

Efectividad de tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular para el manejo de la ambliopía entre 2015 y 2025: revisión exploratoria del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva entre población pediátrica y adulta

Alejandra Jaimes Fuentes y Angie Dayana Piragua Alarcón

Trabajo de grado para optar por el título de Especialistas en Optometría Pediátrica

Director

Olivia Margarita Narváez Rumié

Doctor en Ciencias de la Salud

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ciencias de la salud

Facultad de Optometría

2026

Contenido

Introducción	10
1. Efectividad de tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular para el manejo de la ambliopía entre 2015 y 2025: revisión exploratoria del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva entre población pediátrica y adulta.....	13
1.1 Planteamiento del problema	13
1.2 Antecedentes.....	14
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
2. Marco referencial	17
2.1 Marco teórico.....	17
2.1.1 Ambliopía: concepto clínico y relevancia terapéutica	17
2.1.2 Plasticidad visual y visión binocular.....	18
2.1.3 Tratamientos convencionales y limitaciones terapéuticas	19
2.1.4 Entrenamiento dicóptico digital	20
2.1.5 Aprendizaje perceptual y entrenamiento digital	21
2.1.6. Efectividad clínica de las tecnologías emergentes.....	23
2.1.7 Pertinencia de una revisión exploratoria.....	24
2.2 Marco conceptual	25
2.3 Marco legal	29
3.1 Criterios de exclusión	31

3.2 Variables	31
3.3 Procedimiento	33
3.4 Plan de análisis	35
3.5 Evaluación de sesgos	36
3.6 Consideraciones éticas.....	36
4. Resultados	37
5. Discusión	43
6. Conclusiones	46
Referencias	48

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Descripción de los componentes PICO</i>	30
Tabla 2. <i>Operacionalización de las variables</i>	32
Tabla 3. <i>Búsqueda de términos en tesauro DeCS</i>	33
Tabla 4. <i>Ecuaciones de búsqueda empleadas en la revisión</i>	34
Tabla 5. <i>Descripción de las características bibliométricas</i>	39
Tabla 6. <i>Resultados clínicos</i>	42

Lista de figuras

Figura 1. <i>Diagrama de flujo para la búsqueda y selección de estudios.</i>	38
---	----

Resumen

La ambliopía es un trastorno del neurodesarrollo visual que afecta la agudeza visual y la función binocular, asociado a alteraciones en el procesamiento cortical y a fenómenos como la supresión interocular. Aunque los tratamientos convencionales han demostrado eficacia, presentan limitaciones en adherencia y en la recuperación binocular, lo que ha impulsado el desarrollo de terapias basadas en estimulación binocular mediante tecnologías digitales. **Objetivo:** Evaluar la efectividad del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía, mediante una revisión exploratoria de la evidencia científica publicada entre 2015 y 2025, considerando diferencias entre población infantil y adulta. **Metodología:** Estudio secundario cualitativo tipo revisión exploratoria. La búsqueda se realizó en bases de datos especializadas y motores académicos, mediante ecuaciones en español e inglés con descriptores relacionados con ambliopía, visión binocular, entrenamiento dicóptico y realidad virtual. Se incluyeron estudios en población pediátrica y adulta que evaluaran intervenciones tecnológicas con enfoque binocular y reportaran resultados clínicos visuales y binoculares. **Resultados:** Se identificaron 2826 registros; tras selección y evaluación metodológica, se incluyeron 20 estudios. La evidencia mostró mejoras en agudeza visual, función binocular y estereopsis. Los resultados fueron más consistentes en población pediátrica, aunque también se evidenciaron beneficios en adultos. Se observó heterogeneidad en diseños, muestras y protocolos. **Conclusiones:** El entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva representan alternativas terapéuticas prometedoras para la ambliopía, con beneficios en diferentes grupos etarios, aunque se requieren estudios más estandarizados.

Palabras clave: ambliopía, estimulación binocular, entrenamiento dicóptico digital, realidad virtual inmersiva, revisión exploratoria, grupo etario

Abstract

Amblyopia is a neurodevelopmental visual disorder that affects visual acuity and binocular function, associated with alterations in cortical processing and mechanisms such as interocular suppression. Although conventional treatments have proven effective, they present limitations in adherence and binocular recovery, which has led to the development of therapies based on binocular stimulation through digital technologies. **Objective:** To evaluate the effectiveness of digital dichoptic training and immersive virtual reality in the treatment of amblyopia through a scoping review of scientific evidence published between 2015 and 2025, considering differences between pediatric and adult populations. **Methodology:** A qualitative secondary study with a scoping review design was conducted. The search was performed in specialized databases and academic search engines using search equations in Spanish and English, including descriptors related to amblyopia, binocular vision, dichoptic training, and virtual reality. Studies involving pediatric and adult populations with amblyopia were included if they evaluated technology-based binocular interventions and reported clinical visual and binocular outcomes. **Results:** A total of 2,826 records were identified; after screening and methodological assessment, 20 studies were included. Evidence showed improvements in visual acuity, binocular function, and stereopsis. Results were more consistent in pediatric populations, although clinically relevant benefits were also observed in adults. Heterogeneity was found across study designs, samples, protocols, and evaluation criteria. **Conclusions:** Digital dichoptic training and immersive virtual reality represent promising therapeutic alternatives for amblyopia, showing benefits across different age groups, although further standardized studies are required.

Keywords: Amblyopia, binocular stimulation, digital dichoptic training, immersive virtual reality, scoping review, age group

Introducción

La ambliopía corresponde a una alteración del neurodesarrollo visual que afecta directamente la agudeza visual y la función binocular. Más allá de considerarse únicamente una alteración funcional, investigaciones recientes han mostrado que esta condición también se relaciona con cambios estructurales en áreas específicas del sistema visual central; entre estos hallazgos se describen modificaciones en la corteza visual primaria y en áreas visuales secundarias, así como variaciones en el grosor cortical y en la organización de las redes neuronales. Lo que permite interpretar la ambliopía como un proceso asociado a cambios en la organización cortical, más allá de una simple supresión funcional del ojo afectado (Clavagnier & Hess, 2018; Li et al., 2015; Levi, 2020).

Esta condición suele desarrollarse en los primeros años de vida, etapa crítica para la maduración del sistema visual debido a su alta sensibilidad a los estímulos sensoriales y a su elevada plasticidad cortical (Lagrèze & Löwel, 2015). La privación o desbalance visual en estas etapas tempranas puede alterar el procesamiento binocular cortical, generando consecuencias persistentes en la visión binocular y la estereopsis (Wallace et al., 2018).

Durante muchos años, el manejo clínico de la ambliopía se ha basado en la oclusión o penalización del ojo dominante, tratamientos que han demostrado eficacia en determinadas edades. Sin embargo, también han evidenciado limitaciones importantes, entre ellas dificultades en la adherencia, impacto emocional en la población pediátrica y recuperación incompleta de la función binocular, especialmente en pacientes de mayor edad (Levi & Li, 2009; Birch et al., 2019).

En este contexto, el avance de las tecnologías aplicadas a la rehabilitación visual ha favorecido nuevas intervenciones centradas en la estimulación binocular activa, mediante entornos digitales interactivos, videojuegos terapéuticos y experiencias inmersivas. Estas alternativas buscan fortalecer la cooperación binocular, disminuir la supresión interocular y aumentar la

motivación del paciente mediante actividades más dinámicas y funcionales (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022).

Desde una perspectiva evolutiva del conocimiento, la forma de entender la ambliopía ha cambiado de manera considerable. Anteriormente se abordaba como un trastorno monocular; sin embargo, actualmente se reconoce que también compromete el procesamiento binocular, lo que ha impulsado el desarrollo de nuevas estrategias terapéuticas orientadas a recuperar la interacción funcional de ambos ojos (Levi et al., 2015; Hess et al., 2014).

Dentro de estas alternativas, el aprendizaje perceptual ha mostrado resultados favorables en habilidades visuales específicas, aunque con variabilidad en su efectividad (Hou et al., 2022; Ming et al., 2025). Posteriormente, la realidad virtual ha cobrado interés como herramienta capaz de controlar con precisión los parámetros visuales en entornos tridimensionales, favoreciendo la adherencia al tratamiento, aunque su implementación aún presenta limitaciones relacionadas con el costo y la disponibilidad tecnológica (Leal-Vega et al., 2024; Molina-Martín et al., 2023).

Asimismo, se han desarrollado intervenciones basadas en estimulación dicóptica, incluyendo películas y videojuegos terapéuticos, que han mostrado utilidad especialmente en población pediátrica, aunque sus resultados dependen del tiempo de exposición y de la adecuada calibración de los estímulos visuales (Li et al., 2013; Kelly et al., 2019).

A pesar de estos avances, persisten interrogantes relevantes sobre la efectividad clínica de estas intervenciones. La variabilidad en los protocolos, la diversidad de plataformas tecnológicas, la heterogeneidad de las muestras y la falta de estandarización en los criterios de evaluación dificultan la comparación entre estudios y la aplicación de sus resultados en la práctica clínica (Rodán et al., 2022; Ming et al., 2025).

En este contexto, resulta pertinente realizar una revisión exploratoria de la literatura científica publicada entre 2015 y 2025, con el propósito de organizar y sintetizar la evidencia

disponible sobre el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva como alternativas terapéuticas en el tratamiento de la ambliopía en adultos y niños.

1. Efectividad de tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular para el manejo de la ambliopía entre 2015 y 2025: revisión exploratoria del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva entre población pediátrica y adulta

1.1 Planteamiento del problema

A pesar de los avances en el entendimiento de la ambliopía como un trastorno del procesamiento binocular, su abordaje terapéutico continúa enfrentando múltiples limitaciones en la práctica clínica. Esta condición, asociada a alteraciones en la agudeza visual y en la integración binocular, se relaciona tanto con disfunciones funcionales como con cambios estructurales en el sistema visual central (Clavagnier & Hess, 2018; Li et al., 2015).

Los tratamientos tradicionales, como la oclusión y la penalización, han demostrado eficacia en determinadas etapas del desarrollo visual; sin embargo, presentan dificultades relacionadas con la adherencia, el impacto emocional en la población pediátrica y una recuperación limitada de la función binocular, especialmente en pacientes de mayor edad (Levi & Li, 2009; Birch et al., 2019).

En respuesta a estas limitaciones, han surgido alternativas terapéuticas basadas en estimulación binocular activa, como el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva, las cuales buscan abordar directamente los mecanismos neurofisiológicos implicados en la ambliopía y aprovechar la plasticidad neuronal residual del sistema visual (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022).

No obstante, la evidencia científica disponible presenta una alta variabilidad en cuanto a protocolos de intervención, características de las muestras, plataformas tecnológicas utilizadas y métodos de evaluación, lo que dificulta la comparación entre estudios y limita la posibilidad de establecer conclusiones claras sobre su efectividad clínica (Rodán et al., 2022; Ming et al., 2025).

Adicionalmente, uno de los aspectos menos esclarecidos en la literatura es la diferencia en la respuesta terapéutica entre población pediátrica y adulta. Mientras que en niños se espera una mayor efectividad debido a la mayor plasticidad neuronal durante el desarrollo visual (Lagrèze & Löwel, 2015), en adultos los resultados son más variables, lo que genera incertidumbre sobre el alcance real de estas intervenciones en diferentes grupos etarios (Rodán et al., 2022; Ming et al., 2025).

En este contexto, surge la necesidad de analizar de manera estructurada la evidencia científica disponible sobre el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía, con el fin de determinar su efectividad y establecer cómo varía su impacto según la edad de los pacientes.

1.2 Antecedentes

En las últimas décadas la forma de entender la ambliopía ha cambiado de manera considerable. Antes se abordaba principalmente como un trastorno monocular, pero actualmente se reconoce que también compromete el procesamiento binocular (Levi et al., 2015). Esta visión más amplia ha impulsado el diseño de nuevas estrategias terapéuticas orientadas a recuperar la interacción funcional de ambos ojos, teniendo en cuenta que la plasticidad neuronal puede mantenerse incluso después del periodo crítico clásico (Rodán et al., 2022; Levi et al., 2015).

Dentro de las primeras alternativas tecnológicas estudiadas se encuentra el aprendizaje perceptual, que ha demostrado resultados favorables en habilidades visuales específicas como la sensibilidad al contraste y la discriminación espacial. No obstante, aunque se han reportado cambios funcionales en la población pediátrica y en adultos jóvenes, la magnitud de estos resultados no ha sido uniforme y suele depender en gran medida del tipo de tarea entrenada (Hou et al., 2022; Hou et al., 2024).

Posteriormente, la realidad virtual ha cobrado interés como herramienta capaz de controlar con precisión los parámetros visuales dentro de entornos tridimensionales e interactivos. La evidencia disponible sugiere que estas plataformas pueden amentar el compromiso del paciente y así favorecer la adherencia al tratamiento; sin embargo, su incorporación a la práctica clínica aún se ve limitada por factores como el costo, la ergonomía de los dispositivos y disponibilidad tecnológica (Hess & Thompson, 2015; Leal-Vega et al., 2024; Hou et al., 2024).

De forma paralela, se han desarrollado intervenciones basadas en películas dicópticas, las cuales combinan estimulación binocular controlada con actividades de bajo requerimiento cognitivo. Este enfoque ha mostrado utilidad en edades tempranas, aunque los resultados dependen en gran medida del tiempo de exposición y de la adecuada calibración de los estímulos visuales (Leal-Vega et al., 2024; Rajavi et al., 2021).

Finalmente, han surgido propuestas terapéuticas combinadas que integran distintas tecnologías dentro de un mismo programa de rehabilitación visual. Estas estrategias buscan potenciar diferentes mecanismos de plasticidad visual y han mostrado resultados preliminares prometedores, particularmente cuando se acompañan de corrección óptica adecuada ((Wyganski-Jaffe et al., 2023; Thompson, 2019).

En conjunto, los antecedentes reflejan un crecimiento sostenido en el desarrollo de tratamientos tecnológicos para la ambliopía, junto con una marcada heterogeneidad metodológica y ausencia de protocolos estandarizados. Esta situación refuerza la pertinencia de revisiones exploratorias que permitan organizar el conocimiento existente y delimitar con mayor claridad el papel de estas tecnologías en el manejo clínico del trastorno (Hou et al., 2024; Ming et al., 2025).

En este punto, y teniendo en cuenta los avances que se han venido dando en el tratamiento de la ambliopía, así como las limitaciones que aún persisten en la evidencia disponible, surge la necesidad de revisar de manera más organizada lo que la literatura científica ha reportado sobre el

entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva. Esto permite no solo comprender mejor el alcance de estas alternativas terapéuticas, sino también aportar a la academia y a los profesionales de la salud visual una perspectiva más actualizada que pueda servir de apoyo en el ejercicio clínico. A partir de ello, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la efectividad del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía, según la evidencia científica publicada entre 2015 y 2025, y cómo varía según la edad de los pacientes?

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general*

Evaluar la efectividad del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía, mediante la revisión exploratoria de la evidencia científica publicada entre 2015 y 2025, considerando diferencias entre población infantil y adulta.

1.3.2 *Objetivos específicos*

Caracterizar bibliográficamente los estudios de investigación a incluir en la revisión bibliográfica.

Identificar y caracterizar las intervenciones tecnológicas basadas en entrenamiento dicóptico digital y realidad virtual inmersiva utilizadas para el tratamiento de la ambliopía.

Analizar las diferencias en la efectividad del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en ambliopía según grupo etario, con base en la evidencia científica revisada.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Ambliopía: concepto clínico y relevancia terapéutica

La ambliopía es un trastorno del neurodesarrollo visual que se caracteriza por una disminución de la agudeza visual, generalmente unilateral, que no puede ser explicada únicamente por alteraciones estructurales del globo ocular. Su origen se relaciona con una experiencia visual anormal durante etapas tempranas del desarrollo, momento en el cual el sistema visual presenta una alta sensibilidad a los estímulos sensoriales y una importante capacidad de plasticidad cortical (Levi et al., 2020; Lagrèze & Löwel, 2015). Aunque durante mucho tiempo fue abordada principalmente como una alteración monocular, en la actualidad se reconoce que su compromiso va más allá de la pérdida de agudeza visual, ya que también afecta la estereopsis, la sensibilidad al contraste y la integración funcional entre ambos ojos (Wallace et al., 2018; Levi et al., 2015).

La comprensión contemporánea de la ambliopía ha permitido establecer que este trastorno no solo implica una disminución funcional del ojo ambliope, sino también cambios en el procesamiento cortical de la información visual. Desde esta perspectiva, la ambliopía debe entenderse como una condición compleja en la que intervienen mecanismos de supresión interocular, reorganización neural y alteración de la visión binocular, lo cual explica por qué algunos pacientes no logran una recuperación funcional completa con tratamientos convencionales centrados exclusivamente en el ojo afectado (Levi et al., 2020; Hess & Thompson, 2015; Levi et al., 2015). Esta visión más amplia ha sido fundamental para el desarrollo de nuevas propuestas terapéuticas orientadas a restablecer el equilibrio binocular y no solo a mejorar la visión monocular.

2.1.2 Plasticidad visual y visión binocular

El desarrollo de la visión binocular normal depende de la recepción equilibrada de estímulos por ambos ojos y de su adecuada integración en la corteza visual. Cuando existe estrabismo, anisometropía u otra condición que interfiera con esta experiencia visual, el cerebro tiende a suprimir la información proveniente del ojo con menor calidad perceptiva, favoreciendo la dominancia del ojo contralateral. Esta supresión interocular constituye uno de los mecanismos fisiopatológicos más importantes de la ambliopía y explica gran parte del deterioro en la binocularidad y en la percepción de profundidad que presentan estos pacientes ((Hess & Thompson, 2015; Levi et al., 2015).

Durante varios años predominó la idea de que la plasticidad del sistema visual se restringía al periodo crítico del desarrollo. Sin embargo, distintos estudios han demostrado que existe plasticidad residual incluso en etapas posteriores de la vida, incluyendo adolescencia y adultez, lo que ha ampliado las posibilidades de intervención terapéutica en grupos etarios que antes se consideraban con limitada capacidad de recuperación (Levi et al., 2020; Levi et al., 2015). Aunque la respuesta al tratamiento suele ser mayor en población pediátrica, esta evidencia ha impulsado el diseño de intervenciones dirigidas a estimular nuevamente la cooperación binocular mediante tareas visuales repetitivas, estructuradas y adaptadas a medios digitales.

En este sentido, la visión binocular ha pasado a ocupar un lugar central dentro del abordaje de la ambliopía. Más que obligar al ojo ambliope a trabajar de forma aislada, las nuevas estrategias terapéuticas buscan reducir la supresión, equilibrar el procesamiento visual entre ambos ojos y promover una integración funcional más estable. Este cambio conceptual ha favorecido el surgimiento de tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular activa (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022).

2.1.3 Tratamientos convencionales y limitaciones terapéuticas

El manejo convencional de la ambliopía se ha basado principalmente en la corrección óptica, la oclusión del ojo dominante y la penalización farmacológica. Estas estrategias han demostrado utilidad clínica, especialmente en niños, y continúan siendo parte del tratamiento habitual en muchos contextos asistenciales (Wallace et al., 2018). No obstante, también presentan limitaciones importantes. Entre ellas se encuentran la baja adherencia, el rechazo al parche, el impacto emocional y social en población pediátrica y la persistencia de alteraciones binoculares aun cuando se logra una mejoría en la agudeza visual ((Wallace et al., 2018; Hess & Thompson, 2015).

Una de las principales críticas a estas terapias es que se centran en estimular el ojo ambliope de manera monocular, sin intervenir de forma directa la supresión interocular ni el déficit binocular subyacente. Por ello, aunque muchos pacientes mejoran en términos de agudeza visual, no siempre recuperan de forma satisfactoria la estereopsis o la coordinación binocular. Esta limitación ha dado paso al interés por terapias que aborden el problema desde una lógica binocular más acorde con la fisiopatología actual del trastorno (Hess & Thompson, 2015; Levi et al., 2015).

Además, la efectividad de los tratamientos convencionales suele depender en gran medida de la adherencia. En niños, por ejemplo, la constancia terapéutica puede verse afectada por factores familiares, escolares y emocionales, lo que reduce el impacto clínico esperado. En consecuencia, la búsqueda de herramientas más atractivas, dinámicas y personalizables ha cobrado fuerza en la última década, especialmente mediante plataformas digitales y entornos inmersivos diseñados para mejorar la participación del paciente en el proceso de rehabilitación visual (Rodán et al., 2022; Holmes et al., 2016).

2.1.4 Entrenamiento dicóptico digital

El entrenamiento dicóptico digital es una estrategia terapéutica basada en la presentación simultánea de estímulos diferentes para cada ojo, con el fin de obligar al sistema visual a integrar ambas entradas y reducir la supresión interocular. En este enfoque, el ojo dominante suele recibir estímulos con menor contraste, mientras que el ojo ambliope recibe una señal visual reforzada, buscando así restablecer el equilibrio binocular durante la tarea visual (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022).

Este tipo de tratamiento ha sido implementado mediante videojuegos terapéuticos, aplicaciones digitales y películas con contraste rebalanceado. Su principal ventaja radica en que transforma la terapia en una actividad más interactiva y motivadora, lo que puede favorecer la adherencia, especialmente en población pediátrica. La literatura reporta que estas modalidades han mostrado mejorías en la agudeza visual, en la función binocular y, en algunos casos, en la estereopsis, aunque con resultados variables según el protocolo aplicado, la frecuencia de uso y las características clínicas de los pacientes (Birch et al., 2019; Rodán et al., 2022; Holmes et al., 2016; Jost et al., 2022).

Los ensayos clínicos y revisiones más recientes muestran que el entrenamiento dicóptico digital constituye una alternativa prometedora frente a los tratamientos exclusivamente monoculares. Estudios con videojuegos binoculares y terapéuticas digitales han documentado beneficios clínicos en niños con ambliopía, así como una aceptabilidad superior frente a métodos tradicionales en determinados contextos (Holmes et al., 2016; Xiao et al., 2022). No obstante, también se ha observado que la respuesta terapéutica no es uniforme en todos los pacientes y que algunos estudios no encuentran diferencias clínicamente superiores respecto a la oclusión convencional, lo que sugiere la necesidad de interpretar sus resultados con cautela y dentro de cada contexto metodológico (Holmes et al., 2016; Kelly et al., 2019).

A pesar de ello, el entrenamiento dicóptico digital representa un avance relevante porque se fundamenta en la comprensión binocular de la ambliopía y permite adaptar la intervención a diferentes plataformas y necesidades clínicas. Su carácter gamificado, domiciliario y personalizable lo convierte en una herramienta de alto interés dentro de la rehabilitación visual contemporánea (Rodán et al., 2022; Jost et al., 2022; Xiao et al., 2022).

2.1.5 Aprendizaje perceptual y entrenamiento digital

Dentro del desarrollo de tratamientos tecnológicos para la ambliopía, el aprendizaje perceptual ha ocupado un papel importante como base teórica y práctica para muchas de las intervenciones actuales. Este enfoque consiste en la repetición sistemática de tareas visuales orientadas a mejorar funciones específicas como la discriminación espacial, la sensibilidad al contraste y la detección de estímulos bajo condiciones controladas. Diversas investigaciones han mostrado que este tipo de entrenamiento puede generar cambios funcionales medibles tanto en niños como en adultos, lo que respalda la existencia de plasticidad visual residual incluso fuera del periodo crítico clásico (Levi & Li, 2009; Hou et al., 2022; Levi et al., 2015; Hou et al., 2024).

El aprendizaje perceptual ha sido particularmente relevante porque ayudó a cuestionar la idea de que la ambliopía en adultos era clínicamente irreversible. A partir de estos hallazgos, surgieron nuevas propuestas terapéuticas que integran tareas perceptuales dentro de plataformas digitales más complejas, como videojuegos dicópticos y sistemas interactivos de entrenamiento binocular. De esta manera, el aprendizaje perceptual no solo aporta evidencia sobre la capacidad de reorganización visual, sino que también sirve como sustento para el diseño de intervenciones más modernas y funcionales (Levi & Li, 2009; Levi et al., 2015; Rodán et al., 2022).

Sin embargo, los resultados del aprendizaje perceptual también han mostrado heterogeneidad. La magnitud de la mejoría puede variar según la tarea utilizada, la duración del

entrenamiento, la frecuencia de exposición y el perfil clínico del paciente. Por esta razón, aunque constituye una línea de tratamiento relevante, su valoración debe realizarse de forma crítica y en articulación con otras modalidades terapéuticas emergentes basadas en estimulación binocular (Rodán et al., 2022; Hou et al., 2024).

2.1.6 Realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía

La realidad virtual inmersiva ha emergido como una herramienta innovadora dentro del campo de la rehabilitación visual. Su interés clínico radica en la posibilidad de crear entornos tridimensionales interactivos en los que cada ojo recibe estímulos diferenciados bajo un alto nivel de control espacial y sensorial. Esto permite desarrollar tareas de estimulación binocular más dinámicas, envolventes y potencialmente más motivadoras para el paciente, lo que puede favorecer su participación activa en el tratamiento (Shao et al., 2023; Leal-Vega et al., 2024).

A diferencia de otras plataformas digitales, la realidad virtual ofrece mayor control sobre parámetros como profundidad, contraste, atención visual y coordinación sensoriomotora. Estas características la convierten en una herramienta atractiva para trabajar no solo la agudeza visual, sino también la binocularidad y la estereopsis dentro de escenarios más cercanos a experiencias visuales funcionales. Los estudios disponibles muestran resultados promisorios en población pediátrica y adulta, con reportes de mejoría en agudeza visual y visión binocular, además de buena aceptación clínica (Leal-Vega et al., 2024).

No obstante, la evidencia todavía presenta limitaciones asociadas con la diversidad de dispositivos, la falta de protocolos uniformes y el tamaño reducido de algunas muestras. También deben considerarse factores técnicos como la ergonomía del visor, la calibración de estímulos y la posibilidad de fatiga visual en algunos usuarios. Aun así, la realidad virtual inmersiva se consolida como una de las tecnologías más prometedoras para el tratamiento contemporáneo de la ambliopía,

especialmente cuando se combina con principios de estimulación dicóptica y tareas visuales estructuradas (Leal-Vega et al., 2024; Shao et al., 2023).

2.1.6. Efectividad clínica de las tecnologías emergentes

La efectividad de los tratamientos tecnológicos emergentes en ambliopía no debe analizarse únicamente en términos de agudeza visual. También es necesario considerar variables como la estereopsis, la sensibilidad al contraste, la reducción de la supresión interocular, la adherencia terapéutica y la experiencia del paciente durante la intervención. Esta mirada más integral es coherente con la comprensión actual de la ambliopía como un trastorno binocular y funcionalmente complejo (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022; Levi et al., 2015).

La evidencia acumulada en los últimos años sugiere que tanto el entrenamiento dicóptico digital como la realidad virtual inmersiva pueden producir mejorías clínicamente relevantes, aunque la magnitud de los resultados varía entre estudios. En población pediátrica se han reportado mejorías consistentes en agudeza visual y, en algunos casos, avances en estereopsis comparables a los observados con oclusión. En adultos, aunque los cambios suelen ser de menor magnitud, también se han descrito respuestas favorables, lo que respalda la posibilidad de intervención más allá de la infancia (Holmes et al., 2016; Leal-Vega et al., 2024; Levi et al., 2015).

Sin embargo, la literatura también muestra que los resultados dependen de múltiples factores, entre ellos la edad, el tipo de ambliopía, la intensidad del tratamiento, el tiempo de seguimiento, la plataforma utilizada y el grado de adherencia. Esta heterogeneidad limita la posibilidad de establecer conclusiones definitivas y explica por qué aún no existe consenso absoluto sobre el reemplazo de las terapias convencionales por tecnologías emergentes. Más bien,

estas estrategias deben entenderse como herramientas complementarias o alternativas prometedoras dentro de un abordaje clínico integral (Rodán et al., 2022; Shao et al., 2023).

2.1.7 Pertinencia de una revisión exploratoria

Dado el crecimiento acelerado de la investigación sobre terapias digitales y realidad virtual aplicadas a la ambliopía, una revisión exploratoria resulta pertinente para organizar la evidencia y analizarla de manera estructurada. Este tipo de revisión permite identificar qué tecnologías han sido más estudiadas, en qué grupos poblacionales, bajo qué protocolos y con qué resultados clínicos. Asimismo, facilita reconocer vacíos de conocimiento, limitaciones metodológicas y oportunidades para futuras investigaciones.

En el presente trabajo, la delimitación temporal entre 2015 y 2025 responde a un periodo caracterizado por el aumento en el desarrollo y evaluación de plataformas tecnológicas aplicadas a la rehabilitación visual. Durante estos años se ha fortalecido la producción científica sobre entrenamiento dicóptico digital, videojuegos terapéuticos, películas con contraste rebalanceado y realidad virtual inmersiva, lo que justifica su análisis comparativo dentro de una misma revisión (Rodán et al., 2022; Holmes et al., 2016; Birch et al., 2019).

En consecuencia, el marco teórico de esta investigación se sustenta en la idea de que la ambliopía debe entenderse como un trastorno visual con base binocular, cuya rehabilitación puede beneficiarse de intervenciones tecnológicas diseñadas para reducir la supresión interocular y favorecer la cooperación entre ambos ojos. Bajo esta perspectiva, el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva representan líneas terapéuticas emergentes con potencial clínico, cuya efectividad, alcances y limitaciones requieren ser examinados de manera crítica a partir de la evidencia científica disponible.

2.2 Marco conceptual

Ambliopía: es un trastorno del desarrollo visual caracterizado por una disminución de la agudeza visual que no puede explicarse por alteraciones estructurales oculares, sino por anomalías en el procesamiento cortical de la información visual. Se origina durante el periodo crítico del desarrollo como consecuencia de una experiencia visual anómala, como estrabismo, anisometropía o privación visual, y actualmente se reconoce como una condición de origen binocular, en la que existe un desequilibrio en la interacción entre ambos ojos, acompañado de supresión interocular y alteraciones en la integración sensorial. Además, se asocia a cambios funcionales y estructurales en la corteza visual, lo que evidencia su naturaleza como un trastorno del sistema visual central que afecta no solo la agudeza visual, sino también la función binocular y la estereopsis (Levi et al., 2020; Clavagnier & Hess, 2018; Li et al., 2015; Levi et al., 2015).

Plasticidad cortical: es la capacidad del sistema visual para reorganizarse, tanto en su funcionamiento como en su estructura, en respuesta a la experiencia sensorial. Este proceso adquiere especial importancia durante el periodo crítico del desarrollo visual, etapa en la que la estimulación adecuada resulta fundamental para la maduración de las vías visuales. Sin embargo, distintos estudios han mostrado que cierta plasticidad también se conserva en la edad adulta, lo que permite la aparición de cambios funcionales a partir de intervenciones específicas (Lagrèze & Löwel, 2015; Levi et al., 2015).

Supresión interocular: es un mecanismo por el cual el sistema visual bloquea o reduce de manera activa la información que proviene del ojo ambliope, con el propósito de evitar la diplopía y la confusión visual. Este fenómeno genera un desequilibrio en la participación de ambos ojos y se considera un elemento clave en la fisiopatología de la ambliopía, ya que compromete la función binocular (Hess & Thompson, 2015; Levi et al., 2015).

Visión binocular: es la capacidad del sistema visual para integrar de forma simultánea y coordinada la información que proviene de ambos ojos, permitiendo construir una sola percepción visual. Esta función resulta esencial para la percepción de profundidad y la estereopsis. En la ambliopía, la visión binocular se ve afectada por la supresión interocular y por el desequilibrio sensorial entre ambos ojos (Hess & Thompson, 2015; Thompson, 2019).

Tratamientos tradicionales: el manejo convencional de la ambliopía se basa en estrategias como la oclusión del ojo dominante y la penalización, las cuales buscan estimular el ojo ambliope. Aunque estas intervenciones han mostrado efectividad para mejorar la agudeza visual, también presentan limitaciones importantes, entre ellas las dificultades de adherencia, el impacto psicosocial en el paciente y la recuperación limitada de la función binocular (Wallace et al., 2018; Levi & Li, 2009).

Oclusión: es un método terapéutico convencional en el manejo de la ambliopía que consiste en cubrir el ojo dominante mediante un parche con el fin de forzar el uso del ojo ambliope y estimular su función visual. Este tratamiento se basa en el principio de plasticidad del sistema visual durante el desarrollo, promoviendo la mejora de la agudeza visual a través de la estimulación repetida del ojo afectado durante actividades visuales cercanas y de fijación. La eficacia de la oclusión depende de factores como la edad del paciente, la severidad de la ambliopía, el tiempo de uso diario y la adherencia al tratamiento, siendo generalmente más efectiva cuando se inicia en etapas tempranas. (Wallace et al., 2018; Levi & Li, 2009).

Penalización: es una estrategia terapéutica alternativa a la oclusión que consiste en reducir intencionalmente la calidad visual del ojo dominante, generalmente mediante el uso de lentes con desenfoque óptico o agentes farmacológicos como atropina, con el fin de favorecer el uso del ojo ambliope. Este método busca estimular la función visual sin necesidad de ocluir completamente el ojo dominante, lo que puede mejorar la tolerancia al tratamiento; sin embargo, al igual que la

oclusión, su efecto se centra principalmente en la mejora monocular, con limitada influencia sobre la restauración de la función binocular (Wallace et al., 2018; Levi & Li, 2009).

Estimulación binocular: es un enfoque terapéutico que busca recuperar la interacción funcional entre ambos ojos mediante la presentación simultánea de estímulos visuales diferenciados. Su propósito es disminuir la supresión interocular y favorecer la cooperación binocular, por lo que aborda la ambliopía desde una perspectiva funcional y no únicamente monocular (Hess & Thompson, 2015; Rodán et al., 2022)

Entrenamiento dicóptico digital: es una estrategia terapéutica basada en la estimulación binocular que consiste en la presentación de estímulos visuales diferentes a cada ojo, generalmente mediante la modulación del contraste, con el fin de favorecer la participación del ojo ambliope y reducir la supresión interocular. Este enfoque permite equilibrar la entrada sensorial entre ambos ojos y promover la cooperación binocular, actuando directamente sobre uno de los principales mecanismos fisiopatológicos de la ambliopía. Se implementa comúnmente mediante videojuegos o aplicaciones digitales, lo que facilita un entrenamiento interactivo, adaptable y con potencial para mejorar la adherencia, contribuyendo a la mejora de la agudeza visual, la función binocular y la estereopsis (Hess & Thompson, 2015; Holmes et al., 2016; Kelly et al., 2019; Xiao et al., 2022).

Realidad virtual inmersiva: es una tecnología que permite la creación de entornos tridimensionales interactivos en los que se pueden controlar de manera precisa los estímulos visuales presentados a cada ojo, facilitando la estimulación binocular en condiciones altamente controladas. En el tratamiento de la ambliopía, esta herramienta permite modular variables como el contraste, la disparidad binocular y la profundidad, favoreciendo la activación simultánea de ambos ojos en tareas visuales dinámicas. Su carácter inmersivo incrementa la participación activa del paciente y puede mejorar la adherencia terapéutica, especialmente en población pediátrica, además de mostrar resultados prometedores en la mejora de la agudeza visual y la función

binocular, aunque su implementación aún presenta desafíos en cuanto a estandarización y acceso (Leal-Vega et al., 2024; Molina-Martín et al., 2023; Shao et al., 2023)

Adherencia terapéutica: es el grado en que el paciente sigue las indicaciones del tratamiento en aspectos como la frecuencia, la duración y la intensidad. En el caso de la ambliopía, este factor resulta fundamental para lograr resultados clínicos satisfactorios y puede verse influido tanto por las características de la intervención como por la motivación del paciente (Birch et al., 2019; Kelly et al., 2019).

Efectividad terapéutica: es la capacidad de una intervención para generar mejoras clínicamente relevantes en condiciones reales de aplicación. En la ambliopía, suele valorarse a partir de los cambios observados en la agudeza visual, la función binocular y la estereopsis después de implementar distintas estrategias terapéuticas (Holmes et al., 2016; Wygnanski-Jaffe et al., 2023)

Estereopsis: es la capacidad de percibir profundidad a partir de las pequeñas diferencias entre las imágenes que capta cada ojo. Esta función constituye un componente esencial de la visión binocular y un indicador importante de la recuperación funcional en pacientes con ambliopía ((Levi et al., 2015; Shao et al., 2023).

Agudeza visual (LogMAR): es una medida de la capacidad del sistema visual para distinguir detalles finos. En investigación clínica, suele expresarse en escala LogMAR debido a su mayor precisión y a su sensibilidad para detectar cambios. En la ambliopía, este parámetro se considera uno de los principales indicadores para evaluar la respuesta al tratamiento (Holmes et al., 2016; Kelly et al., 2019).

2.3 Marco legal

En Colombia, la investigación científica en el ámbito de la salud está regida por un conjunto de normativas que garantizan la ética, la calidad, la protección de la información y el respeto por los derechos de autor, además de promover la innovación y el desarrollo del conocimiento (Ley 23 de 1982; Ley 1286 de 2009).

El marco legal que sustenta esta área se compone de diversas leyes, entre las cuales se destacan:

Ley 23 de 1982: Esta legislación establece disposiciones relacionadas con los derechos de autor en Colombia, incluyendo principios éticos sobre la publicación y difusión de resultados en el contexto de la investigación científica. En este sentido, el cumplimiento de normas éticas implica la adecuada citación de la literatura, el respeto por los derechos de autor y la presentación clara y honesta de los hallazgos (Ley 23 de 1982).

Ley 1286 de 2009: Esta norma regula el desarrollo de la ciencia, la tecnología y la innovación en Colombia, estableciendo lineamientos para la producción y divulgación del conocimiento. Asimismo, fortalece el marco institucional de la investigación y promueve el respeto por la propiedad intelectual (Ley 1286 de 2009).

3. Métodos

El trabajo de grado titulado “Efectividad de tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular para el manejo de la ambliopía entre 2015 y 2025: revisión exploratoria comparativa del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva entre población pediátrica y adulta” se encuentra enmarcado en el área de Investigación de la Facultad de Optometría de la Universidad Santo Tomás, “Cuidado primario de la salud visual y ocular desde el desarrollo de la Optometría basada en la evidencia” y en la línea de investigación 3, debido a

que se documentó el resultado de la aplicación de dos tratamientos para la ambliopía y aborda desde la consulta de optometría el desempeño visual posterior a la intervención, teniendo en cuenta lo publicado en la literatura en los últimos 10 años.

Se realizó un estudio secundario de carácter cualitativo, correspondiente a una revisión exploratoria de la literatura científica. Este diseño fue seleccionado debido a la naturaleza emergente de las tecnologías analizadas y a la diversidad de metodologías, poblaciones y protocolos reportados en los estudios disponibles.

La revisión exploratoria permitió recopilar, organizar y describir la evidencia existente sin restringirse a un único diseño de estudio, facilitando la identificación de tendencias, patrones de efectividad clínica y vacíos de conocimiento relacionados con el uso de tecnologías basadas en estimulación binocular en el tratamiento de la ambliopía.

Tabla 1. Descripción de los componentes PICO

Componente	Aplicación en la presente investigación
P (Población)	Pacientes con diagnóstico de ambliopía publicados entre 2015 y 2025, clasificados en población pediátrica (<18 años) y adulta (≥18 años).
I (Intervención)	Tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular: entrenamiento dicóptico digital y realidad virtual inmersiva.
C (Comparación)	Comparación entre población pediátrica y adulta.
O (Resultados)	Mejoría de agudeza visual (Δ LogMAR), cambios en estereopsis, supresión interocular, sensibilidad al contraste y tasa de éxito terapéutico.

3.1 Criterios de inclusión

Se incluyeron estudios que cumplieran con las siguientes condiciones:

- Publicación entre los años 2015 y 2025.
- Estudios realizados en población humana.

- Investigaciones que evaluaran tecnologías digitales o de realidad virtual con enfoque binocular para el tratamiento de la ambliopía.
- Diseños metodológicos como ensayos clínicos, estudios controlados, estudios piloto, investigaciones prospectivas y revisiones sistemáticas.
- Artículos que reportaran resultados clínicos relacionados con la función visual y/o binocular.

3.1 Criterios de exclusión

Fueron excluidos de la revisión los siguientes documentos:

- Estudios publicados fuera del período establecido.
- Investigaciones centradas exclusivamente en tratamientos monoculares tradicionales sin intervención binocular.
- Artículos que no presentarán información clara sobre autoría, año de publicación o metodología.
- Estudios experimentales en animales o investigaciones in vitro.
- Documentos sin acceso a texto completo.
- Estudios que no alcanzaron un nivel adecuado de calidad metodológica según la evaluación mediante listas de chequeo del Joanna Briggs Institute (JBI).

3.2 Variables

Las variables consideradas en el siguiente estudio se exponen a continuación (ver tablas)

Tabla 2. Operacionalización de las variables

Objetivo	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Naturaleza	Escala
Caracterizar estudios	Año de publicación	Fecha de divulgación	Registro del año reportado en cada artículo (2015–2025).	Cualitativa	Ordinal
Caracterizar estudios	País de realización	Lugar de la investigación	País según afiliación institucional o metodología.	Cualitativa	Nominal politómica
Caracterizar estudios	Idioma de publicación	Lengua del artículo	Idioma original del artículo.	Cualitativa	Nominal politómica
Caracterizar estudios	Tipo de estudio	Diseño metodológico	Clasificación según lo descrito por los autores.	Cualitativa	Nominal politómica
Caracterizar estudios	Tamaño de muestra	Número de participantes	Total, reportado por estudio.	Cuantitativa	Razón
Resultados clínicos	Grupo etario	Clasificación por desarrollo	Pediátrico (<18) o adulto (≥ 18).	Cualitativa	Nominal dicotómica
Resultados clínicos	Mejoría de agudeza visual	Cambio visual	Registro basal y final (Δ LogMAR).	Cuantitativa	Razón
Resultados clínicos	Esteropsis	Percepción binocular	Valores pre y post intervención.	Cuantitativa	Razón
Resultados clínicos	Supresión interocular	Inhibición binocular	Reducción/eliminación/persistencia.	Cualitativa/ Cuantitativa	Nominal dicotómica o Razón
Resultados clínicos	Sensibilidad al contraste	Discriminación luminancia	Valores antes y después.	Cuantitativa	Razón
Resultados clínicos	Tasa de éxito terapéutico	Mejoría significativa	% de participantes con éxito.	Cuantitativa	Razón (%)
Intervención	Tipo de intervención	Modalidad binocular	Dicóptico digital o realidad virtual.	Cualitativa	Nominal dicotómica
Intervención	Plataforma tecnológica	Dispositivo/software	Hardware o software usado.	Cualitativa	Nominal politómica
Intervención	Duración del tratamiento	Periodo aplicación	Semanas o meses.	Cuantitativa	Razón
Intervención	Frecuencia del entrenamiento	Intensidad	Sesiones por semana/minutos.	Cuantitativa	Razón

Objetivo	Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Naturaleza	Escala
Intervención	Adherencia terapéutica	Cumplimiento	% reportado.	Cuantitativa	Razón
Intervención	Tratamiento previo	Antecedente	Oclusión u otra terapia previa.	Cualitativa	Nominal dicotómica

3.3 Procedimiento

1. Se identificaron los términos de búsqueda:

Se realizó la consulta de la terminología en los descriptores de Ciencias de la Salud (DeCS)

Tabla 3. *Búsqueda de términos en tesoro DeCS*

DeCS español	DeCS inglés	Palabra clave (español)
Ambliopía	Amblyopia	ojo perezoso
Percepción binocular	Binocular Vision	estimulación binocular
Terapia visual	Vision Therapy	entrenamiento visual
Rehabilitación	Rehabilitation	rehabilitación visual
Realidad virtual	Virtual Reality	realidad virtual inmersiva
Videojuegos	Video Games	videojuegos terapéuticos
Modalidades terapéuticas	Therapeutics	tratamiento visual
Trastornos de la visión	Vision Disorders	alteraciones visuales

2. Formulación de ecuaciones de búsqueda:

Para la construcción de las ecuaciones de búsqueda se emplearon operadores booleanos AND y OR, con el fin de estructurar combinaciones estratégicas entre descriptores controlados y términos libres identificados en el tesoro DeCS y en la literatura científica. El operador OR se utilizó para agrupar términos sinónimos o relacionados conceptualmente, mientras que el operador AND permitió integrar los distintos componentes de la pregunta de investigación, asegurando la recuperación de estudios que incluyeran simultáneamente la condición, la intervención tecnológica

y el enfoque terapéutico, con el propósito de ampliar la sensibilidad y especificidad de la búsqueda en bases de datos internacionales.

Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda empleadas en la revisión

Ecuación en inglés	Ecuación en español
(Amblyopia OR "lazy eye") AND (binocular OR dichoptic) AND ("virtual reality" OR immersive OR digital OR videogame*) AND (treatment OR therapy OR rehabilitation).	(Ambliopía OR "ojo perezoso") AND (binocular OR Dicóptico) AND ("realidad virtual" OR inmersiva OR digital OR videojuego*) AND (tratamiento OR terapia OR rehabilitación).
dichoptic AND (therapy OR treatment OR training) AND "Virtual Reality" AND Amblyopia OR "Lazy Eye"	dicóptico AND (terapia OR tratamiento OR entrenamiento) AND "Realidad Virtual" AND Ambliopía OR "Ojo Perezoso"

3. Identificación del cumplimiento de los criterios establecidos:

Revisión de publicaciones entre 2015 y 2025 completos, evaluación de entrenamiento dicóptico digital y/o realidad virtual inmersiva en pacientes con ambliopía, y reporte de resultados clínicos que incluyeran edades pediátricas o adultos. Se excluyeron estudios que no abordaran estas intervenciones o que no presentaran resultados medibles.

4. Búsqueda de información:

La exploración bibliográfica se llevó a cabo en bases de datos científicas especializadas, entre ellas, Scopus, ScienceDirect, ACM digital library, Consensus, IEEE Xplore, Lens.org, Springernature, Taylor & Francis, Clarivate. revistas como: American academy of ophtalmology, Jaapos, Journal of vision, Brain sciences, Scientific reports, Austin Journal of clinical ophtalmology, BioMed central, Slack Journal complementándose con búsquedas manuales en Google Scholar. Para la recuperación de los estudios se emplearon combinaciones de palabras clave relacionadas con ambliopía, tratamiento binocular, entrenamiento dicóptico y realidad virtual, utilizando operadores booleanos para optimizar los resultados.

Los artículos seleccionados fueron revisados inicialmente por título y resumen, y posteriormente evaluados mediante lectura completa para confirmar su elegibilidad. La

información relevante de cada estudio fue organizada en una matriz de extracción diseñada específicamente para esta revisión.

5. Proceso de selección:

Revisión sistemática de títulos y resúmenes obtenidos en las bases de datos, seguida de la lectura a texto completo de los estudios potencialmente elegibles. Se verificó el cumplimiento de los criterios de inclusión establecidos: publicaciones entre 2015 y 2025, realizadas en población infantil y adulta con diagnóstico de ambliopía, que evaluarán tecnologías digitales o de realidad virtual con enfoque binocular. Solo los estudios que cumplieron con estos requisitos fueron incluidos en la fase de análisis.

6. Evaluación de la calidad de la información:

La calidad de la información se valoró mediante la revisión del diseño metodológico, la claridad en la descripción de la intervención y la consistencia en el reporte de los resultados clínicos relacionados con la función visual y/o binocular. Se comprobó que cada estudio presentará información completa sobre autoría, año de publicación, metodología y resultados, garantizando la pertinencia y coherencia con los objetivos de la investigación.

7. Extracción y sistematización de la información:

Se diseñó una matriz de registro en hoja de cálculo, estructurada conforme a los objetivos de la investigación. En dicha matriz se organizaron los siguientes elementos de cada estudio seleccionado: título, año de publicación, autores, objetivo, conclusiones, variables evaluadas, criterios de inclusión y exclusión, y tipo de estudio. Esta sistematización permitió la construcción de tablas de síntesis y facilitó el análisis comparativo entre población pediátrica y adulta en relación con las intervenciones de entrenamiento dicóptico digital y realidad virtual inmersiva.

3.4 Plan de análisis

Para cada estudio incluido se realizó un análisis descriptivo de las variables bibliométricas, características poblacionales, tipo de intervención tecnológica y resultados clínicos reportados. La información fue organizada en tablas comparativas que permitieron identificar similitudes y diferencias entre población pediátrica y adulta en relación con el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva. Asimismo, se examinó la claridad metodológica, el diseño del estudio y la coherencia entre objetivos, intervención y resultados, con el fin de valorar la consistencia y pertinencia de la evidencia disponible para el análisis comparativo.

3.5 Evaluación de sesgos

La presente revisión exploratoria puede estar sujeta a sesgo de publicación, dado que los estudios con resultados positivos tienden a publicarse con mayor frecuencia que aquellos con resultados no significativos. Asimismo, la delimitación temporal entre 2015 y 2025, aunque permite analizar intervenciones tecnológicas recientes y metodológicamente más actualizadas, podría excluir investigaciones previas relevantes.

De igual manera, la inclusión exclusiva de artículos con acceso a texto completo puede generar sesgo de selección, al limitar la revisión a estudios disponibles en su totalidad. Para mitigar estas posibles fuentes de sesgo, se verificó la claridad metodológica, la coherencia entre objetivos y resultados, y la consistencia en el reporte de la intervención y los desenlaces clínicos en cada estudio incluido.

3.6 Consideraciones éticas

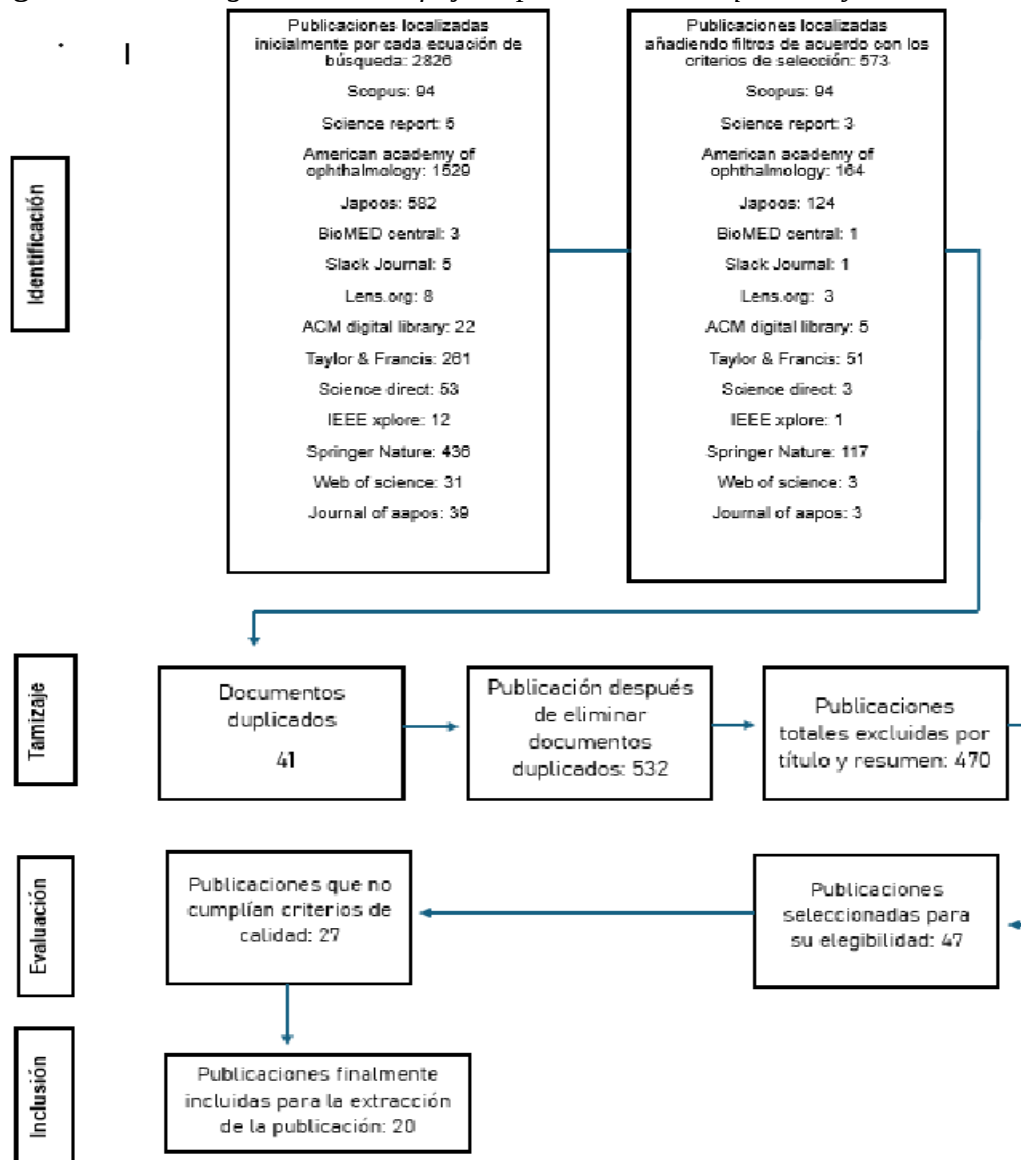
La presente revisión exploratoria puede estar sujeta a sesgo de publicación, dado que los estudios con resultados positivos tienden a publicarse con mayor frecuencia que aquellos con resultados no significativos. Asimismo, la delimitación temporal entre 2015 y 2025, aunque

permite analizar intervenciones tecnológicas recientes y metodológicamente más actualizadas, podría excluir investigaciones previas relevantes.

De igual manera, la inclusión exclusiva de artículos con acceso a texto completo puede generar sesgo de selección, al limitar la revisión a estudios disponibles en su totalidad. Para mitigar estas posibles fuentes de sesgo, se verificó la claridad metodológica, la coherencia entre objetivos y resultados, y la consistencia en el reporte de la intervención y los desenlaces clínicos en cada estudio incluido.

4. Resultados

Las estrategias de búsqueda permitieron identificar 2826 registros en diferentes bases de datos científicas, incluyendo Scopus (119), American Academy of Ophthalmology (1529), Japooos (582), Taylor & Francis (261), Springer Nature (436), Science Direct (53), IEEE Xplore (12), Web of Science (31) y Journal of AAPOS (39), entre otras fuentes de datos. Luego de aplicar filtros afines con los criterios de selección determinados, el número de publicaciones se redujo a 573 registros. Posteriormente se identificaron 41 documentos duplicados, obteniéndose 532 publicaciones únicas. Durante el proceso de tamizaje mediante revisión de títulos y resúmenes se excluyeron 470 estudios, seleccionándose 47 artículos para evaluación a texto completo. Después de emplear la evaluación de calidad metodológica mediante la lista de chequeo del Joanna Briggs Institute (JBI), 27 publicaciones fueron destituidas por no cumplir criterios de calidad, quedando finalmente 20 estudios incluidos para la síntesis de resultados. El proceso completo de selección de artículos se presenta en el diagrama de flujo correspondiente.

Figura 1. Diagrama de flujo para la búsqueda y selección de estudios.

Las exploraciones existentes sobre el uso de terapias dicópticas y sistemas basados en realidad virtual para el tratamiento de la ambliopía está compuesto por un total de 20 publicaciones, comprendidas entre 2015 y 2025, de las cuales la mayoría fueron publicadas a partir del año 2018, lo que demuestra que en los últimos años ha incrementado el interés por el desarrollo de estrategias terapéuticas innovadores en el manejo de esta condición visual.

Las características bibliométricas de los estudios incluidos demuestran una predilección por el idioma inglés, investigaciones desarrolladas en Estados Unidos y Europa, con contribuciones adicionales desde Asia y Latinoamérica. Con respecto al diseño metodológico, predominan los estudios experimentales, principalmente ensayos clínicos aleatorizados y estudios cuasi-experimentales orientados a valorar la eficacia de intervenciones dicópticas y sistemas basados en realidad virtual para el tratamiento de la ambliopía.

Tabla 5. Descripción de las características bibliométricas

Autores	Año	País	Idioma	Diseño	Tipo de estudio
Vedamurthy I. et al.	2015	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Estudio piloto experimental (terapia dicóptica mediante realidad virtual en adultos).
Ziak P. et al.	2017	República Checa	Inglés	Experimental	Estudio experimental de terapia dicóptica con realidad virtual en adultos.
Rodríguez-Vallejo M. et al.	2019	España	Inglés	Prospectivo	Estudio piloto experimental en niños con ambliopía anisométrica.
Mazzilli E. et al.	2021	Italia	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio piloto de entrenamiento visual mediante realidad virtual.
Vera-Díaz F. A. et al.	2019	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado comparando parche y estimulación dicóptica con VR.
Herbison N. et al.	2016	Reino Unido	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado utilizando el sistema I-BiT.
Vedamurthy I. et al.	2016	Estados Unidos	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de entrenamiento dicóptico en entorno de realidad virtual.
Wyganski-Jaffe T. et al.	2022	Israel	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado multicéntrico de terapia dicóptica domiciliaria.
Kelly K. R. et al.	2020	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado de terapéutica digital dicóptica.
Kelly K. R. et al.	2018	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado de películas dicópticas vs oclusión.
Singh A. et al.	2021	India	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado comparando terapia dicóptica y oclusión.
Vedamurthy I. et al.	2015	Estados Unidos	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de entrenamiento dicóptico domiciliario en niños.
Ziak P. et al.	2017	República Checa	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de entrenamiento visual en realidad virtual en adultos.
Ayala M. et al.	2022	Argentina	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de plataforma digital dicóptica para ambliopía.

Autores	Año	País	Idioma	Diseño	Tipo de estudio
Vedamurthy I. et al.	2015	Estados Unidos	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de videojuego dicóptico para tratamiento de ambliopía en adultos.
Zhu W. et al.	2025	China	Inglés	Prospectivo	Estudio piloto clínico de terapia binocular gamificada.
Kelly K. R. et al.	2016	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado con videojuego binocular en iPad.
Holmes J. M. et al.	2019	Estados Unidos	Inglés	Experimental	Ensayo clínico aleatorizado multicéntrico del videojuego Dig Rush.
Meqdad Y. et al.	2022	Jordania	Inglés	Prospectivo	Estudio piloto prospectivo de tratamiento dicóptico con VR.
Vedamurthy I. et al.	2015	Estados Unidos	Inglés	Cuasi-experimental	Estudio de entrenamiento dicóptico en ambliopía estrábica.

4.1 Síntesis de resultados

La evidencia recopilada sobre el uso de terapias dicópticas y sistemas de entrenamiento visual basados en realidad virtual para el tratamiento de la ambliopía presente que estas intervenciones pueden producir mejorías en la agudeza visual del ojo ambliope, recuperación parcial de la función binocular e incremento en la estereopsis (Holmes et al., 2016; Wagnanski-Jaffe et al., 2023; Herbison et al., 2016; Kelly et al., 2018). En términos cuantitativos, estudios como los de Kelly et al., Holmes et al. y Singh et al. reportaron recuperación de aproximadamente una a tres líneas de agudeza visual, es decir mejoras cercanas a 0.10–0.30 LogMAR, así mismo el

incremento en la percepción estereoscópica valoradas mediante diferentes pruebas clínicas (Kelly et al., 2018; Kelly et al., 2016; Singh et al., 2021).

En relación con la población estudiada, se determinaron investigaciones desarrolladas tanto en pacientes pediátricos como en adultos, permitiendo determinar la eficacia de estas intervenciones en diferentes grupos etarios. Los estudios desarrollados en población pediátrica, principalmente en niños con edad comprendidas entre los 3 y 12 años, reportaron mejorías significativas en la agudeza visual y en la función binocular luego del uso de terapias dicópticas o programas de entrenamiento binocular, demostrando en algunos casos resultados similares al tratamiento convencional al emplear la oclusión (Wyganski-Jaffe et al., 2023; Herbison et al., 2016; Kelly et al., 2018).

Por su parte, las investigaciones realizadas en pacientes adultos también establecieron mejoras clínicamente significativas en la agudeza visual y en la estereopsis tras el empleo de intervenciones dicópticas y sistemas de realidad virtual (Molina-Martín et al., 2023; Vedamurthy et al., 2015; Ziak et al., 2017). Al comparar los resultados entre los dos grupos etarios, se apreció que las intervenciones basadas en estimulación dicóptica y realidad virtual produjeron mejoría en niños y adultos, no obstante, la dimensión de los resultados fue generalmente mayor en población pediátrica (Wyganski-Jaffe et al., 2023; Kelly et al., 2018; Singh et al., 2021). En los estudios desarrollados en niños se obtuvieron recuperaciones más consistentes en la agudeza visual del ojo ambliope, alcanzando en algunos casos hasta tres líneas de visión de mejoría, además de recuperación parcial de la función binocular y de la estereopsis (Wyganski-Jaffe et al., 2023; Kelly et al., 2016). En contraste, los estudios aplicados en pacientes adultos también comprobaron mejorías clínicas relevantes, aunque por lo general de menor magnitud (Vedamurthy et al., 2015; Ziak et al., 2017). Estos hallazgos indican que, aunque la mayor plasticidad neuronal durante el desarrollo favorece una respuesta terapéutica más marcada en niños, las terapias dicópticas y los

sistemas basados en realidad virtual también pueden inducir cambios funcionales importantes en el sistema visual adulto, lo que sugiere la presencia de plasticidad neuronal residual del sistema visual incluso fuera del periodo crítico del desarrollo (Molina-Martín et al., 2023; Ziak et al., 2017), ampliando las posibilidades terapéuticas para el tratamiento de la ambliopía en edades posteriores.

Tabla 6. Resultados clínicos

Autor	Población	n (participantes)	Intervención	Resultado en agudeza visual	Resultado en estereopsis
Vedamurthy et al.	Adultos	20	Entrenamiento dicóptico en realidad virtual	Mejora aproximada de 1–2 líneas de AV	Mejora en percepción binocular
Ziak et al.	Adultos	17	Terapia dicóptica mediante VR	Mejora significativa en AV	Mejora parcial en estereopsis
Rodríguez-Vallejo et al.	Niños	30	Entrenamiento visual con realidad virtual	Mejora de AV tras tratamiento	Mejora de función binocular
Mazzilli et al.	Niños	15	Entrenamiento VR inmersivo	Mejora de agudeza visual en ojo ambliope	Recuperación parcial de estereopsis
Vera-Díaz et al.	Niños	40	Estimulación dicóptica VR vs parche	Mejora comparable a oclusión	Mejora en binocularidad
Herbison et al.	Niños	75	Sistema I-BiT (videojuegos dicópticos)	Mejora de 1–2 líneas de AV	Mejora en función binocular
Vedamurthy et al.	Adultos	25	Entrenamiento dicóptico en VR	Mejora significativa de AV	Mejora en estereopsis
Wyganski-Jaffe et al.	Niños	34	Terapia dicóptica domiciliaria con seguimiento ocular	Mejora significativa de AV	Mejora binocular
Kelly et al.	Niños	20	Terapéutica digital dicóptica	Mejora de agudeza visual	Mejoras variables en estereopsis
Kelly et al.	Niños	25	Películas dicópticas	Mejora de 1–2 líneas de AV	Mejora en estereopsis
Singh et al.	Niños	60	Terapia dicóptica vs oclusión	Mejora significativa de AV	Mejora de función binocular
Vedamurthy et al.	Niños	30	Entrenamiento dicóptico domiciliario	Mejora de agudeza visual	Mejora binocular
Ziak et al.	Adultos	20	Entrenamiento VR	Mejora moderada de AV	Mejora parcial de estereopsis
Ayala et al.	Niños y adultos	56	Plataforma digital dicóptica	Mejora significativa de AV	Mejora en visión binocular
Vedamurthy et al.	Adultos	40	Videojuego dicóptico personalizado	Mejora de 1–2 líneas de AV	Recuperación parcial de estereopsis

Autor	Población	n (participantes)	Intervención	Resultado en agudeza visual	Resultado en estereopsis
Zhu et al.	Niños	138	Terapia binocular gamificada	Mejora de agudeza visual	Mejora binocular
Kelly et al.	Niños	30	Videojuego binocular en iPad	Mejora significativa de AV	Mejoría en función binocular
Holmes et al.	Niños	65	Videojuego Dig Rush	Mejora aproximada de 1–2 líneas de AV	Mejora variable
Meqdad et al.	Niños y adultos	12	Terapia dicóptica con VR	Mejora moderada de AV	Mejora binocular
Vedamurthy et al.	Niños	18	Entrenamiento dicóptico en ambliopía estrábica	Mejora significativa de AV	Mejora en estereopsis

5. Discusión

Teniendo en cuenta que el objetivo de la presente investigación es analizar la efectividad de las intervenciones basadas en estimulación dicóptica y realidad virtual en el tratamiento de la ambliopía, con especial énfasis en la comparación de los resultados entre población pediátrica y adulta. Considerando los hallazgos obtenidos, las dos estrategias terapéuticas demostraron ser efectivas en la recuperación de la agudeza visual, la función binocular y la estereopsis; sin embargo, se evidenciaron diferencias importantes en la magnitud y consistencia de la respuesta terapéutica entre los grupos etarios.

En general, los resultados indicaron mejoras en la agudeza visual del ojo ambliope de aproximadamente una a tres líneas (0.10–0.30 LogMAR), seguidas de recuperación parcial de la función binocular y mejoras en la estereopsis, coincidiendo con estudios previos que reportan beneficios clínicamente significativos tras la aplicación de terapias dicópticas y entrenamiento visual binocular para la ambliopía (Kelly et al., 2018; Herbison et al., 2016; Holmes et al., 2016).

Al contrastar los resultados entre grupos etarios, se identificó que la población pediátrica presentó una respuesta terapéutica más consistente y de mayor magnitud en comparación con los adultos. En los estudios realizados en niños se reportaron alcances de hasta tres líneas de agudeza

visual, así como un incremento más evidente de la función binocular (Kelly et al., 2018; Herbison et al., 2016; Holmes et al., 2016). Estos resultados son afines con el concepto de mayor plasticidad neuronal durante el desarrollo visual, lo cual facilita la reorganización cortical en respuesta a estímulos terapéuticos.

Por otra parte, en la población adulta también se observaron progresos clínicamente significativos, aunque generalmente de menor magnitud. Estudios como los de Vedamurthy et al., Ziak et al. y Meqdad et al. demuestran que es posible lograr recuperar en agudeza visual y estereopsis en adultos, lo que indica la existencia de plasticidad neuronal residual del sistema visual incluso fuera del periodo crítico (Vedamurthy et al., 2015; Ziak et al., 2017; Meqdad et al., 2022). No obstante, normalmente estos resultados son más variables y dependen principalmente de factores como la frecuencia en el tratamiento y la adherencia.

Sin embargo, algunos ensayos clínicos han reportado que los alcances obtenidos mediante la realidad virtual y terapia dicóptica no superan de manera significativa a los tratamientos convencionales, especialmente en población pediátrica. Como han reportado estudios multicéntricos, que en ciertas intervenciones basadas con videojuegos dicópticos no lograron diferencias clínicamente relevantes frente a la oclusión (Holmes et al., 2016). De igual manera, se ha señalado que la baja adherencia al tratamiento puede limitar los resultados esperados (Kelly et al., 2016; Birch et al., 2019). Así mismo, revisiones recientes recalcan que la evidencia sobre estas intervenciones sigue siendo diversa, debido a la variabilidad en los protocolos, el tiempo del tratamiento y las características de los estímulos visuales utilizados (Papageorgiou et al., 2019; Chan et al., 2023; Ai et al., 2023). A esto se suma la heterogeneidad en los equipos empleados, ya que los estudios seleccionados reportan el uso de diferentes plataformas tecnológicas, como dispositivos móviles tipo tablet, computadoras y sistemas de realidad virtual inmersiva con gafas especializadas. Estas diferencias tecnológicas pueden influir en la forma de presentación de los

estímulos, el nivel de inmersión y la adherencia al tratamiento. En este sentido, Hernández-Rodríguez et al. (2020) enfatizan que variables como el contraste, la frecuencia espacial y la complejidad del estímulo influyen directamente en la efectividad del entrenamiento visual, lo que puede explicar las diferencias encontradas entre estudios y entre grupos etarios.

En población adulta, se han descrito en ciertos estudios que las mejoras alcanzadas pueden ser discretas y requieren intervenciones más prolongadas para lograr cambios significativos ((Li et al., 2013; Hess et al., 2014). Esto sugiere que, aunque existe capacidad de recuperación visual en edades posteriores, esta es menor comparando con la población pediátrica y está sujeta a múltiples factores moduladores.

Desde un punto de vista comparativo, los hallazgos de esta revisión permiten afirmar que la edad es un factor determinante en la respuesta al tratamiento de la ambliopía. Mientras que en niños las intervenciones muestran resultados más robustos y consistentes, en adultos los efectos, aunque presentes, son más variables y de menor dimensión. No obstante, el hecho de que se evidencien mejorías en ambos grupos sugiere que estas estrategias mantienen utilidad clínica en diferentes rangos etarios.

En cuanto a las limitaciones, la diversidad de los estudios incluidos, la variabilidad en los diseños metodológicos y la falta de estandarización en las medidas de resultado, restringen la posibilidad de establecer conclusiones definitivas. Estos condicionamientos deben ser tenidos en cuenta al interpretar los hallazgos, tal como se recomienda en la literatura metodológica.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones se encaminen en comparar grupo etarios de forma directa, mediante ensayos clínicos controlados, así como en la organización de protocolos que permitan optimizar la efectividad del tratamiento de la ambliopía según la edad de cada paciente.

6. Conclusiones

La presente revisión exploratoria permitió reconocer que los tratamientos tecnológicos emergentes basados en estimulación binocular, especialmente el entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva, han mostrado resultados clínicos favorables en el abordaje de la ambliopía. En términos generales, la evidencia analizada mostró mejorías en la agudeza visual, la función binocular y la estereopsis, lo que respalda el interés creciente por estas estrategias dentro de la rehabilitación visual contemporánea.

Uno de los aspectos más relevantes que comprobó este estudio fue que la respuesta del tratamiento no se comporta de la misma forma en todos los grupos etarios, se evidenció resultados con mayor consistencia en la población pediátrica, y en algunos casos de mayor magnitud lo cual se puede relacionar la mayor plasticidad del sistema visual durante el desarrollo. No obstante, también se observó mejorías clínicamente significativas en adultos lo que permite comprender que la ambliopía no debe asumirse como una condición completamente irreversible después de la infancia, sino como un trastorno en el que aún se pueden lograr cambios funcionales mediante intervenciones adecuadas. Además, el valor de estas tecnologías no radica únicamente en su capacidad para mejorar agudeza visual, sino también en su posibilidad de abordar la ambliopía desde una perspectiva más coherente con su naturaleza binocular. Tanto el entrenamiento dicóptico digital como la realidad virtual inmersiva, buscan disminuir la supresión interocular, fortalecer la cooperación entre ambos ojos y favorecer una rehabilitación visual más integral. Aun así, los resultados deben interpretarse con prudencia ya que persiste una variabilidad importante entre los estudios en cuanto a los diseños metodológicos, las muestras, los protocolos de intervención, las plataformas utilizadas y los criterios de evaluación, por ello más que asumir estas estrategias como un reemplazo definitivo del tratamiento convencional, el documento permite comprenderlas como alternativas prometedoras y complementarias dentro del abordaje clínico de la ambliopía, teniendo

en cuenta que si efectividad no depende únicamente de la tecnología empleada sino también de factores como la adherencia terapéutica, edad del paciente y contexto familiar y entorno cotidiano del paciente.

Finalmente, esta revisión no solo permite sintetizar la evidencia disponible, sino también señalar la necesidad de continuar investigando el papel del entrenamiento dicóptico digital y la realidad virtual inmersiva en el tratamiento de la ambliopía. Los resultados encontrados muestran un campo en expansión, con aportes valiosos, pero todavía con vacíos importantes en cuanto a estandarización, comparación entre grupos etarios y definición de protocolos óptimos de aplicación. Por ello, el estudio no solo aporta una síntesis útil del conocimiento disponible, sino que también orienta futuras investigaciones hacia la necesidad de fortalecer la calidad metodológica de la evidencia y de precisar mejor las condiciones clínicas en las que estas tecnologías pueden ofrecer mayores beneficios.

Referencias

- Ai, S., Wang, X., Kim, J., Lee, J., Kim, H., Kim, J., et al. (2023). Virtual reality-based techniques for human exercises and health improvement: A systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), 3215.
- Birch, E. E., Jost, R. M., Cruz, A., et al. (2019). Binocular amblyopia treatment with contrast-rebalanced movies: Pilot results and feasibility. *Journal of AAPOS*, 23(4), 188–194.
- Birch, E. E., Li, S. L., Jost, R. M., Morale, S. E., De La Cruz, A., Stager, D., et al. (2015). Binocular iPad treatment for amblyopia. *JAMA Ophthalmology*, 133(11), 1228–1235.
- Bynocs. (2023). *Characteristics of stimuli and psychophysical requirements for amblyopia visual training*.
- Chan, H. S., Tang, Y. M., Do, C. W., Wong, H. H. Y., Hoare, J., Chen, Y. L., et al. (2023). Design and assessment of amblyopia, strabismus, and myopia treatment using virtual reality. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 228, 107234.
- Clavagnier, S., & Hess, R. F. (2018). Amblyopia: Cortical changes and the role of binocular interactions. *Current Opinion in Neurobiology*, 52, 110–117.
- Hernández-Rodríguez, M., Piñero, D. P., Ruiz-Fortes, P., et al. (2020). Vision therapy in amblyopia: Effects of contrast and spatial frequency. *Vision Research*, 170, 25–33.
- Herbison, N., Cobb, S., Gregson, R., Ash, I., Eastgate, R., Purdy, J., et al. (2016). Interactive binocular treatment (I-BiT) for amblyopia: A randomized clinical trial. *British Journal of Ophthalmology*, 100(11), 1391–1396.
- Hess, R. F., & Thompson, B. (2015). A binocular approach to the treatment of amblyopia: Evidence and implications. *Proceedings of the Royal Society B*, 282(1819), 20151673.
- Hess, R. F., Thompson, B., & Baker, D. H. (2014). Binocular vision in amblyopia: Structure, suppression and plasticity. *Trends in Neurosciences*, 37(9), 451–462.

- Holmes, J. M., Manh, V. M., Lazar, E. L., et al. (2016). Effect of a binocular iPad game vs part-time patching in children aged 5 to 12 years with amblyopia: Randomized clinical trial. *JAMA Ophthalmology*, 134(12), 1391–1400.
- Holmes, J. M., Manh, V. M., Lazar, E. L., Kraker, R. T., Wallace, D. K., Kulp, M. T., et al. (2016). Effect of a binocular iPad game vs patching for amblyopia. *Ophthalmology*, 123(4), 768–776.
- Holmes, J. M., et al. (2024). Binocular treatment for amblyopia: Systematic review. *Ophthalmology*, 131(2).
- Hou, C., Castaldi, E., Plank, T., et al. (2022). Perceptual learning with dichoptic attention tasks improves attentional modulation and reduces interocular suppression in amblyopia. *Scientific Reports*, 12, 13747.
- Hou, C., Nicholas, S. C., et al. (2024). Visual cortical function changes after perceptual learning in amblyopia: An fMRI case series. *Brain Sciences*, 14(11), 1148.
- Jost, R. M., Hudgins, L. A., Dao, L. M., et al. (2022). Streaming contrast-rebalanced dichoptic movies versus patching for amblyopia in children: Randomized clinical trial. *Scientific Reports*, 12, 4157.
- Kelly, K. R., Jost, R. M., Dao, L., Beauchamp, C. L., Leffler, J. N., & Birch, E. E. (2016). Binocular iPad game vs patching for amblyopia in children. *JAMA Ophthalmology*, 134(12), 1402–1408.
- Kelly, K. R., Jost, R. M., Wang, Y. Z., et al. (2018). Dichoptic movie viewing vs patching in amblyopia. *Ophthalmology*, 125(3), 139–148.
- Kelly, K. R., Jost, R. M., Dao, L., Beauchamp, C. L., & Birch, E. E. (2019). Home-based dichoptic therapy using iPad games for amblyopia: Randomized trials and adherence analysis. *Ophthalmology*, 126(6), 862–872.

Lagrèze, W. A., & Löwel, S. (2015). Visual development and plasticity. *Eye*, 29(2), 206–212.

Leal-Vega, L., Coco-Martín, M. B., Molina-Martín, A., et al. (2024). NEIVATECH pilot study: Immersive virtual reality training in older amblyopic children. *Scientific Reports*, 14, 28062.

Ley 23 de 1982. (1982). Por la cual se dictan normas sobre derechos de autor. Colombia.

Ley 1286 de 2009. (2009). Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990 y se fortalece el sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación en Colombia. Colombia.

Levi, D. M. (2020). Rethinking amblyopia. *Vision Research*, 176, 118–129.

Levi, D. M., & Li, R. W. (2009). Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia. *Vision Research*, 49(21), 2599–2610.

Levi, D. M., Knill, D. C., & Bavelier, D. (2015). Stereopsis and amblyopia: A mini-review. *Vision Research*, 114, 17–30.

Li, J., Thompson, B., Deng, D., Chan, L., Yu, M., & Hess, R. F. (2013). Dichoptic training enables the adult amblyopic brain to learn. *Current Biology*, 23(8), R308–R309.

Li, J., Thompson, B., Lam, C. S. Y., Deng, D., Chan, L. Y. C., Maehara, G., et al. (2017). Amblyopia treatment in adults with dichoptic training using Oculus Rift: Preliminary results. *BMC Ophthalmology*, 17, 105.

Li, Q., Zhai, L., Jiang, Y., Zhang, Y., Sun, Y., Wang, J., et al. (2015). Cortical thickness alterations in amblyopia: A structural MRI study. *NeuroImage: Clinical*, 7, 655–660.

Li, R. W., Klein, S. A., & Levi, D. M. (2013). Perceptual learning improves visual performance in adult amblyopia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(11), E1033–E1040.

- Li, T., Yu, G., He, M., Chen, X., & Chen, H. (2025). Systematic review and meta-analysis on perceptual learning and therapeutic videogames for adults with monocular amblyopia. *Ophthalmology and Therapy*, 14, 857–881.
- Manh, V. M., Dao, L., Kellerman, D., Borsting, E., Mitchell, G. L., et al. (2023). Visual performance in children with amblyopia after 6 weeks of home-based dichoptic training. *Journal of AAPOS*, 27(4), 176.e1–176.e6.
- Ming, X., et al. (2025). Systematic review and meta-analysis of perceptual learning and video game training for adults with amblyopia. *Ophthalmic Research*, 68(1), 1–12.
- Molina-Martín, A., Leal-Vega, L., & Piñero, D. P. (2023). Amblyopia treatment through immersive virtual reality: Preliminary experience. *Vision*, 7(4), 77.
- Papageorgiou, E., Asproudis, I., Maconachie, G., Evangelia, E., & Gottlob, I. (2019). The treatment of amblyopia: Current practice and emerging trends. *British Medical Bulletin*, 130(1), 93–103.
- Rajavi, Z., et al. (2021). Virtual reality game playing vs occlusion in pediatric amblyopia: Randomized clinical trial. *Journal of Pediatric Ophthalmology and Strabismus*, 58(5), 308–314.
- Rodán, A., Pérez, M. A., & Ortega, E. (2022). Perceptual learning, dichoptic training and videogames for amblyopia: A systematic review. *Journal of Optometry*, 15(1), 1–15.
- Shao, W., Wang, Y., & Li, Q. (2023). Effects of virtual reality interventions on amblyopia: Systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Psychiatry*, 14, 1184453.
- Singh, A., Sharma, P., Saxena, R., & Sinha, A. (2021). Dichoptic training versus occlusion therapy for amblyopia. *Indian Journal of Ophthalmology*, 69(2), 300–305.
- Thompson, B. (2019). Binocular treatment of amblyopia: From laboratory to clinic. *Eye*, 33(5), 657–663.

- Vedamurthy, I., Nahum, M., Huang, S. J., Zheng, F., Bayliss, J., Bavelier, D., et al. (2015). A dichoptic custom-made action video game as a treatment for adult amblyopia. *Vision Research*, 114, 173–187.
- Wallace, D. K., Repka, M. X., Lee, K. A., Melia, B. M., Christiansen, S. P., Morse, C. L., et al. (2018). Amblyopia preferred practice pattern®. *Ophthalmology*, 125(1), P105–P142.
- Wyganski-Jaffe, T., Kushner, B. J., Moshkovitz, A., & CureSight Pivotal Trial Group. (2023). Eye-tracking-based dichoptic home treatment: Multicenter randomized clinical trial. *Ophthalmology*, 130(7), 809–817.
- Xiao, S., Angjeli, E., Wu, H. C., et al. (2022). Randomized controlled trial of a dichoptic digital therapeutic for amblyopia. *Ophthalmology*, 129(1), 77–85.
- Yabanoğlu, D. (2025). Binocular approaches in amblyopia treatment: Systematic review of modern dichoptic strategies. *Clinical and Experimental Optometry*, 108(2).
- Zhu, W., Gu, S., Li, J., Lin, J., Hu, C., & Liu, R. (2025). Gamified binocular therapy for unilateral amblyopia in young children: A prospective pilot study. *JMIR Serious Games*, 13, e63384.
- Ziak, P., Holm, A., Halička, J., Mojžiš, P., & Piñero, D. P. (2017). Dichoptic training in virtual reality improves visual function in amblyopia. *BMC Ophthalmology*, 17, 105.