizados en el primer experimento de Contigüidad de Campo.

**Hipótesis H4:** El esfuerzo mental de los participantes cuando el espacio de información está a la izquierda del objeto físico, es el mismo, ya sea que el espacio de información esté contiguo o Discontiguo al objeto.

**Diseño Experimental H4.** En este estudio también se aplicó un diseño factorial univariado con características similares al estudio anterior. La variable independiente se definió como la contigüidad del espacio de información situado a la izquierda del objeto, evaluada en dos niveles: Contiguo y Discontiguo. La variable dependiente fue el Esfuerzo Mental, analizado a través de la Dilatación Pupilar y la Duración de Fijaciones en el Área de Interés (AOI). Se utilizó el mismo equipo de Eye-tracking SMI® y el software BeGaze 3.7 para la recopilación y análisis de datos.

El grupo de participantes y las condiciones experimentales fueron idénticos al estudio anterior, donde se exploró la contigüidad del espacio de información a la derecha del objeto. Este estudio también se diseñó para investigar la anatomía de los ligamentos colaterales de la rodilla utilizando el simulador Prodelphus® y las gafas Hololens2 para la visualización

de los Espacios de Información. Los niveles de tratamiento (Contiguo y Discontiguo) fueron asignados aleatoriamente, y se siguieron los mismos procedimientos experimentales y análisis estadísticos que en el primer experimento de Contigüidad de Campo.

## 2.4.2. Resultados - Espacio de Información a la Derecha del Objeto

### 2.4.2.1. Esfuerzo mental

**Dilatación Pupilar:** La media para la dilatación pupilar es mayor para el tratamiento Discontiguo (0,16 con una DE 0,6) mm, en comparación con el tratamiento Contiguo (-0,24 con una DE 0,53. Se verificó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-Wilk (p-valor = 0,113). Se realizó la prueba T-Student, se obtuvo un p-valor= 0,003. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que hay diferencias significativas en la dilatación pupilar entre los tratamientos. Por tanto, con base en los datos, es posible afirmar hay diferencias en la dilatación pupilar de los participantes, cuando el espacio de información esta Discontiguo, cuando se éste esta ubicado a la derecha del objeto. Lo anterior, podría afectar el esfuerzo mental de los participantes.

**Tabla 3**

*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración de Fijaciones en AOI. (Espacio de Información a la Derecha del Objeto)*

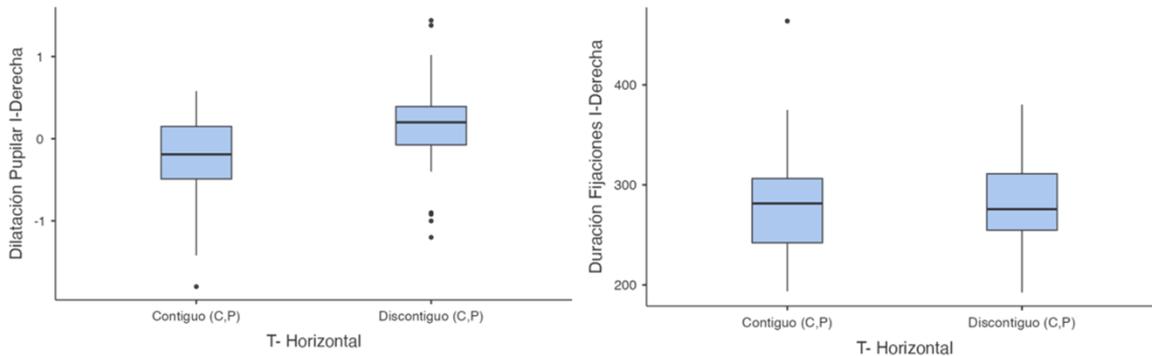
	Dilatación Pupilar (A la Derecha)					Duración Fijaciones (A la Derecha)				
	Tratamiento		Test	Prueba	Tamaño	Tratamiento		Test	Prueba	Tamaño
	Cont.	Discon.	Normalidad	Contraste	Efecto	Cont.	Discon.	Normalidad	Contraste	Efecto
	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	T-Student	D-Cohen	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango
<b>Media</b>	-0,24	0,16	p-valor	p-valor =	0,5	283	282	p-valor	p-valor =	-
<b>DE</b>	0,53	0,6	=0,113	0,003		54,3	40,8	=0,035	0,661	

Fuente: Autor

**Duración de Fijaciones en el AOI:** Los resultados mostraron un promedio para el tratamiento Contiguo (283 con una DE 54,30) muy cercano al promedio del tratamiento Discontiguo (282 con una DE 40,8). En la prueba Shapiro-Wilk (p-valor = 0,035) se verificó que no cumple la normalidad de los datos. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon (p-valor= 0,661). Por tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, evidenciando que no existen diferencias significativas en la duración de las fijaciones entre los tratamientos, tal como se observa en la Figura 3.

**Figura 3**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Posición Relativa Horizontal a la Derecha*



**2.4.3. Resultados - Espacio de Información a la Izquierda del Objeto**

**2.4.3.1. Esfuerzo mental**

**Dilatación Pupilar:** La media para la dilatación pupilar es mayor para el tratamiento Discontiguo (0,28 con una DE 0,73) mm, en comparación con el tratamiento Contiguo (0,06 con una DE 0,43). Se aplicó la prueba Shapiro-Wilk (p-valor <0.00,1) encontrando que los datos tienen comportamiento no paramétrico, como se observa en la Tabla 4. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon, se obtuvo un p-valor <0.011. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que hay diferencias significativas en la dilatación pupilar entre los tratamientos. Por tanto, con base en los datos, es posible afirmar hay diferencias en la dilatación pupilar de los participantes, cuando el espacio de información está Discontiguo, cuando se está ubicado a la izquierda del objeto.

**Tabla 4**

*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración de Fijaciones en AOI (Espacio de Información a la Izquierda del Objeto)*

Dilatación Pupilar (A la Izquierda)					Duración Fijaciones (A la Izquierda)					
Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto	Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto	
Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango	
<b>Media</b>	-0,06	0,28	p-valor	p-valor	0,5	271	284	p-valor =	p-valor	-
<b>DE</b>	0,43	0,73	<0,001	=0,011	51,7	70	0,003	=0,151		

Fuente: Autor

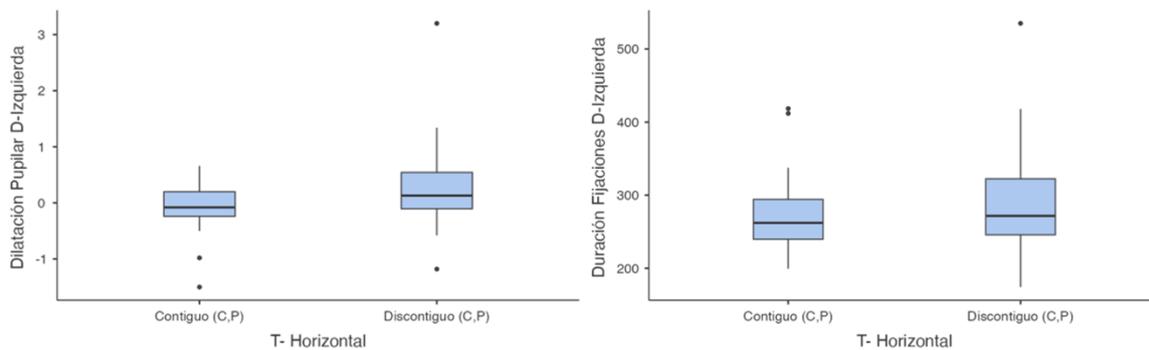
**Duración de Fijaciones en el AOI:** Los resultados mostraron un promedio para el tratamiento Contiguo (271 con una DE 51,7) y para el tratamiento Discontiguo (284 con una DE 70). En la prueba Shapiro-Wilk (p-valor = 0,005) se verificó que no cumple la normalidad de los datos. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon (p-valor= 0,151). Por tanto, se

acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, evidenciando que no existen diferencias significativas en la duración de las fijaciones entre los tratamientos.

Con base en los datos se puede concluir que el esfuerzo mental, no se ve afectado por la posición relativa horizontal. Es decir, que es indiferente la posición relativa horizontal del espacio de información con respecto al objeto, en términos de esfuerzo mental, , evidenciado en la Figura 4.

**Figura 4**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Posición Relativa Horizontal a la Izquierda*



#### 2.4.4 Discusión del Experimento 3

En el presente estudio, la hipótesis H3 planteaba que el esfuerzo mental de los participantes, medido a través de la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones en el área de interés (AOI), no varía significativamente cuando el espacio de información está ubicado a la derecha del objeto, independientemente de si el espacio es contiguo o discontinuo al objeto. Los resultados mostraron que la dilatación pupilar fue significativamente mayor en la condición discontinua (0.16 mm con una DE de 0.6) en comparación con la condición contigua (-0.24 mm con una DE de 0.53), evidenciando diferencias significativas con un p-valor de 0.003. Esto sugiere que la contigüidad espacial influye en la carga cognitiva, aumentando el esfuerzo mental cuando el espacio de información está discontinuo al objeto. Según Stoltmann et al. (2020), esta respuesta puede deberse a una inclinación natural de conceptualizar objetos o cantidades más grandes a la derecha, lo cual podría aumentar la carga cognitiva al tratar de procesar información discontinua en esta posición. Por otro lado, no se observaron diferencias significativas en la duración de las fijaciones en el AOI entre las condiciones contigua (283 ms con una DE de 54.30) y discontinua (282 ms con una DE de 40.8), con un p-valor de 0.661 en la prueba de rangos de Wilcoxon. Esto sugiere que, si bien la dilatación pupilar varía con la contigüidad, la duración de las fijaciones no es afectada de manera similar, posiblemente debido a la naturaleza específica de la tarea y cómo se distribuye la atención visual. Estos hallazgos implican que puede generarse esfuerzo mental posiblemente cuando el material esté ubicado a la derecha, pero únicamente cuando está discontinuo, es decir, separado en profundidad y campo de visión. Lo anterior, implica que, si el espacio de información está a la derecha del objeto físico, sólo generará esfuerzo mental, en condiciones de

discontigüidad. Esto significa, que dichos espacios de información pueden ubicarse a la derecha del objeto de forma contigua para reducir la carga cognitiva derivada de la búsqueda de información.

Para la hipótesis H4, se planteó que el esfuerzo mental de los participantes no varía significativamente cuando el espacio de información está ubicado a la izquierda del objeto, independientemente de si el espacio es contiguo o discontiguo al objeto. Los resultados indicaron que la dilatación pupilar fue significativamente mayor en la condición discontigua (0.28 mm con una DE de 0.73) comparada con la condición contigua (0.06 mm con una DE de 0.43), con un p-valor de 0.011. Esto nuevamente evidencia que la discontigüidad espacial aumenta la carga cognitiva. Como mencionan Barnas y Greenberg (2019) y De De Nooijer et al. (2013), factores culturales como la direccionalidad del lenguaje escrito pueden modular estas preferencias espaciales y reducir la carga cognitiva al alinear materiales didácticos con estos sesgos naturales. En términos de la duración de fijaciones en el AOI, no se encontraron diferencias significativas entre las condiciones contigua (271 ms con una DE de 51.7) y discontigua (284 ms con una DE de 70), con un p-valor de 0.151 en la prueba de rangos de Wilcoxon. Esto refuerza la observación de que la dilatación pupilar es una medida más sensible para detectar variaciones en el esfuerzo mental bajo las condiciones de contigüidad evaluadas. Estos hallazgos implican que presentar la información a la izquierda del objeto, solo afecta la carga cognitiva en condiciones de discontigüidad. Es decir, que ubicar espacios de información a la izquierda de los objetos no afecta la carga cognitiva.

Los hallazgos del presente estudio son coherentes con la literatura existente. Stolmann et al. (2020) sugiere que la conceptualización espacial natural influye en la carga cognitiva, lo cual se refleja en las diferencias de dilatación pupilar observadas. Además, Barnas y Greenberg (2019) y De Nooijer et al. (2013), destacan la importancia de alinear los materiales didácticos con los sesgos espaciales y culturales para optimizar la carga cognitiva y la eficiencia del procesamiento. En entornos de aprendizaje, la disposición de la información puede jugar un rol crucial en la carga cognitiva, como lo señala Zacharis et al. (2016), quien afirma que la carga cognitiva es mayor en entornos digitales (2D y 3D) comparado con entornos reales. Esto podría explicar por qué, en este estudio, la discontigüidad afectó significativamente la dilatación pupilar, un indicador de esfuerzo mental. Estos resultados apoyan lo mencionado por Tang et al. (2016) quien menciona que, aunque la modalidad de presentación no afecta significativamente la carga cognitiva, sí influye en la eficacia del aprendizaje, subrayando la relevancia de cómo se presenta la información espacialmente. Además, Einhauser et al. (2020) resalta que factores espaciales, como la altura y la profundidad de los estímulos, afectan la percepción temporal y pueden influir en el procesamiento de la información.

## 2.5. Experimento 4: Contigüidad - Posición Relativa Vertical

### 2.5.1 Materiales y Métodos

**Hipótesis H5.** Para conocer el comportamiento del esfuerzo mental en los participantes que usan contenido instruccional en condiciones de Contigüidad y Discontigüidad de Campo y profundidad, pero con posición relativa vertical (arriba o abajo del objeto físico), se propuso el estudio bajo la siguiente hipótesis: *El esfuerzo mental de los participantes cuando el espacio de información está arriba del objeto físico, es el mismo, ya sea que el espacio de información esté contiguo o Discontiguo al objeto.*

**Diseño Experimental H5:** En este estudio se aplicó un diseño factorial univariado con la variable independiente definida como la contigüidad del espacio de información ubicado arriba del objeto. La contigüidad se evaluó en dos niveles: Contiguo, donde el espacio de información está alineado (en campo y profundidad) con el objeto, y Discontiguo, donde el espacio de información está desalineado (en campo y profundidad) respecto al objeto. La variable dependiente fue el Esfuerzo Mental, medido a través de la Dilatación Pupilar y la Duración de Fijaciones en el Área de Interés (AOI). Los datos se registraron utilizando gafas de Eye-tracking SMI® y se analizaron con el software BeGaze 3.7. El grupo de participantes consistió en 34 estudiantes universitarios con una edad promedio de 21.8 años y con un conocimiento previo limitado sobre la anatomía de los ligamentos LCA y LCP de la rodilla, el tema de estudio. Para la ejecución del experimento, se diseñó una escena utilizando el simulador de rodilla Prodelphus®. Los Espacios de Información fueron visualizados mediante las gafas Hololens2. Se asignaron aleatoriamente dos niveles de tratamiento para la ubicación del espacio de información: Contiguo y Discontiguo. El procedimiento experimental y los análisis estadísticos aplicados fueron los mismos utilizados en el primer experimento de Contigüidad de Campo.

**Hipótesis H6:** *El esfuerzo mental de los participantes cuando el espacio de información está abajo del objeto físico, es el mismo, ya sea que el espacio de información esté contiguo o Discontiguo al objeto.*

**Diseño Experimental H6:** En este estudio también se aplicó un diseño factorial univariado con características similares al estudio anterior. La variable independiente se definió como la contigüidad del espacio de información situado a la izquierda del objeto, evaluada en dos niveles: Contiguo y Discontiguo. La variable dependiente fue el Esfuerzo Mental, analizado a través de la Dilatación Pupilar y la Duración de Fijaciones en el Área de Interés (AOI). Se utilizó el mismo equipo de Eye-tracking SMI® y el software BeGaze 3.7 para la recopilación y análisis de datos.

El grupo de participantes y las condiciones experimentales fueron idénticos al estudio anterior, donde se exploró la contigüidad del espacio de información a la derecha del objeto. Este estudio también se diseñó para investigar la anatomía de los ligamentos LCA y LCP de la rodilla utilizando el simulador Prodelphus® y las gafas Hololens2 para la visualización de los Espacios de Información. Los niveles de tratamiento fueron asignados aleatoriamente, y se siguieron los mismos procedimientos experimentales y análisis estadísticos que en el primer experimento 1 de Contigüidad de Campo.

## 2.5.2. Resultados - Posición Arriba del Objeto

### 2.5.2.1. Esfuerzo mental

**Dilatación Pupilar:** Se observa que la media de la Dilatación Pupilar es mayor para el tratamiento Discontiguo (0,33 con una DE 0,52) mm, en comparación con el tratamiento Contiguo (-0,02 con una DE 0,51) mm. Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-wilk (p-valor = 0,037) encontrando el comportamiento no paramétrico de los datos. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon, se obtuvo un p-valor= 0,020. El tamaño del efecto es mediano (d=0,47) calculado la correlación biselada de rangos. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que hay diferencias significativas entre los tratamientos. Por tanto, es posible afirmar que la contigüidad afecta el esfuerzo mental medido con la dilatación pupilar. Específicamente cuando el espacio de Información se localiza arriba del objeto.

**Tabla 5**

*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración Fijaciones en AOI. Espacio de Información Arriba del Objeto*

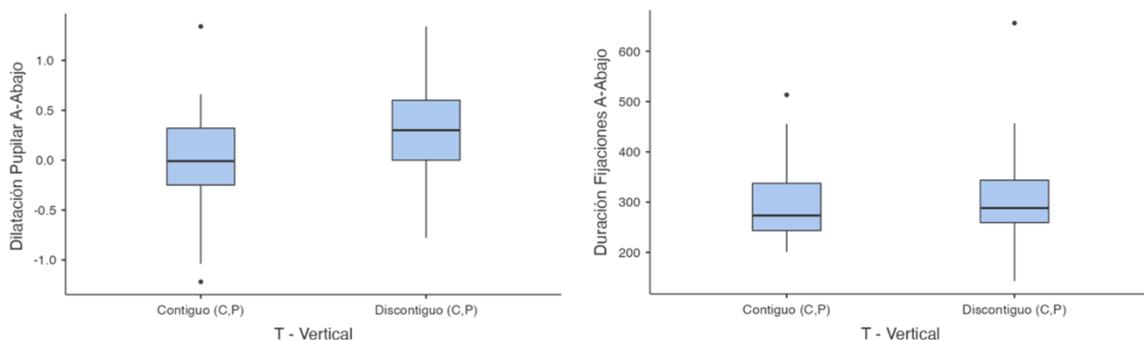
	Dilatación Pupilar (Arriba del objeto)					Duración Fijaciones (Arriba del objeto)				
	Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto	Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto
	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	T-Student	D-Cohen
<b>Media</b>	-0,02	0,33	p-valor	p-valor =	0,47	296	309	p-valor	p-valor =	-
<b>DE</b>	0,51	0,52	=0,037	0,020		76	91,9	=0,661	0,499	

Fuente: Autor

**Duración de Fijaciones en el AOI:** La media para la duración de fijaciones en el tratamiento Discontiguo (309 con una DE 91,9) ms, fue mayor a la media del tratamiento Contiguo (296 con DE 76) ms. Se verificó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-Wilk (p-valor = 0,661). Se realizó la prueba T-Student, obteniendo un p-valor= 0,449. Por tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, evidenciando que no existen diferencias significativas entre la duración de fijaciones de los tratamientos. Por tanto, los datos sugieren que la duración de las fijaciones no se ve afectado por la contigüidad o Discontigüidad cuando el espacio de información está arriba del objeto Es decir, que la duración de la fijación es la misma cuando el espacio de información es contiguo en comparación cuando esta Discontiguo, arriba del objeto, tal como se puede evidenciar en la Figura 5.

**Figura 5**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Posición Relativa Vertical Abajo*



### 2.5.3. Resultados - Posición Abajo del Objeto

#### 2.5.3.1. Esfuerzo mental

**Dilatación Pupilar:** Se observa que la media de la Dilatación Pupilar es mayor para el tratamiento Discontiguo (0,62 con una DE 1,01) mm, en comparación con el tratamiento Contiguo (0,10 con una DE 0,48) mm. Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-wilk (p-valor <0,001) encontrando el comportamiento no paramétrico de los datos. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon, se obtuvo un p-valor= 0,006. El tamaño del

efecto es mediano (0,54) calculado la correlación biselada de rangos. Por tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, evidenciando que hay diferencias significativas entre los tratamientos. Por tanto, es posible afirmar que la contigüidad afecta el esfuerzo mental medido con la dilatación pupilar. Específicamente cuando el espacio de Información se localiza abajo del objeto.

**Tabla 6**

*Estadísticos de Esfuerzo Mental: Dilatación pupilar y Duración Fijaciones en AOI. Espacio de Información Abajo del Objeto*

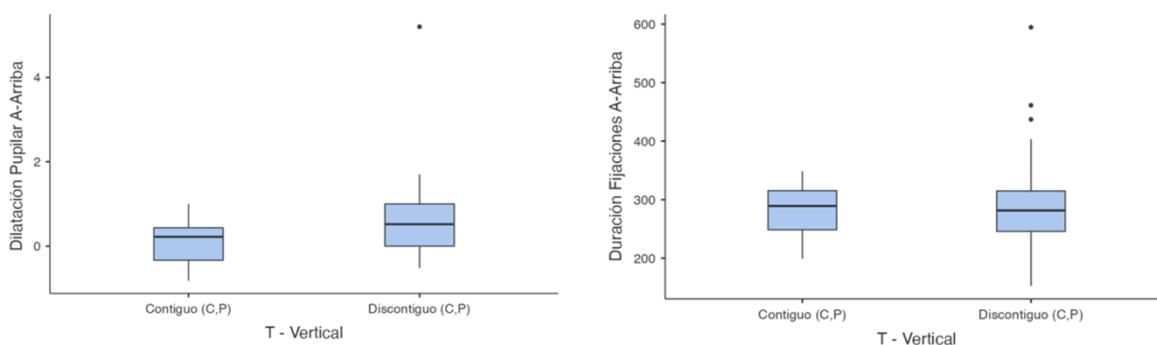
	Dilatación Pupilar (Abajo del Objeto)					Duración Fijaciones (Abajo del Objeto)				
	Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto	Tratamiento		Test Normalidad	Prueba Contraste	Tamaño Efecto
	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango	Cont.	Discon.	Shapiro-Wilk	Wilcoxon	C. Rango
<b>Media</b>	0,1	0,62	p-valor	p-valor =	0,54	281	290	p-valor	p-valor =	-
<b>DE</b>	0,48	1,01	<0,001	0,006		43,2	90,2	=0,047	0,840	

Fuente: Autor

**Duración de Fijaciones en el AOI:** La media para la duración de fijaciones en el tratamiento Discontiguo (290 con una DE 90,2) ms, fue mayor a la media del tratamiento Contiguo (281 con DE 43,2) ms. Se evaluó la normalidad de los datos con la prueba Shapiro-Wilk ( $p$ -valor = 0,047), encontrando un comportamiento no paramétrico. Se realizó la prueba de rangos de Wilcoxon, obteniendo un  $p$ -valor= 0,840. Por tanto, se acepta la hipótesis nula y se rechaza la hipótesis alternativa, evidenciando que no existen diferencias significativas entre la duración de fijaciones de los tratamientos. Por tanto, los datos sugieren que la duración de las fijaciones no se ve afectado por la contigüidad o Discontigüidad cuando el espacio de información está abajo del objeto. Es decir, que la duración de la fijación es la misma cuando el espacio de información es contiguo en comparación cuando esta Discontiguo, abajo del objeto, tal como se puede evidenciar en la Figura 6.

**Figura 6**

*Dilatación Pupilar y Duración de Fijaciones, según tratamiento de Posición Relativa Vertical Arriba*



#### 2.5.4. Discusión del Experimento 4

El presente estudio examinó cómo la contigüidad y la discontigüidad del espacio de información, en relación con la posición vertical (arriba o abajo del objeto físico), influyen en el esfuerzo mental de los participantes. Este esfuerzo mental fue medido mediante la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones. Los hallazgos proporcionan una comprensión detallada del impacto que tiene la disposición espacial de la información en el esfuerzo cognitivo, con importantes implicaciones para el diseño de materiales educativos y la optimización de entornos de aprendizaje.

Los resultados para la hipótesis H5 revelaron que la dilatación pupilar fue significativamente mayor en la condición discontigua en comparación con la condición contigua cuando el espacio de información estaba situado arriba del objeto ( $p$ -valor = 0,020). Este resultado sugiere que la desalineación del espacio de información en la posición superior aumenta el esfuerzo mental. Este hallazgo es consistente con investigaciones anteriores que indican que la disposición espacial puede afectar la carga cognitiva (Tang, 2023). Según Stoltmann (2021), las personas tienden a conceptualizar objetos más grandes a la derecha y más pequeños a la izquierda, pero este estudio amplía esa comprensión a la disposición vertical, demostrando que la desalineación vertical también incrementa el esfuerzo cognitivo. En relación con la duración de las fijaciones en el AOI, no se observaron diferencias significativas entre las condiciones contiguas y discontiguas ( $p$ -valor = 0,449). Esto sugiere que, aunque la desalineación vertical afecta la dilatación pupilar, no influye significativamente en la duración de las fijaciones. Este hallazgo es congruente con los estudios de Nooijer (2018), que mencionan que la alineación de materiales educativos puede reducir la carga cognitiva, aunque la duración de fijaciones podría no ser tan sensible a estos cambios. Estos hallazgos tienen algunas implicaciones en el diseño de la escena de RA. Que debe evitarse la ubicación de espacios de información arriba del objeto en condición de discontigüidad, esta restricción es fundamental para mantener el diseño de escenas fomentando la reducción de la carga cognitiva.

Para la hipótesis H6, los resultados mostraron una mayor dilatación pupilar en la condición discontigua en comparación con la condición contigua cuando el espacio de información estaba ubicado abajo del objeto ( $p$ -valor = 0,006). Este hallazgo refuerza la noción de que la discontigüidad aumenta el esfuerzo mental, independientemente de si la información se encuentra arriba o abajo del objeto. Este incremento en el esfuerzo mental puede ser explicado por la teoría de la carga cognitiva, que postula que la disposición espacial puede influir en la eficiencia del procesamiento de la información (Barnas & Greenberg, 2019). De manera similar a la hipótesis H1, no se encontraron diferencias significativas en la duración de fijaciones en el AOI entre las condiciones contiguas y discontiguas ( $p$ -valor = 0,840). Esto sugiere que la variable de duración de fijaciones se mantiene constante, sin importar la ubicación vertical de la información. Según Zacharis (2017), la carga cognitiva y las demandas de atención son mayores en entornos digitales y tridimensionales, lo que podría explicar por qué la duración de fijaciones no varía significativamente con la posición relativa vertical de la información. Este hallazgo, reafirma la contigüidad del espacio de información respecto al objeto, sea arriba o abajo de él. Esto propone una guía para la ubicación espacial de espacios de información en 3D.

Estos resultados tienen implicaciones para el diseño de materiales educativos y la layout de entornos de aprendizaje. Es fundamental considerar la disposición espacial de la información para minimizar el esfuerzo mental de los estudiantes. En contextos de aprendizaje digital y de realidad aumentada, la alineación contigua de la información con

los objetos de interés puede facilitar el procesamiento de la información y mejorar la eficiencia del aprendizaje, como señala Tang (2023). Entender cómo la disposición espacial afecta la carga cognitiva puede orientar a los diseñadores de materiales educativos a crear entornos de aprendizaje más eficaces. Einhäuser et al. (2020) menciona que la disposición espacial de los estímulos, incluyendo su altura y profundidad, influye en la percepción del tiempo y, por lo tanto, en el procesamiento de la información. Así, estos aspectos deben ser cuidadosamente considerados para optimizar el diseño instruccional.

Este estudio destaca la relevancia de la disposición espacial de la información en el esfuerzo mental de los participantes. Los resultados muestran que la contigüidad del espacio de información ya sea arriba o abajo del objeto, puede afectar significativamente la dilatación pupilar, un indicador de esfuerzo mental, mientras que la duración de las fijaciones se mantiene constante. Estos hallazgos proporcionan una base para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el diseño de entornos educativos y materiales didácticos.

### 3. Discusión General

Esta sección no debe presentar los resultados nuevamente, sino que debe explorar el significado de los resultados. Las citas extensas y la discusión de la literatura publicada deben evitarse en la sección. La disposición espacial de los espacios de información en entornos de realidad aumentada juega un papel crucial en la modulación del esfuerzo mental de los usuarios. Este estudio se propuso investigar cómo la contigüidad y discontinuidad, entre el objeto físico y los espacios de información, tanto en el plano horizontal como en el vertical, afectan la carga cognitiva durante la interacción con contenido procedimental. A través de cuatro experimentos diferenciados, se midieron la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones como indicadores del esfuerzo mental, ofreciendo una visión integral sobre la influencia de la disposición espacial. Se discuten estos hallazgos dentro del marco de la literatura existente, contrastando los resultados obtenidos con estudios previos y proporcionando una base para futuras investigaciones en el diseño de materiales educativos y entornos de aprendizaje.

Los resultados obtenidos a lo largo de los cuatro experimentos muestran que la disposición espacial, en especial la discontinuidad, entre el objeto y la información en entornos de realidad aumentada afecta significativamente el esfuerzo mental de los participantes, medido a través de la dilatación pupilar y la duración de las fijaciones. Estas medidas son consistentes con la literatura previa que indica que el aumento de la dilatación pupilar es un indicador de mayor esfuerzo mental (Jarodzka et al., 2015; Huckauf et al., 2010; Pielage, 2020).

Se observó que la dilatación pupilar fue mayor en el tratamiento discontinuo, lo cual sugiere un mayor esfuerzo mental debido a la necesidad de integrar información dispersa espacialmente. Esto concuerda con los hallazgos de Holsanova (2016) y Rodemer y Frankling, quienes afirman que la contigüidad espacial facilita el procesamiento de la información al reducir la carga cognitiva. Contrariamente, la duración de las fijaciones fue mayor en el tratamiento contiguo, sugiriendo un procesamiento más profundo de la información en esta condición. Este hallazgo se alinea con estudios previos que indican que una mayor duración de fijaciones está asociada con una mayor carga cognitiva (Tao et al., 2019; Liu et al., 2022). Así mismo, se evidencia que el esfuerzo mental por la discontinuidad

de campo, entre el objeto y el espacio de información, también se presenta en las posiciones relativas Horizontal (Derecha e Izquierda) y vertical (Arriba y Abajo). Nuevamente, se encontró que la dilatación pupilar era mayor en la condición discontigua, apoyando la hipótesis de que la discontigüidad en profundidad incrementa el esfuerzo mental debido a los ajustes constantes de acomodación y vergencia necesarios (Huckauf et al., 2010; Pielage, 2020). No se encontraron diferencias significativas, lo cual puede deberse a la falta de variación en las señales de profundidad, como sombras y balance de color, que podrían haber influido en la percepción y procesamiento de la información (Macramalia, 2018).

La dilatación pupilar fue mayor en condiciones discontiguas, tanto a la derecha como a la izquierda del objeto. Esto respalda la noción de que la discontigüidad espacial aumenta la carga cognitiva, posiblemente influenciada por factores culturales como la direccionalidad del lenguaje escrito (Barnas & Greenberg, 2019; de Nooijer et al., 2013). No se observaron diferencias significativas, lo cual indica que la duración de las fijaciones puede no ser tan sensible a las variaciones de contigüidad en la posición horizontal. Se observó una mayor dilatación pupilar en condiciones discontiguas, tanto arriba como abajo del objeto, sugiriendo un aumento en el esfuerzo mental debido a la desalineación vertical (Stoltmann et al., 2020; Barnas & Greenberg, 2019). De nuevo, no se encontraron diferencias significativas, lo cual sugiere que la alineación vertical puede no afectar tanto la duración de las fijaciones como lo hace la dilatación pupilar.

#### 4. Conclusiones

Los hallazgos de este estudio confirman que la disposición espacial de la información en entornos de realidad aumentada influye significativamente en el esfuerzo mental de los usuarios. Específicamente, se encontró que la discontigüidad, tanto en el campo visual como en la profundidad, incrementa la carga cognitiva, evidenciada por un aumento en la dilatación pupilar. Estos resultados son consistentes con estudios previos que indican que la desalineación espacial aumenta la carga cognitiva (Jarodzka et al., 2015; Rodemer et al., 2010) y extienden este conocimiento al incorporar la dimensión de profundidad en entornos tridimensionales de RA.

Las implicaciones prácticas de estos resultados son significativas para la mejora de los entornos virtuales de aprendizaje y el diseño de entornos que usan RA. Al demostrar que la **contigüidad espacial** en todas las dimensiones, horizontal, vertical y en profundidad; evita la carga cognitiva, se sugiere que los diseñadores de materiales educativos en RA deben ubicar el espacio de información contiguo al objeto de interés. Esto facilitaría la integración mental y la asociación de contenido, optimizando el aprendizaje y la retención de información por parte de los usuarios. Además, estos resultados proporcionan pautas concretas para el diseño de entornos e interfaces para RA que eviten la carga cognitiva, lo cual es crucial para el desarrollo de simuladores y entornos de aprendizaje más efectivos. Al aplicar estas recomendaciones, se puede mejorar la experiencia del usuario, aumentando la eficiencia y eficacia de las aplicaciones educativas basadas en realidad aumentada.

Finamente, este estudio no solo confirma el impacto de la disposición espacial en la carga cognitiva, sino que también ofrece directrices prácticas para el diseño de materiales

educativos en RA, contribuyendo así a la optimización de los entornos virtuales de aprendizaje en RA y al avance en el diseño de simuladores más efectivos.

## 5. Limitaciones y trabajo futuro

Este estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse. Primero, debido a que las señales pupilares pueden tener muchas fuentes de confusión, una limitación de los estudios con datos pupilares es que no pueden interpretarse de forma aislada. Los cambios de iluminación introducen ruido en el diámetro pupilar, afectando los datos finales, especialmente cuando se analizan factores cognitivos (Kret, 2019), a pesar de que el software utilizado aplique correcciones a las variaciones de iluminación. Hennessy (1976) afirma que los cambios en la iluminación pueden impactar la acomodación espacial en un entorno de realidad aumentada, como el cambio en el cristalino del ojo humano que afecta el enfoque de los objetos. La emoción también es una variable que puede influir en el diámetro pupilar como medida del esfuerzo mental (Brunken et al., 2016). Además, la duración del periodo de medición es crucial, ya que estímulos de corta duración no producen dilataciones pupilares que indiquen esfuerzo mental (Reid, 2018), por tanto, deben considerarse varias medidas durante la ejecución de la prueba. Usualmente, los estudios que utilizan eyetracking realizan varias capturas de datos con el mismo participante. Para este estudio, se realizó una sola captura por participante, lo que podría representar una limitación. Los hallazgos del estudio se basan en un contexto específico que implica la visualización de instrucciones anatómicas en un espacio de realidad aumentada, lo cual puede no ser generalizable a otras temáticas o tipos de contenido didáctico.

Futuras investigaciones deberían considerar unos contextos para validar estos resultados. También se recomienda explorar otros indicadores de esfuerzo mental, o el uso de herramientas subjetivas como el test nasa TXL o el test de Klepsh, para obtener una comprensión más completa del impacto de la disposición espacial en la carga cognitiva. La investigación futura también podría beneficiarse de estudios longitudinales que evalúen el efecto de la contigüidad en el aprendizaje y la retención a largo plazo

### Contribuciones de autores

Conceptualización, L. E. B., F. M. y G. P.; curación de datos, L. E. B.; análisis formal, L. E. B.; adquisición de financiación, L. E. B. y G. P.; investigación, L. E. B. y F. M.; metodología, L. E. B., G. P. y F. M.; administración del proyecto, L. E. B.; recursos, L. E. B. y G. P.; software, L. E. B.; supervisión, L. E. B. y G. P.; validación, L. E. B.; visualización, L. E. B.; redacción—preparación del borrador original, L. E. B. y F. M.; redacción—revisión y edición, L. E. B. y F. M.

### Financiación

Se agradece a la Universidad Industrial de Santander y a los grupos de investigación CAGE, GEPS e Interfaz adscritos a la misma universidad, por el apoyo en la ejecución del proyecto. Así mismo, los autores declaran que el presente trabajo de investigación no recibió financiación alguna.

## Referencias

- Acosta, J. L. B., Navarro, S. M. B., Gesa, R. F., & Kinshuk, K. (2019). Framework for designing motivational augmented reality applications in vocational education and training. *Australasian Journal of Educational Technology*, 35(3). <https://doi.org/10.14742/ajet.4182>
- Amir Alkodri, A. A., Harrizki, H., & Suharno, S. (2020). Penerapan algoritma surf pendeteksi objek pada augmented reality berbasis android. *JATISI (Jurnal Teknik Informatika dan Sistem Informasi)*, 6(2), 240-249. <https://doi.org/10.35957/JATISI.V6I2.217>
- Anderson, R., & Campbell, M. J. (2015). Accelerating skill acquisition in rowing using self-based observational learning and expert modelling during performance. *International Journal of Sports Science & Coaching*, 10(2-3), 425-437. <https://doi.org/10.1260/1747-9541.10.2-3.425>
- Andrade-Lotero, L. A. (2012). Teoría de la carga cognitiva, diseño multimedia y aprendizaje: un estado del arte. *Magis. Revista Internacional de Investigación en Educación*, 5, 75-92.
- Barnas, A. J., & Greenberg, A. S. (2019). Object-based attention shifts are driven by target location, not object placement. *Visual Cognition*, 27(9-10), 768-791. <https://doi.org/10.1080/13506285.2019.168058>
- Bautista, L. E., Guerrero, J., & Plata, C. (2022). Multimedia principles applied to a virtual reality application design for procedural learning. *Avances en Interacción Humano-Computadora*, 7(1), 9-12. <https://doi.org/10.47756/aihc.y7i1.119>
- Beege, M., Wirzberger, M., Nebel, S., Schneider, S., Schmidt, N., & Rey, G. D. (2019, August). Spatial continuity effect vs. spatial contiguity failure. Revising the effects of spatial proximity between related and unrelated representations. *Frontiers in Education*, 4. <https://doi.org/10.3389/feduc.2019.00086>
- Bertrand, J., Bhargava, A., Madathil, K. C., Gramopadhye, A., & Babu, S. V. (2017). The effects of presentation method and simulation fidelity on psychomotor education in a bimanual metrology training simulation. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)* (pp. 59-68). IEEE. <https://doi.org/10.1109/3DUI.2017.7893318>
- Brunken, R., Plass, J. L., Leutner, D., Brünken, R., & Plass, J. L. (2016). Direct measurement of cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychology*, 1520(July), 37-41. <https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801>
- Cammeraat, S., Rop, G., & de Koning, B. B. (2020). The influence of spatial distance and signaling on the split-attention effect. *Computers in Human Behavior*, 105, 106203. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.106203>
- Çeken, B., & Taşkın, N. (2022). Multimedia learning principles in different learning environments: a systematic review. *Smart Learning Environments*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40561-022-00200-2>
- Cheng, T., Lu, Y., & Yang, C. (2015). Using the multi-display teaching system to lower cognitive load. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 18, 128-140. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.18.4.128>

- Chikha, A. B., Khacharem, A., Trabelsi, K., & Bragazzi, N. L. (2021). The effect of spatial ability in learning from static and dynamic visualizations: a moderation analysis in 6-year-old children. *Frontiers in Psychology, 12*, 583968. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.583968>
- Chow, H. (2021). Augmented reality using vixassist and hololens 2 for automotive service and maintenance. *XR Case Studies: Using Augmented Reality and Virtual Reality Technology in Business*, 59-66. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-72781-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-72781-9_8)
- Craig, S. D., Twyford, J., Irigoyen, N., & Zipp, S. A. (2015). A test of spatial contiguity for virtual human's gestures in multimedia learning environments. *Journal of Educational Computing Research, 53*(1), 3-14. <https://doi.org/10.1177/0735633115585927>
- Czok, V., Krug, M., Müller, S., Huwer, J., Kruse, S., Müller, W., & Weitzel, H. (2023). A framework for analysis and development of augmented reality applications in science and engineering teaching. *Education Sciences, 13*(9), 926. <https://doi.org/10.3390/educsci13090926>
- Danielsson, O., Holm, M., & Syberfeldt, A. (2020). Augmented reality smart glasses in industrial assembly: current status and future challenges. *Journal of Industrial Information Integration, 20*, 100175. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100175>
- de Koning, B. B., Rop, G., & Paas, F. (2020). Effects of spatial distance on the effectiveness of mental and physical integration strategies in learning from split-attention examples. *Computers in Human Behavior, 110*, 106379. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106379>
- de Nooijer, J. A., Van Gog, T., Paas, F., & Zwaan, R. A. (2013). When left is not right: handedness effects on learning object-manipulation words using pictures with left-or right-handed first-person perspectives. *Psychological Science, 24*(12), 2515-2521. <https://doi.org/10.1177/0956797613498908>
- Doolani, S., Wessels, C., Kanal, V., Sevastopoulos, C., Jaiswal, A., Nambiappan, H., & Makedon, F. (2020). A review of extended reality (xr) technologies for manufacturing training. *Technologies, 8*(4), 77. <https://doi.org/10.3390/technologies8040077>
- Drouot, M., Le Bigot, N., Bricard, E., De Bougrenet, J. L., & Nourrit, V. (2022). Augmented reality on industrial assembly line: Impact on effectiveness and mental workload. *Applied Ergonomics, 103*, 103793. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2022.103793>
- Einhäuser, W., Atzert, C., & Nuthmann, A. (2020). Fixation durations in natural scene viewing are guided by peripheral scene content. *Journal of vision, 20*(4), 15-15. <https://doi.org/10.1167/JOV.20.4.15>
- Ens, B., Finnegan, R., & Irani, P. (2014). The personal cockpit: a spatial interface for effective task switching on head-worn displays. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 3171-3180). ACM. <https://doi.org/10.1145/2556288.2557058>
- Evans, A., Shevlin, S., Laurent, D. B. S., Bowness, J., Kearns, R. J., & MacFarlane, A. (2023). Pilot study exploring if an augmented reality needletrainer device improves novice performance of a simulated central venous catheter insertion on a phantom. *Cureus, 15*(6). <https://doi.org/10.7759/cureus.40197>

- Evans, G., Miller, J., Iglesias Pena, M., MacAllister, A., & Winer, E. (2017). Evaluating the Microsoft HoloLens through an augmented reality assembly application. *SPIE*, 101970V. <https://doi.org/10.1117/12.2262626>
- Franklin, M. S., Broadway, J. M., Mrazek, M. D., Smallwood, J., & Schooler, J. W. (2013). Window to the wandering mind: pupillometry of spontaneous thought while reading. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(12), 2289-2294. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.858170>
- Garzón, J., & Acevedo, J. (2019). Meta-analysis of the impact of augmented reality on students' learning gains. *Educational Research Review*, 27, 244-260. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>
- Geng, X., & Yamada, M. (2020). The effects of augmented reality on learning performance and cognitive load using the spatial continuity principle. *International Association for Development of the Information Society*. [https://doi.org/10.33965/celda2020\\_202014I030](https://doi.org/10.33965/celda2020_202014I030)
- Guntur, M. I. S., Setyaningrum, W., & Retnawati, H. (2020, July). Can augmented reality improve problem-solving and spatial skill?. *Journal of Physics: Conference Series* 1581(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1581/1/012063>
- Guy, N., Lancry-Dayana, O. C., & Pertzov, Y. (2020). Not all fixations are created equal: the benefits of using ex-Gaussian modeling of fixation durations. *Journal of vision*, 20(10), 9-9. <https://doi.org/10.1167/JOV.20.10.9>
- Hernán, Q. S. R., Escriba, L. A. R., Cueva, E. L. L., & Mora, N. M. L. (2021). Análisis de las características de la realidad aumentada aplicada a la educación. *HAMUT'AY*, 7(3), 75-85. <http://dx.doi.org/10.21503/hamu.v7i3.2202>
- Hidayat, N., Hadi, S., Basith, A., & Suwandi, S. (2018). Developing e-learning media with the contiguity principle for the subject of AutoCad. *Jurnal Pendidikan Teknologi dan Kejuruan*, 24(1), 72-82. <https://doi.org/10.21831/JPTK.V24I1.17796>
- Holsanova, J., Holmberg, N., & Holmqvist, K. (2009). Reading information graphics: the role of spatial contiguity and dual attentional guidance. *Applied Cognitive Psychology*, 23(9), 1215-1226. <https://doi.org/10.1002/acp.1525>
- Huckauf, A., Urbina, M. H., Grubert, J., Böckelmann, I., Doil, F., Schega, L., ... & Mecke, R. (2010). Perceptual issues in optical-see-through displays. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception* (pp. 41-48). ACM. <https://doi.org/10.1145/1836248.1836255>
- Jarodzka, H., Janssen, N., Kirschner, P. A., & Erkens, G. (2015). Avoiding split attention in computer-based testing: Is neglecting additional information facilitative? *British Journal of Educational Technology*, 46(4), 803-817. <https://doi.org/10.1111/bjet.12174>
- Kalia, M., Schulte zu Berge, C., Roodaki, H., Chakraborty, C., & Navab, N. (2016). Interactive depth of focus for improved depth perception. In *Medical Imaging and Augmented Reality: 7th International Conference, MIAR 2016, Bern, Switzerland, August 24-26, 2016, Proceedings 7* (pp. 221-232). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-43775-0\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-43775-0_20)

- Krüger, J. M., & Bodemer, D. (2022). Application and investigation of multimedia design principles in augmented reality learning environments. *Information*, 13(2), 74. <https://doi.org/10.3390/info13020074>
- LeBel, M. E., Haverstock, J., Cristancho, S., van Eimeren, L., & Buckingham, G. (2017). Observational learning during simulation-based training in arthroscopy: Is it useful to novices? *Journal of Surgical Education*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2017.06.005>
- Lei, X., Tsai, Y.-L., & Rau, P.-L. P. (2019). Effect of layout on user performance and subjective evaluation in an augmented-reality environment. In *Lecture Notes in Computer Science* (Vol. 11576, pp. 376-385). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-21999-9\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-030-21999-9_32)
- Liu, J. C., Li, K. A., Yeh, S. L., & Chien, S. Y. (2022). Assessing perceptual load and cognitive load by fixation-related information of eye movements. *Sensors*, 22(3). <https://doi.org/10.3390/s22031187>
- Macramalla, S., & Bridgeman, B. (2009). Anticipated effort in imagined self-rotation. *Perception*, 38(1), 79-91. <https://doi.org/10.1068/p5905>
- Malta, A., Farinha, T., & Mendes, M. (2023). Augmented reality in maintenance—history and perspectives. *Journal of Imaging*, 9(7), 142. <https://doi.org/10.3390/jimaging9070142>
- Mayer, R. E. (2005). Principles for reducing extraneous processing in multimedia learning: coherence, signaling, redundancy, spatial contiguity, and temporal contiguity principles. In R. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 183–200). Chapter, Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511816819.013>
- Mayer, R., E. (2008). Multimedia learning: spatial contiguity principle. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511811678.010>
- Mayer, R. E. (2020). *Multimedia learning* (3rd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316941355>
- Müller, T., & Dauenhauer, R. (2016). A taxonomy for information linking in augmented reality. In *Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics: Third International Conference, AVR 2016, Lecce, Italy, June 15-18, 2016. Proceedings, Part I 3* (pp. 368-387). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-40621-3>
- Noetel, M., Griffith, S., Delaney, O., Harris, N. R., Sanders, T., Parker, P., ... & Lonsdale, C. (2022). Multimedia design for learning: an overview of reviews with meta-meta-analysis. *Review of Educational Research*, 92(3), 413-454. <https://doi.org/10.3102/00346543211052329>
- Paek, S., Hoffman, D. L., & Saravanos, A. (2017). Spatial contiguity and incidental learning in multimedia environments. *British Journal of Educational Technology*, 48(6), 1390-1401. <https://doi.org/10.1111/BJET.12488>
- Pielage, H., Zekveld, A. A., van de Ven, S., Kramer, S. E., & Naber, M. (2022). The pupil near response is short lasting and intact in virtual reality head mounted displays. *Journal of Eye Movement Research*, 15(3). <https://doi.org/10.16910/jemr.15.3.6>

- Putri, N. P. D. M., Suharta, I. G. P., & Astawa, I. W. P. (2022). Development of augmented reality based geometry-learning media oriented to Balinese architecture to improve ability student mathematics spatial. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 9(10), 26–42. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v9.i10.2022.1183>
- Rashid, U., Nacenta, M. A., & Quigley, A. (2012). Factors influencing visual attention switch in multi-display user interfaces. In *Proceedings of the International Symposium on Pervasive Displays* (pp. 1-6). ACM. <https://doi.org/10.1145/2307798.2307799>
- Rasmussen, S. R., Konge, L., Mikkelsen, P. T., Sørensen, M. S., & Andersen, S. A. W. (2016). Secondary task precision for cognitive load estimation during virtual reality surgical simulation training. *Evaluation & the Health Professions*, 39(1), 114-120. <https://doi.org/10.1177/0163278715597962>
- Rodemer, M., Karch, J., & Bernholt, S. (2023, April). Pupil dilation as cognitive load measure in instructional videos on complex chemical representations. *Frontiers in Education*, 8. Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/educ.2023.1062053>
- Schroeder, N. L., & Cenkci, A. T. (2018). Spatial contiguity and spatial split-attention effects in multimedia learning environments: a meta-analysis. *Educational Psychology Review*, 30(3), 679-701. <https://doi.org/10.1007/S10648-018-9435-9>
- Seraji, F., Bayat, Z., Abbasi Kasani, H., & Abedi, H. (2020). Comparing two forms of spatial contiguity principle in student learning: 'text linked to image' versus 'text in image adjacency'. *Interdisciplinary Journal of Virtual Learning in Medical Sciences*, 11(2), 84-91. <https://doi.org/10.30476/IJVLMS.2020.85968.1029>
- Singh, B., Vig, K., & Kaunert, C. (2024). Modernizing healthcare: application of augmented reality and virtual reality in clinical practice and medical education. In *Modern Technology in Healthcare and Medical Education: Blockchain, IoT, AR, and VR* (pp. 1-21). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5493-3.ch001>
- Solehatin, S., Aslamiyah, S., Pertiwi, D. A. A., & Santosa, K. (2023). Augmented reality development using multimedia development life cycle (MDLC) method in learning media. *Journal of Soft Computing Exploration*, 4(1). <https://doi.org/10.52465/josce.v4i1.118>
- Stoltmann, K., Fuchs, S., & Krifka, M. (2020, August). Cross-linguistic differences in side assignment to objects and interpretation of spatial relations: right and left in German and Italian. In *German Conference on Spatial Cognition* (pp. 235-250). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57983-8\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57983-8_18)
- Suzuki, Y., Wild, F., & Scanlon, E. (2024). Measuring cognitive load in augmented reality with physiological methods: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*, 40(2), 375-393. <https://doi.org/10.1111/jcal.12882>
- Sweller, J. (2020). Cognitive load theory and educational technology. *Educational technology research and development*, 68(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11423-019-09701-3>

- Sweller, J., Van Merriënboer, J. J., & Paas, F. (2019). Cognitive architecture and instructional design: 20 years later. *Educational psychology review*, 31, 261-292. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09465-5>
- Takeuchi, T., Puntous, T., Tuladhar, A., Yoshimoto, S., & Shirama, A. (2011). Estimation of mental effort in learning visual search by measuring pupil response. *PloS one*, 6(7), e21973. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0021973>
- Tao, D., Tan, H., Wang, H., Zhang, X., Qu, X., & Zhang, T. (2019). A systematic review of physiological measures of mental workload. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15), 1-23. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152716>
- Thees, M., Kapp, S., Strzys, M. P., Beil, F., Lukowicz, P., & Kuhn, J. (2020). Effects of augmented reality on learning and cognitive load in university physics laboratory courses. *Computers in Human Behavior*, 108, 106316. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106316>
- Tene, T., Vique López, D. F., Valverde Aguirre, P. E., Orna Puente, L. M., & Vacacela Gomez, C. (2024). Virtual reality and augmented reality in medical education: an umbrella review. *Frontiers in Digital Health*, 6, 1365345. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2024.1365345>
- Trávez, G. C. (2023). El uso de la realidad aumentada en la enseñanza de ciencias: un enfoque integrador en educación secundaria. *Revista Científica Kosmos*, 2(1), 39-50. <https://doi.org/10.62943/rck.v2n1.2023.43>
- Van Merriënboer, J. J. G., & Kester, L. (2014). The four-component instructional design model: multimedia principles in environments for complex learning. In R. Mayer (Ed.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (pp. 104-148). Cambridge University Press.
- Wang, Y. T., & Wang, C. H. (2016). A study of effects on cognitive load and learning achievement with different spatial ability using synchronized multi-display.
- Wang, Z., Bai, X., Zhang, S., Billingham, M., He, W., Wang, P., ... & Chen, Y. (2022). A comprehensive review of augmented reality-based instruction in manual assembly, training and repair. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78, 102407. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102407>
- Yang, X., Wang, F., Mayer, R. E., Hu, X., & Gu, C. (2023). Ocular foundations of the spatial contiguity principle: Designing multimedia materials for parafoveal vision. *Journal of Educational Psychology*, 115(8), 1125–1140. <https://doi.org/10.1037/edu0000823>
- Zacharis, G. K., Mikropoulos, T. A., & Kalyvioti, K. (2016). Cognitive load and attentional demands during objects' position change in real and digital environments. *Themes in Science and Technology Education*, 9(2), 83-91.
- Zhang, Z., Li, Z., Han, M., Su, Z., Li, W., & Pan, Z. (2021). An augmented reality-based multimedia environment for experimental education. *Multimedia Tools and Applications*, 80(1), 575-590. <https://doi.org/10.1007/S11042-020-09684-X>
- Zu, T., Hutson, J., Loschky, L. C., & Sanjay Rebello, N. (2018). Use of eye-tracking technology to investigate cognitive load theory. *arXiv*, 472-475. <https://doi.org/10.1119/perc.2017.pr.113>