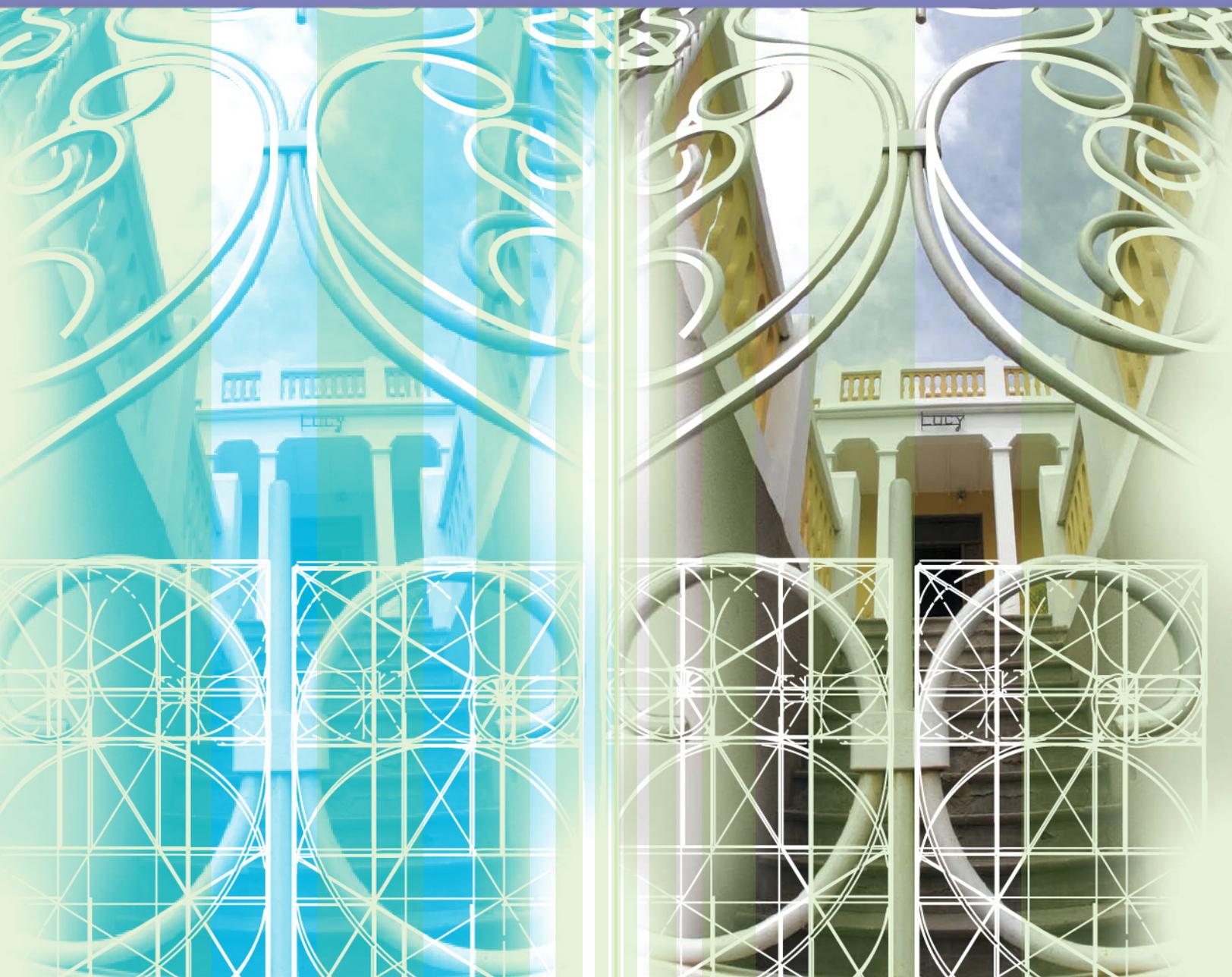




PERSPECTIVA

REVISTA ELECTRÓNICA CIENTÍFICA
División de Estudios para Graduados Facultad de Arquitectura y Diseño

**ARQUITECTURA: SU VIGENCIA. PATRIMONIO EDIFICADO.
ARTE. TECNOLOGIA E INFORMÁTICA**





RAYMUNDO PORTILLO

Arquitecto, Magister en Gerencia de empresas, Doctor en dirección de proyectos, Profesor de planta de la Universidad de Monterrey. Escuela de Arquitectura UDEM Mexico

Recepción: 28/04/2024 - Aprobación: 03/07/2024

TECNOLOGÍAS INMERSIVAS COMO HERRAMIENTA PARA EL DISEÑO ARQUITECTÓNICO: REVISIÓN DE LITERATURA

RESUMEN

Las tecnologías inmersivas son una propuesta digital que ofrece a los usuarios experimentar el espacio desde la virtualidad, con características sensibles como pueden ser el color, el sonido, la luz, la forma o la función, de allí, su uso práctico y sostenido en la arquitectura. El presente trabajo buscó profundizar en el conocimiento de la aplicación de las tecnologías inmersivas en el ejercicio del diseño arquitectónico realizando una revisión sistematizada de la literatura en trabajos de fechas recientes. Los resultados demuestran que el aumento progresivo de la producción científica y las citas convierten la virtualidad en tema prioritario para el estudio, pues está influyendo en diversos ámbitos del proceso creativo. Además, las realidades virtuales, aumentadas y mixtas son utilizadas para validar criterios de diseño, en relación con el usuario y sus necesidades, en diversas escalas de trabajo desde lo urbano, pasando a lo paisajístico, lo arquitectónico, el espacio interior y los elementos constructivos como techos, ventanas, y fachadas. Otros temas abordados desde la virtualización del objeto arquitectónico son la eficiencia energética, la luminosidad y el confort térmico, la acústica y la gestión del proyecto. Al centro de la experiencia, se encuentra la interacción de la persona en el entorno virtual con el modelo digital como medio para conocer y entender el diseño arquitectónico.

Palabras clave: tecnologías inmersivas, diseño arquitectónico, realidad virtual, realidad aumentada, realidades mixtas

IMMERSIVE TECHNOLOGIES AS A TOOL FOR ARCHITECTURAL DESIGN: LITERATURE REVIEW

ABSTRACT

Immersive technologies are a digital proposal that offers users to space experience from virtuality, with sensitive characteristics such as color, sound, light, form, or function; hence, its practical and sustained use in architecture. The present work sought to deepen the knowledge of the application of immersive technologies in the exercise of architectural design by carrying out a systematized review of the literature in recent works. Results show that the progressive increase in scientific production and citations on the topic make virtuality a priority topic for study, as it is influencing various areas of the creative process. Furthermore, virtual, augmented, and mixed realities are used to validate design criteria, in relation to the user and their needs, at various scales of work from the urban to the landscape, architectural, interior space, and construction elements such as roofs, windows and facades. Other topics addressed by the virtualization of the architectural object are energy efficiency, luminosity, thermal comfort, acoustics and project management. At the center of the experience is the interaction of the person in the virtual environment with the digital model to know and understand the architectural design.

Keywords: immersive technologies, architectural design, virtual reality, augmented reality, mixed realities

TECNOLOGIE IMMERSIVE COME STRUMENTO PER IL DISEGNO ARCHITETTONICO: REVISIONE DELLA LETTERATURA

RIASSUNTO

Le tecnologie immersive sono una proposta digitale che offre agli utenti un'esperienza virtuale dello spazio, con caratteristiche sensibili come il colore, il suono, la luce, la forma o la funzione da cui il loro uso pratico è sostenuto in architettura. Il presente lavoro ha cercato di approfondire la conoscenza dell'applicazione delle tecnologie immersive nella pratica della progettazione architettonica, effettuando una revisione sistematizzata della letteratura in opere recenti. I risultati mostrano che il progressivo aumento della produzione scientifica e delle citazioni rende la virtualità un argomento prioritario di studio, in quanto sta influenzando diverse aree del processo creativo. Inoltre, le realtà virtuali, aumentate e miste vengono utilizzate per convalidare i criteri di progettazione, in relazione all'utente e alle sue esigenze a varie scale di lavoro, da quella urbana a quella paesaggistica, a quella architettonica, a quella degli spazi interni e degli elementi costruttivi come tetti, finestre e facciate. Altri temi affrontati dalla virtualizzazione dell'oggetto architettonico sono l'efficienza energetica, la luminosità e il comfort termico, l'acustica e la gestione del progetto. Alla base dell'esperienza è l'interazione della persona nell'ambiente virtuale con il modello digitale come mezzo per conoscere e comprendere il progetto architettonico.

Parole Chiavi: tecnologie immersive, disegno architettonico, realtà virtuale, realtà aumentata, realtà miste

1. INTRODUCCIÓN

El abanico de posibilidades de uso de la tecnología en la arquitectura es extenso, no solo en lo referido a software y aplicaciones móviles, sino que incluso en equipos y hardware de novísima utilidad tanto en el diseño, como en la construcción; un ejemplo de eso es el uso de drones, sensores, detectores, infrarrojos, herramientas mecánicas y robóticas para actividades de manufacturas, la fabricación digital, y el diseño paramétrico, entre muchos otros.

Es por ello, que puede afirmarse que la tecnología es una de las cualidades más evidentes del hacer arquitectónico contemporáneo. Abordada desde diferentes

perspectivas como la ideación, el diseño, la representación y la construcción de edificios, la digitalización en la arquitectura ha permeado no solo en el modo de su hacer mediante el computador, sino también en la práctica como gestión para su materialización, su puesta en funcionamiento, e incluso la desaparición del edificio.

La encuesta realizada por la KPMG (2023) hace notar el avance progresivo de la tecnología en la construcción a nivel global, mencionando que 80% de las empresas, aplican diversas tecnologías en sus procesos de diseño, construcción y gestión de obra; destacando el uso del Modelado de la información de construcción MIC (Building Information Modeling BIM), y de los sistemas de información de gestión de proyectos (Project management information system PIMS), como opciones eficaces para la administración de tiempos y recursos.

Así mismo, el estudio plantea el uso de las tecnologías inmersivas como alternativas exploratorias en las actividades del sector, pues señala, que estas comparten una media de 40% de uso entre las empresas de diseño y construcción (KPMG, 2023). A estas se suman otras opciones, como es el caso de la inteligencia artificial, la fabricación digital en tres dimensiones, la big data, y el aprendizaje avanzado.

En el caso específico de las tecnologías inmersivas, el trabajo de Sepasgozarn y otros (2021), hace notar su utilidad, considerando la experiencia del usuario en relación al modelo digital, al cual, es posible acceder, entender y manipular mediante el uso de dispositivos electrónicos, para la comunicación y gestión del objeto virtualizado. El trabajo mencionado, realizado a modo de revisión literaria, se enfoca en la realidad virtual y en la realidad aumentada, para la percepción espacial de la arquitectura, aunque sugiere en sus recomendaciones el uso de otras tecnologías asociadas.

Así mismo Li y otros (2021) realizaron aportes en cuanto al uso de las tecnologías inmersivas en la industria de la construcción, su trabajo se diferencia del anterior, por abordar la conducta y el comportamiento de constructores en un ambiente de trabajo simulado en la virtualidad, a fin de poder demostrar su utilidad para la capacitación y el aprendizaje significativo, en aras de tener una mejor respuesta al momento de enfrentar situaciones de riesgo en obra.

Vale mencionar también, los aportes de Ghamari y otros (2021) quienes a pesar de desarrollar su traba-

jo sobre la neuroarquitectura como estrategia de diseño espacial, mencionan el uso de la realidad virtual como herramienta exploratoria alternativa para validar y probar el uso de las neurociencias en materia de diseño, considerando las dimensiones, texturas y proporciones de los elementos arquitectónicos, y su influencia en la percepción de los usuarios.

Recientemente, Bernasconi y otros (2023) también presentaron una revisión literaria sobre el uso de las tecnologías en la arquitectura, estudiando la experiencia inmersiva desde el concepto del metaverso, como lugar virtual para la interacción y simulación del usuario en el mundo digital, y escenario para el diseño; entre sus resultados refieren la eficacia de las realidades inmersivas para el entendimiento del contexto, del sitio o lugar pues es posible recrearlo geográficamente, desde la virtualidad para la experimentación.

Las investigaciones mencionadas, refieren las tecnologías de virtualización entre sus resultados y conclusiones sobre la arquitectura, pero no toman como foco principal la inmersividad, para el análisis y estudio del diseño. Es por ello que, el presente trabajo busca profundizar sobre el conocimiento de la aplicación de las tecnologías inmersivas en el ejercicio del diseño arquitectónico como disciplina profesional, realizando una revisión sistematizada de la literatura en artículos científicos de 2021-2023. Esto permitirá comprender los aportes de la realidad virtual, aumentada y mixta, en el ejercicio creativo del diseño, para categorizar los campos de acción explorados desde la ciencia y la investigación.

2. DESARROLLO

Para el desarrollo metodológico se ha seguido el modelo de la declaración Prisma, que como explican Sánchez y otros (2022) consiste en esquematizar todo el proceso, a fin de hacerlo replicable para su verificación. El primer paso fue identificar las fuentes de información, de dónde se extrajeron los trabajos a considerar en la revisión literaria, en este caso la búsqueda se realizó en el portal Web of Science, que agrupa revistas científicas de diversos temas, con mayor índice de citación, y trabajos realizados en diferentes partes del mundo; además, el sitio ofrece un motor de búsqueda avanzado, que permite clasificar y gestionar la información obtenida eficazmente.

El segundo paso fue revisar los registros a partir de

títulos, resúmenes, palabras clave, así como conclusiones, a fin de determinar la idoneidad de los mismos en cuanto a la temática abordada. La búsqueda fue realizada en febrero de 2024 a partir de los reactivos: “virtual reality + architecture” y “virtual reality + architecture design”, se utilizaron en inglés a fin de alcanzar la mayor cantidad de trabajos y su pertinencia al tema de estudio. De esa indagación se obtuvieron 142 resultados, filtrados en el intervalo de tiempo entre 2021 y 2023, para establecer un periodo en el que se revisó el desarrollo del tema en lo que respecta a la arquitectura, pues entre los años 2020 y 2021 ocurrió un cambio significativo que duplicó la producción y citación científica sobre el tema.

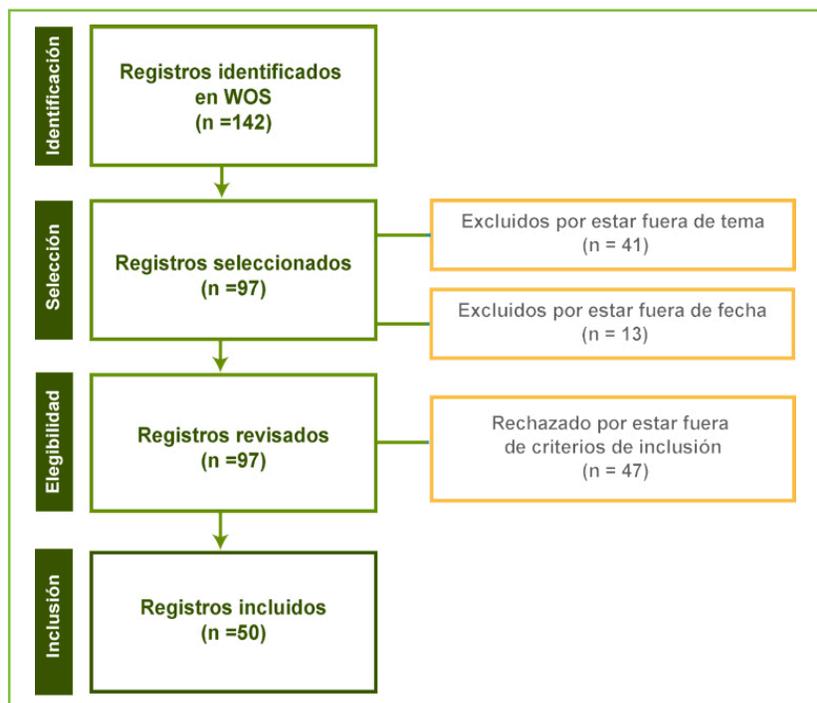


Figura 1. Diagrama Prisma aplicado a la búsqueda y reducción de las fuentes de información. **Fuente:** elaboración propia. Año: 2024

El tercer paso fue seleccionar los registros a incluir en la revisión, según la temática conceptual y su abordaje; se establecieron tres criterios de exclusión: trabajos que refirieron la arquitectura en el campo virtual, no para su estudio, sino como contexto para la justificación; trabajos que refieren los términos de virtualidad o arquitectura, en relación a otras disciplinas que no tienen que ver con el diseño; y trabajos que refieren la virtualidad en asociación a lo digital, que no incluyeran el uso aplicado al diseño sino a otras áreas, como la construcción o la educación.

Para el presente estudio fueron incluidos cincuenta trabajos, por la pertinencia en materia de diseño arquitectónico, en cualquiera de sus escalas de acción, de los cuales se desprendieron categorías y temas que ejemplifican el cómo se aplican las tecnologías inmersivas en la práctica, desde su ideación, estudio, y materialización como proceso proyectivo. La figura 1 que se muestra a continuación esquematiza todo el proceso.

2.1.RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer resultado que destaca, es el crecimiento progresivo de trabajos y artículos que consideran el tema de la realidad virtual como una herramienta de diseño en cualquiera de sus escalas, pues como se muestra en la figura 2, en lo que respecta a los años 2021 y 2023, el aumento ha sido de más del doble, lo cual representa que la producción significativa valora el tema, al menos en el escenario de la arquitectura como proceso inventivo y creativo para la solución de espacios y formas habitables.

Un dato a destacar, es el incremento del número de citas de los trabajos revisados, lo cual determina la vigencia y actualidad de la variable estudiada pues aunque su variación no ha sido en la misma proporción que la producción escrita, la tendencia comparativa de los tres años demuestra un evidente ascenso, lo cual confirma que las tecnologías inmersivas están siendo foco de estudio en materia de diseño arquitectónico, y puestas a prueba en diversos ámbitos.

De la revisión de la literatura, se desprenden tres categorías o bloques temáticos: el primero es el uso de las tecnologías inmersivas en relación al diseño arquitectónico, con un total de 20 trabajos que son agrupados en este rubro y entre ellos suman 40% de la producción; en segundo lugar, se encuentra la aplicación de las tecnologías en relación al diseño urbano o diseño de paisaje, con 16 trabajos que abordan el tema de la ciudad para alcanzar 32% de la balanza; la tercera categoría, se refiere al diseño de espacios interiores o elementos arquitectónicos específicos, en este caso 14 trabajos se enfocan en el tema del lugar y sus características, con 28% del peso estadístico. La totalidad de los textos revisados fue escrita en el idioma inglés, incluso aquellos producidos en lugares con lenguas oficiales diversas.

A fin de facilitar la comprensión de los contenidos, se enlistaron temas puntuales, que se describen siguien-

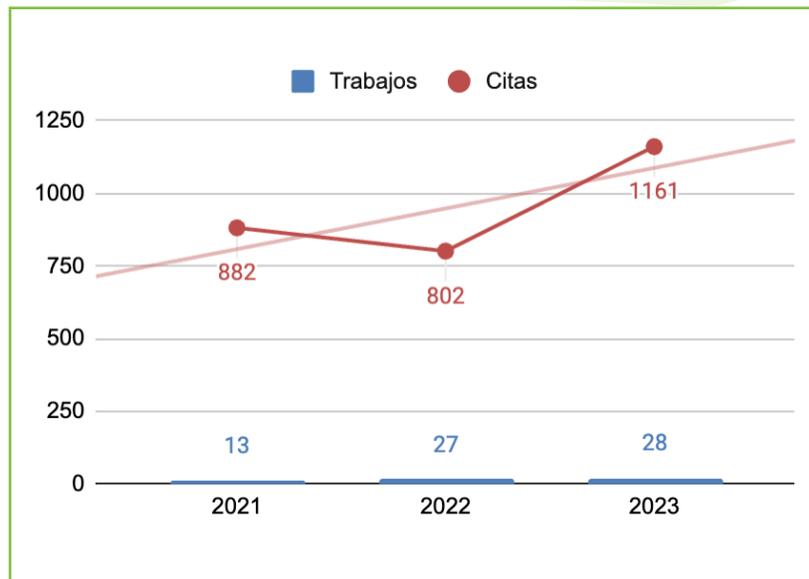


Figura 2. Comparativa trianual de trabajos y citas relacionadas al tema de las tecnologías inmersivas y el diseño arquitectónico. **Fuente:** elaboración propia. Año: 2024

do la tendencia de mayor a menor repetición, según la cantidad de trabajos que los refieren. Esta clasificación no debe entenderse como una jerarquización de los usos operativos dados a las tecnologías inmersivas en el diseño, sino relacionado a cómo están siendo referidas y abordadas desde la producción de la literatura científica en la arquitectura.

2.1.2. Bienestar emocional

El tema de mayor recurrencia en la revisión, fue el uso de las tecnologías inmersivas para establecer el impacto emocional del usuario dentro del espacio y sus posibles recorridos. Los trabajos de Presti y otros (2022), así como de Kim y otros (2021) aplican la realidad virtual para determinar la influencia de alturas espaciales y el manejo de vanos y aberturas desde la percepción de los usuarios.

Así mismo, Yeom y otros (2021), toman como referencia el uso de muros verdes en el diseño biofílico del espacio, coincidiendo con Bilgic y Ebbini (2023), que aplican estrategias biofílicas para el diseño interior; ambos trabajos valoran el elemento natural verde, en función del bienestar emocional de los habitantes del espacio. Aunque no con la misma línea de diseño, el trabajo de Śliwa (2023) refiere la exploración de la integración del usuario

en contacto con la naturaleza, desde la virtualidad para el diseño de espacios inteligentes, tomando como ejemplo el diseño interior de dormitorios estudiantiles.

Por otra parte, Zhiyu y otros (2023) se enfocan en el diseño interactivo, midiendo la reacción del usuario frente a estímulos florales artificiales que se activan al tacto; mientras que, Nguyen y Morinaga (2023) aplican la realidad virtual para validar la percepción de árboles al borde de un camino o senda, en función del diseño urbano y su paisaje natural, para ello aplican sensores y dispositivos alternos a los inmersivos como complemento a la experiencia del estudio del espacio virtual. El trabajo de Tawil y otros (2022), se enfoca en la percepción de las formas y la sensibilidad de los usuarios en relación a su salud mental, sobre los cambios de contornos y esquinas.

También, los trabajos de Li y otros (2021), así como de Pei y otros (2023), refieren la observancia de las reacciones fisiológicas de los usuarios captadas en la experiencia inmersiva sobre todo asociado al tema de espacios de trabajos; por su parte, Kayhan y otros (2023) enfocan su estudio en los estados de ánimo y la percepción de la luz y su temperatura mediante la virtualidad; de la misma manera, la investigación de Chaparro y otros (2023) sigue la línea de validar el estado emocional de los usuarios ancianos en espacios virtualizados. Solamente, Pérez y otros (2022) referieren el tema de la accesibilidad, como aspecto de diseño a ser probado desde la virtualidad, mediante el uso de un simulador con una silla de ruedas para el configuración de recorridos.

De esto se desprende, que los temas de salud, bienestar, emociones, y estados ánimos de los usuarios, son explorados con la realidad virtual a fin de hacer un diseño espacial más eficiente, eficaz y cercano a las necesidades de las personas, tomando en cuenta no solo sus conductas o comportamientos, sino sus reacciones físicas que son captadas por lentes y cascos de realidad virtual, así como por sensores, equipos de electroencefalogramas y diversas herramientas que complementan la validación y puesta a prueba de dichos estudios, que experimentan la relación usuario - espacio, en la inmersividad.

2.1.2. Eficiencia energética

Unido al punto anterior, está el tema de la sostenibilidad enfocado en diversos aspectos en el que destaca la medición de la eficiencia energética en el diseño de los

espacios, mediante la inmersión digital. Shilei Lu y otros (2023) aplican la virtualidad en función del diseño de fachadas y el ahorro energético captada mediante dispositivos digitales inteligentes. De la misma manera, Chamilothori y otros (2022) refieren el diseño de fachadas en su trabajo, el cual, busca medir la incidencia solar sobre las superficies con geometrías complejas, mediante un estudio de luz y sombras a diversas horas, con la simulación del cambio horario en la virtualidad.

Estos trabajos, también coinciden con la investigación que desarrolló Erkan (2021), sobre el estudio del espacio, desde la percepción de temperaturas, a fin de medir el confort térmico, haciendo una comparativa entre tres espacios simulados y captando el requerido visual de los usuarios dentro de estos. También, He y otros (2023) enfocaron su trabajo sobre las fachadas de los edificios, pero para la percepción del color, haciendo un estudio comparativo entre hombres y mujeres, y sus preferencias entre tonos fríos y cálidos para el acabado exterior de las alzados.

En relación al diseño de paisajes, el trabajo de Ma y otros (2023) refieren la utilidad de la virtualidad para el análisis ambiental del contexto y su entorno, como potente herramienta de diseño para su configuración morfo espacial; mientras que Dan y otros (2021) se refieren a las bondades de la realidad aumentada para el modelado de diseño in situ, mediante la captación de información de dispositivos que no aíslan al sujeto de su entorno, sino que, le permiten recabar información real y virtual al mismo tiempo, para la toma de decisiones.

2.1.3. Ventanas e iluminación

Otro tema también abordado, ampliamente en la literatura, es el diseño de ventanas. Maksoud y otros (2023) lo refieren por la importancia de estas para la entrada de luz y la ventilación de los espacios, en función de la comodidad de los usuarios. También, Presti y otros (2022) señalan la importancia de determinar las alturas de las ventanas, a partir de techos y distancias entre muros, para medir su impacto en la percepción que tienen los usuarios al recorrer un lugar, validando el uso de la realidad virtual como experiencia para el recorrido de un sitio.

Por su parte, Yang y otros (2023) desarrollan una valiosa herramienta de diseño para la ubicación de ventanas en una sala, según los movimientos corporales, que

son captados por la realidad virtual. También, Kin y otros (2021) abordan el tema de ventanas, pero en función de las alturas de techo y cómo esto puede ser condicionado por el uso que se genera dentro del espacio proyectado y virtualizado. De la misma manera, Zhang y otros (2023) estudian las alturas del espacio mediante la virtualidad, validando el uso de escenas panorámicas 360° y su influencia en la percepción de las dimensiones del lugar.

Al tema del espacio y sus dimensiones, se asocia además el de la iluminación, Chinazzo y otros (2021) lo tratan desde la habitabilidad para entender la percepción de la luz, con una comparativa entre la simulación de la luz diurna y la luz artificial. También, Kayhan y otros (2021) hacen una comparativa a partir de la temperatura de la luz. Ambos trabajos plantean la perspectiva de contraponer el uso de la luz diurna y la luz artificial, a modo de criterios a seguir en los espacios interiores, que pueden ser emulados desde la virtualidad para establecer parámetros y correspondencias en el diseño.

2.1.4. Acústica y sonoridad

El tema del sonido, también forma parte de las aplicaciones de uso que se dan a la realidad virtual en la arquitectura; los trabajos de Jo y Jeon (2022), así como Zhou y otros (2023) asocian a la práctica urbana, el diseño de paisajes sonoros, desde una experiencia inmersiva audiovisual que combina imágenes y elementos sonoros en el espacio digital. Mientras que, Nguyen y Morinaga (2023), estudian el paisaje sonoro a partir de los sonidos que se producen en el sitio; Masullo y otros (2021) lo relacionan a la presencia del ruido del tráfico, y sus implicaciones en la percepción de la calidad espacial verde del paisaje urbano.

Trabajos como los de Latini y otros (2023), Jeon y otros (2022), así como Li y otros (2021) abordan el tema de la sonoridad, pero en espacios interiores, tomando como referencia las oficinas y lugares corporativos, combinando en la experiencia, silencios, ruidos, sonidos de maquinarias, y de aires acondicionados; a esos estímulos son sometidos los usuarios, a fin de conocer su reacción combinando tecnologías, como sensores, bocinas, o electroencefalogramas, para capturar la información fisiológica, ante tales timbres y vibraciones.

Un caso particular es el trabajo de Chen y otros (2022), que aplicaron la realidad virtual para la prueba

sonora de salas o auditorios para conciertos musicales y obras de teatro; su referente proyectual es el diseño espacial acústico y por ello la simulación incluyó el modelado de cuatro auditorios virtuales, donde se calibró y estandarizó el sonido, llegando a la conclusión que la preferencia espacial la determina el tamaño y las dimensiones que ofrece la sala, y no la sonoridad percibida por el espectador.

2.2. LA IMMERSIVIDAD EN EL DISEÑO

Las tecnologías inmersivas no solo son escenarios para operar y poner a prueba algún aspecto del diseño, también son una herramienta útil para su ejecución o aplicación a cualquier escala. Los estudios de Han y otros (2023), así como Belaroussi y otros (2023a) probaron la virtualidad en función de la estrategia de diseño participativo, con enfoque urbano, para involucrar a los destinatarios del proyecto; también, Chuan Sun (2022) usaron la virtualidad para el diseño de paisajes tomando en cuenta las variables de la trama urbana y el tráfico a partir de los espacios verdes. De la misma manera, Yuping y otros (2022) la aplicaron para el diseño de jardines, con la comprensión de elementos florales que con el tacto pasan de la bidimensionalidad a la tridimensionalidad en la experiencia inmersiva.

Es pertinente señalar, que la realidad virtual es aplicada en función de la evaluación de la eficiencia o de la calidad del diseño, como lo demuestran los trabajos de Xiang Li (2022), así como también Chaparro y otros (2023), quienes ven en la virtualización un medio eficaz de control del diseño. Además, la realidad virtual puede servir para abordar la complejidad de los procesos constructivos o la toma de decisiones en el proceso y la gestión del proyecto, como lo evidencia el trabajo de Liu y otros (2023).

Investigaciones como las de Jin-Kook y otros (2023) se enfocan en la visualización 360° del espacio, que en su caso fue la exploración del hall de una biblioteca recreada virtualmente; con la misma intención, Junyi (2022) aplicó la realidad virtual para la exploración en tercera dimensión del diseño interior especial con énfasis en la ornamentación y la decoración. Por su parte, Bilgic y Ebbini (2023) la aplicaron para el diseño del lobby de un hotel, en el que se modelaron tres alternativas de uso. Mientras que Kayhan y otros (2021) la utilizaron para el

diseño interior de una iglesia; y Kim y otros (2021) para el prototipo de diseño de salas de parto. Estos son algunos de referentes o tipologías funcionales, exploradas para el diseño en la inmersividad, además de las mencionadas en los otros apartados.

2.3. MODELADO DIGITAL

Todos los trabajos revisados se centran en el modelado digital como elemento indispensable para la experiencia inmersiva, por ello un buen número de los autores se encarga de analizar y ofrecer algunas alternativas en cuanto a la técnica o combinación de tecnologías para generar la maqueta virtual. El trabajo de Wali y otros (2023) se enfoca en el modelado a partir de dibujos realizados por niños y jóvenes a fin de traducir tridimensionalmente sus conocimientos y experiencias espaciales, con relación a la arquitectura.

En la misma dirección, se encuentran trabajos que toman como referente para el modelado la yuxtaposición de fotografías, como es el caso de Xiaoning y otros (2022), Cha y otros (2023), así como Haoming y otros (2022), para los autores el valor de la imagen es trascendental, pues la experiencia se caracteriza precisamente por la visualización de la mezcla de los elementos gráficos, considerando la inmersión parcial o total de la visión del espectador.

Sobre el objeto digital en tercera dimensión, los autores Llorca y Vorländer (2021) enfatizan la importancia de los detalles del modelado para su realismo y comprensión; por lo cual, Fukuda y otros (2021) proponen una estrategia de realización por capas en donde se superponen al objeto, mapas, luces, sombras, e incluso sonidos para hacer más realista la experiencia. Al compendio de esas acciones de maquetación digital, Cho y otros (2023) las refieren como estrategias de diseño para el modelado de las formas en tercera dimensión, debido a que abarcan mucho más que la simple representación del objeto o el espacio tridimensionalmente, pues incluye también su ambientación.

Otras investigaciones, abordan el tema de la modelación digital, con una comparativa de la visualización del espacio y los objetos arquitectónicos, desde la virtualidad y la realidad real. Reaver (2022) lo realiza con el ejemplo del Pabellón Nórdico de la Exposición Internacional de Venecia, el cual primero se expuso virtualmente durante la pandemia en 2020 y luego se materializó físicamente,

el estudio comparó ambas experiencias por parte de los usuarios.

También Hameed y Perkis (2021), realizan la comparativa para determinar cómo es la percepción espacial de los usuarios dentro y fuera de la inmersividad para el entendimiento del pensamiento espacial; al igual que Cha y otros (2023) que estudian la comparativa, solo que, mediante una serie de fotografías, agrupadas para realizar la maqueta digital. Mientras que Belaroussi y otros (2023b) hacen una comparativa entre el paisaje urbano real y simulado, para motivar la participación de los usuarios en el diseño.

Un dato particular es que los trabajos mencionados, refieren entre sus conclusiones que la percepción del tamaño y la escala se ve de alguna manera condicionada en la simulación digital, por cuanto los objetos virtuales suelen percibirse por los usuarios, como más pequeños que en la realidad. Los estudios no determinan el porqué de dicha disparidad, aunque lo evidencian como dato característico a considerar desde la perspectiva del diseño.

En la misma línea, Tastan y otros (2022) realizaron estudios comparativos, entre los modelos de la realidad virtual con la inmersión mediante lentes y guantes, y la virtualización con dispositivos de escritorio, mediados solo con la pantalla del computador. Según los autores, en este escenario es más sencillo realizar ajustes por teclado, en lo que refiere a tamaños, para solventar la diferencia de percepción y escala de los objetos, de modo que, para el ejercicio de diseño, la modelación no deberá sólo abordarse desde la virtualidad sino con la inclusión de aplicaciones de escritorio que permitan una mejor gestión de escalas y dimensiones.

A modo de cierre de los resultados, a continuación, se presenta un diagrama con los categorías y temas desarrollados en la literatura revisada, los cuales evidencian un panorama de cómo se están aplicando las tecnologías inmersivas en el diseño arquitectónico, no solo como herramientas para la visualización, sino configurar y modelar escenarios que validen la experiencia del usuario.

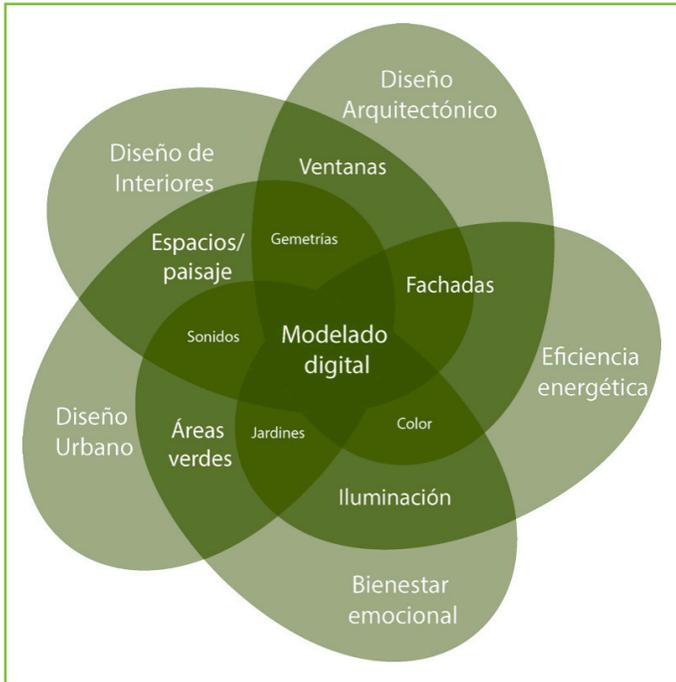


Figura 3. Diagrama de temas y categorías abordados con las tecnologías inmersivas en el diseño arquitectónico. **Fuente:** elaboración propia. Año: 2024

3. CONCLUSIONES

La revisión demuestra el amplio uso de las tecnologías inmersivas en el diseño arquitectónico, pues son muchos y variados los aspectos tomados en cuenta para ser probados en el mundo digital mediante las experiencias virtuales, mixtas y aumentadas. Entre los más destacados sobresale la consideración del espacio en todas sus dimensiones: en su configuración formal en referencia a las alturas, las ventanas y las geometrías; en las cualidades acústicas, en relación al ruido y el sonido producido en el lugar; para determinar aspectos visuales, desde el color o la ornamentación para el diseño de interiores; también la iluminación, o la capacidad de percibir la luz diurna y nocturna; o el entendimiento del paisaje urbano, rural, natural y sonoro, y sus diversas complejidades.

Sobresale también, la inclusión de diversas tecnologías, que complementan la experiencia virtual inmersiva asociada a sensores de movimientos corporales, captadores de reacciones fisiológicas para estímulos visuales, ópticos o kinestésicos; además de electroencefalogramas, y cámaras para imágenes estereoscópicas de visión 360°, así como también amplificadores de sonidos. La

experiencia inmersiva, por tanto, conlleva la participación completa y activa del sujeto, con todos sus sentidos y no simplemente la mera visualización u observación del espacio digital, sino su profunda comprensión.

Unido a lo anterior, destacan también los trabajos que desarrollan el tema de la percepción del espacio, sobre todo aludiendo a la relación del tamaño de los objetos entre la comparativa de lo virtual y lo real. Si bien es cierto, el desarrollo del pensamiento gráfico es esencial para dichas prácticas inmersivas, ello no superpone la experiencia física del usuario ante el objeto arquitectónico construido, y por eso son necesarias esas comparaciones, pues la virtualidad no sustituye a la realidad física de la arquitectura como hecho material y tangible.

Por último, vale mencionar, el carácter humanizado de la experiencia virtual, ya que con la inmersividad se busca entender la relación del usuario con el espacio, así como su impacto, conducta y reacción, en función del bienestar y de la mejor adaptación de los criterios de diseño a sus necesidades. De modo que, la virtualización es aplicada como una herramienta para conocer aún más, al destinatario final de la arquitectura.

El futuro del diseño pasa por las experiencias de las tecnologías inmersivas, y su profundización en el proceso, pues la interactividad, el diseño participativo y el involucramiento de los usuarios, son referencias inalienables a considerar en la compleja tarea de pensar y hacer la arquitectura. Estos aspectos son la gran propuesta de las técnicas digitales, pues ponen a disposición del diseño, la simulación y la virtualidad, en la búsqueda de soluciones operativas que satisfagan las necesidades de las personas en el espacio, el cual puede ser experimentado desde la inmersividad.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Belaroussi, R., González, E. D., Dupin, F., Martin-Gutierrez, J. (2023a). Appraisal of Architectural Ambiances in a Future District. *Sustainability*, 15(18), 13295. <https://doi.org/10.3390/su151813295>

Belaroussi, R., Pazzini, M., Issa, I., Dionisio, C., Lantieri, C., González, E. D., Vignali, V., Adélé, S. (2023b). Assessing the Future Streetscape of Rimini Harbor Docks with Virtual Reality. *Sustainability*, 15(6), 5547. <https://doi.org/10.3390/su15065547>

- Bernasconi, C., y Blume, L. B. (2023). Theorizing architectural research and practice in the metaverse: the meta-context of virtual community engagement. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*. <http://dx.doi.org/10.1108/ARCH-08-2023-0203>
- Bilgic, N., y Ebbini, G. W. (2023). Balancing complexity and restoration in virtual interior environments: user perceptions of organized complexity in biophilic design. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*. <http://dx.doi.org/10.1108/ARCH-07-2023-0173>
- Cha, S. H., Ma, J. H., Seo, J., Kim, J. I., y Han, S. (2023). Empirical comparison of spatial experience between photo-based IVE and real space. *Architectural Science Review*, 66(1), 1–16. <https://doi.org/10.1080/00038628.2022.2134089>
- Chamilothori, K., Wienold, J., Moscoso, C., Matusiak, B., y Andersen, M. (2022). Regional Differences in the Perception of Daylit Scenes across Europe Using Virtual Reality. Part II: Effects of Façade and Daylight Pattern Geometry. *LEUKOS*, 18(3), 316–340. <https://doi.org/10.1080/15502724.2021.1999257>
- Chen, Y., Cabrera, D., y Alais, D. (2022). Separate effects of auditory and visual room size on auditorium seat preference: a virtual reality study. *Perception*, 51(12), 889-903. <https://doi.org/10.1177/03010066221125864>
- Chinazzo, G., Chamilothori, K., Wienold, J., y Andersen, M. (2021). Temperature–Color Interaction: Subjective Indoor Environmental Perception and Physiological Responses in Virtual Reality. *Human Factors*, 63(3), 474-502. <https://doi.org/10.1177/0018720819892383>
- Cho, Y., Tariq, R., Hassan, U., Iqbal, J., Basit, A., Choo, H. G., y Ali, M. (2023). CloudUP—Upsampling Vibrant Color Point Clouds Using Multi-Scale Spatial Attention. *IEEE Access*, 11, 128569-128579. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3332141>
- Chuan Sun, Li Dong. (2022). Virtual Reality Technology in Landscape Design at the Exit of Rail Transit Using Smart Sensors. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, ID 6519605, 13. <https://doi.org/10.1155/2022/6519605>
- Dan, Y., Shen, Z., Xiao, J., Zhu, Y., Huang, L., y Zhou, J. (2021). HoloDesigner: A mixed reality tool for on-site design. *Automation in Construction*, 129, 103808. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aut-con.2021.103808>
- Chaparro, B., Muñoz, J. Zavala, Reyes, H. y Condori, K. (2023). Mixed Reality Ecosystem Architecture to Support Visuoconstructive Ability in Older Adults. *IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje*, 18(2), 182-189. <http://dx.doi.org/10.1109/RITA.2023.3259986>
- Erkan, İ. (2021). Cognitive response and how it is affected by changes in temperature. *Building Research y Information*, 49(4), 399–416. <https://doi.org/10.1080/09613218.2020.1800439>
- Fukuda, T., Novak, M., Fujii, H., y Pencreach, Y. (2021). Virtual reality rendering methods for training deep learning, analyzing landscapes, and preventing virtual reality sickness. *International Journal of Architectural Computing*, 19(2), 190-207. [doi:10.1177/1478077120957544](https://doi.org/10.1177/1478077120957544)
- Ghamari, H., Golshany, N., Naghibi Rad, P., y Behzadi, F. (2021). Neuroarchitecture Assessment: An Overview and Bibliometric Analysis. *European Journal of Investigative Health Psychology and Education*, 11, 1362-1387. <https://doi.org/10.3390/ejihpe11040099>
- Hameed, A., y Perkis, A. (2021). A Subjective and Behavioral Assessment of Affordances in Virtual Architectural Walkthroughs. *Applied Sciences*, 11(17), 7846. <https://doi.org/10.3390/app11177846>
- Han, S., Liu, S., y Ren, L. (2023). Application of human-computer interaction virtual reality technology in urban cultural creative design. *Scientific Reports*, 13, 14352. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41566-8>
- Haoming Dong, Xiaodan Liang, Yalong Liu, y Dan Wang. (2022). 5G Virtual Reality in the Design and Dissemination of Contemporary Urban Image System under the Background of Big Data. *Wireless Communications and Mobile Computing*, ID 8430186, 14. <https://doi.org/10.1155/2022/8430186>
- He, F., He, Y., y Sun, L. (2023). Gender differences in color perceptions and preferences of urban façades based on a virtual comparison. *Building and Environment*, 245, 110907. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110907>
- Jeon, J. Y., Jo, H. I., Santika, B. B., y Lee, H. (2022). Crossed effects of audio-visual environment on indoor soundscape perception for pleasant open-plan office environments. *Building and Environment*, 207, 108512. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108512>

- Jin-Kook Lee, Sanghoon Lee, Young-chaee Kim, Sumin Kim, y Seung-Wan Hong. (2023). Augmented virtual reality and 360 spatial visualization for supporting user-engaged design. *Journal of Computational Design and Engineering*, 10(3), 1047–1059. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad035>
- Jo, H. I., y Jeon, J. Y. (2022). Perception of urban soundscape and landscape using different visual environment reproduction methods in virtual reality. *Applied Acoustics*, 186, 108498. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108498>
- Junyi, Nie. (2022). Application of Traditional Architectural Decoration Elements in Modern Interior Design Based on 3D Virtual Imaging. *Wireless Communications and Mobile Computing*, ID 9957151, 10. <https://doi.org/10.1155/2022/9957151>
- Kayhan, A. M., Şahin, A., y Erkan, İ. (2021). The effect of types of light on people's mood using a church as an example in the virtual reality. *Mental Health, Religion & Culture*, 24(5), 504–518. <https://doi.org/10.1080/13674676.2020.1850665>
- Kim, S., Park, H., y Choo, S. (2021). Effects of Changes to Architectural Elements on Human Relaxation-Arousal Responses: Based on VR and EEG. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(8), 4305. <https://doi.org/10.3390/ijerph18084305>
- KPMG (2023). Familiar challenges - new approaches, 2023 Global Construction Survey. 14th. <https://kpmg.com/us/en/articles/2023/2023-global-construction-survey.html>
- Latini, A., Di Loreto, S., Di Giuseppe, E., D'Orazio, M., y Di Perna, C. (2023). Crossed effect of acoustics on thermal comfort and productivity in workplaces: a case study in virtual reality. *Journal of Architectural Engineering*, 29 (2), 04023009. <http://dx.doi.org/10.1061/JAEIED.AEENG-1533>
- Li, J., Wu, W., Jin, Y., Zhao, R., y Bian, W. (2021). Research on environmental comfort and cognitive performance based on EEG+ VR+ LEC evaluation method in underground space. *Building and Environment*, 198, 107886. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107886>
- Liu, Z. M., y Chen, Y. H. (2023). A modularity design approach to behavioral research with immersive virtual reality: A SkyrimVR-based behavioral experimental framework. *Behavior Research*, 55, 3805–3819. <https://doi.org/10.3758/s13428-022-01990-6>
- Llorca, J., y Vorländer, M. (2021). Multi-detailed 3D architectural framework for sound perception research in Virtual Reality. *Frontiers in Built Environment*, 7, 687237. <http://dx.doi.org/10.3389/fbuil.2021.687237>
- Ma, B., Dong, Y., Liu, H., et al. (2022). Soft multimedia assisted new energy productive landscape design based on environmental analysis and edge-driven artificial intelligence. *Soft Computing*, 26, 12957–12967. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-06155-9>
- Maksoud, A., Hussien, A., Mushtaha, E., y Alawneh, S. I. A.-R. (2023). Computational Design and Virtual Reality Tools as an Effective Approach for Designing Optimization, Enhancement, and Validation of Islamic Parametric Elevation. *Buildings*, 13, 1204. <https://doi.org/10.3390/buildings13051204>
- Masullo, M., Maffei, L., Pascale, A., Senese, V. P., De Stefano, S., y Chau, C. K. (2021). Effects of Evocative Audio-Visual Installations on the Restorativeness in Urban Parks. *Sustainability*, 13, 8328. <https://doi.org/10.3390/su13158328>
- Nguyen, T., y Morinaga, M. (2023). Effect of roadside trees on pedestrians' psychological evaluation of traffic noise. *Frontiers in Psychology*, 14, 1166318. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1166318>
- Pei, W., Guo, X., y Lo, T. (2023). Pre-Evaluation method of the experiential architecture based on multi-dimensional physiological perception. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 22(3), 1170–1194. <https://doi.org/10.1080/13467581.2022.2074019>
- Pérez, E., Espacio, A., Salamanca, S., y Merchán, P. (2022). WUAD (Wheelchair User Assisted Design): A VR-Based Strategy to Make Buildings More Accessible. *Applied Sciences*, 12, 8486. <https://doi.org/10.3390/app12178486>
- Presti, P., Ruzzon, D. y Avanzini, P. (2022). Measuring arousal and valence generated by the dynamic experience of architectural forms in virtual environments. *Scientific Reports*, 12, 13376. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-17689-9>
- Reaver, K. (2022). Mixed Reality in Multiuser Participatory Design: Case Study of the Design of the 2022 Nordic Pavilion Exhibition at the Venice Biennale. *Buildings*, 12, 1920. <https://doi.org/10.3390/buildings12111920>
- Sánchez, S., Pedraza, I. y Donoso, M. (2022). ¿Cómo ha-

- cer una revisión sistemática siguiendo el protocolo PRISMA? Usos y estrategias fundamentales para su aplicación en el ámbito educativo a través de un caso práctico. *Bordón, Revista de Pedagogía*, 74(3), 51-66. <https://doi.org/10.13042/Bordón.2022.95090>
- Shilei Lu, Yuqian Huo, Na Su, Minchao Fan, y Ran Wang. (2023). Energy Consumption Forecasting of Urban Residential Buildings in Cold Regions of China. *Journal of Energy Engineering*, 149(2). DOI: 10.1061/JLEED9.EYENG-4556
- Śliwa, A. (2023). Ecocritical Interpretation of Natural and Virtual Elements in the Residential Environment. *Nature in Dwelling Spaces and its Simulacra. Architecture, Civil Engineering, Environment*, 16(4), 59-67. <https://doi.org/10.2478/acee-2023-0050>
- Tastan, H., Toker, C., y Tong, T. (2022). Using handheld user interface and direct manipulation for architectural modeling in immersive virtual reality: An exploratory study. *Computer Applications in Engineering Education*, 30(2), 415-434. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/cae.22463>
- Tawil, N., Sztuka, I. M., Pohlmann, K., Sudimac, S., y Kühn, S. (2021). The Living Space: Psychological Well-Being and Mental Health in Response to Interiors Presented in Virtual Reality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 12510. <https://doi.org/10.3390/ijerph182312510>
- Wali, A., Lisan, A., y Ather, H. (2023). Application in multimedia: from camera to VR. *Multimedia Tools and Applications*, 82, 11721-11751. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-13687-1>
- Xiang Li, Yanan Guo. (2022). Urban Landscape Design Based on Virtual Reality Technology. *Advances in Multimedia*, vol. 2022, ID 3154353, 6. <https://doi.org/10.1155/2022/3154353>
- Xiaoning Zhang, Wen Fan, Xiaohong Guo. (2022). Urban Landscape Design Based on Data Fusion and Computer Virtual Reality Technology. *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, ID 7207585, 14. <https://doi.org/10.1155/2022/7207585>
- Yang, Q., Cruz-Garza, J. G., y Kalantari, S. (2023). Brain-computer interfaces as an architectural design tool: Feasibility and usability study. *Automation in Construction*, 154, 105011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105011>
- Yeom, S., Kim, H., y Hong, T. (2021). Psychological and physiological effects of a green wall on occupants: A cross-over study in virtual reality. *Building and Environment*, 204, 108134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108134>
- Yuping Tang, Yang Xuan, Xiaoyue Zhu. (2022). Evaluation of the Application Effect of Virtual Simulation Technology in Rural Garden Landscape Design. *Advances in Multimedia*, vol. 2022, ID 2210291, 11. <https://doi.org/10.1155/2022/2210291>
- Zhang, Z., Fort, J. M., Giménez Mateu, L., y Chi, Y. (2023). Uncovering the connection between ceiling height and emotional reactions in art galleries with editable 360-degree VR panoramic scenes. *Frontiers in psychology*, 14, 1284556. <http://dx.doi.org/10.3389/fpsyg.2023.1284556>
- Zhiyu, S.L., Koh, H.P., y Aguiar, C. (2023). Could Socially Interactive Architectural Robotics Promote Restorative Environments?. *Int J of Soc Robotics*. <https://doi.org/10.1007/s12369-023-01040-x>
- Zhou, Z., Ye, X., Chen, J., Fan, X., y Kang, J. (2023). Effect of visual landscape factors on soundscape evaluation in old residential areas. *Applied Acoustics*, 215, 109708. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109708>