

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
VIÑA DEL MAR - CHILE



**“DESARROLLO DE ENTORNO VR PARA MEDIR PERCEPCIÓN
DE SEGURIDAD DE PEATONES CON RESPECTO A LA CALIDEZ
DEL ALUMBRADO PÚBLICO.”**

SOFÍA JAVIERA RAMOS LARENAS

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN INFORMÁTICA/INGENIERÍA EN INFORMÁTICA

PROFESOR GUÍA: HEILYM RAMIREZ

PROFESOR CORREFERENTE: FRANCO JORQUERA

SEPTIEMBRE - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo de entorno VR para medir percepción de seguridad de peatones con respecto a la calidez del alumbrado público.

Nombre del candidato(a): Sofía Javiera Ramos Larenas

Carrera/ Grado: ingeniería en informática

Campus: Josemiguel Carrera **Departamento:** ELINF

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Heilym Ramirez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 15 de octubre de 2026.

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 15 de octubre de 2026 **Firma:**



Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen.

Este trabajo presenta el diseño, desarrollo y aplicación experimental de un ambiente de realidad virtual (VR) que recrea un parque urbano nocturno bajo tres condiciones de temperatura de color correlacionada (CCT: 2000K, 2700K y 4000K), desarrollado en Unity (URP) para Meta Quest 3S en modalidad PCVR, dentro de los rangos de complejidad gráfica recomendados por Meta. El objetivo fue desarrollar experimentalmente un entorno inmersivo en VR para evaluar la percepción de seguridad peatonal bajo distintas temperaturas de color del alumbrado público, en el contexto de la nueva norma lumínica chilena (D.S. N°1/2022 MMA), publicada en 2023 y en vigencia desde octubre de 2024. El ambiente fue aplicado a una muestra de 94 participantes (19–77 años), de quienes se recopilaban datos de sensación subjetiva de seguridad, satisfacción y validez mediante encuesta Likert y de sintomatología de cibercinetosis mediante el Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). La seguridad o comodidad reportada fue menor en la última zona del recorrido (4000K) que en la zona anterior (2700K; $p = 0,009$ con corrección de Bonferroni, tamaño de efecto pequeño), mientras que 46 de los 94 participantes no cambiaron su respuesta entre la primera y la última zona. Los hallazgos se consideran exploratorios y no permiten establecer una relación causal entre CCT alta y sensación de seguridad baja, sino únicamente identificar una tendencia a confirmar en estudios futuros debido a la combinación de cuatro limitaciones metodológicas: la ausencia de calibración fotométrica real de la iluminación (condiciones visuales simuladas con CCT nominal, sin validación física de lux, luminancia o espectro), la aplicación de las tres condiciones lumínicas en un orden fijo sin contrabalanceo entre participantes, las diferencias espaciales entre zonas y una escala propia que combina seguridad y comodidad. Los participantes registraron un nivel notable de cibercinetosis (SSQ total medio = 26,46). Los análisis exploratorios no encontraron asociación significativa entre el SSQ y el cambio de seguridad, pero sí una asociación negativa moderada entre el SSQ y la seguridad reportada en las tres zonas, por lo que no es posible descartar que el malestar haya contribuido a las diferencias entre zonas.

Palabras clave: VR; inmersión; cibercinetosis; seguridad; CCT.

Abstract.

This work presents the design, development, and experimental application of a virtual reality (VR) environment recreating a nocturnal urban park under three correlated colour temperature (CCT) conditions (2000K, 2700K, and 4000K), built in Unity (URP) for the Meta Quest 3S in PCVR mode, within Meta's recommended graphic complexity ranges. The aim was to experimentally develop an immersive VR environment to evaluate pedestrian safety perception under different colour temperatures of public lighting, in the context of Chile's new lighting regulation (D.S. N°1/2022 MMA), published in 2023 and in force since October 2024. The environment was applied to a sample of 94 participants (ages 19–77), from whom subjective safety-perception, satisfaction, and validity data were collected via a Likert survey, along with cybersickness symptomatology via the Simulator Sickness Questionnaire (SSQ). Reported safety or comfort was lower in the last zone of the route (4000K) than in the previous zone (2700K; $p = 0.009$ after Bonferroni correction, small effect size), while 46 of the 94 participants gave the same rating in the first and last zones. Due to the combination of four methodological limitations: the absence of real photometric lighting calibration (visually simulated conditions with nominal CCT, without physical validation of lux, luminance, or spectrum), the fixed, non-counterbalanced order of the three lighting conditions across participants, the spatial differences between zones, and a scale that combines safety and comfort, the findings are considered exploratory and do not allow a causal relationship between high CCT and low perceived safety to be established, but only a tendency to be confirmed in future studies. Participants reported a notable level of cybersickness (mean total SSQ = 26.46). Exploratory analyses found no significant association between SSQ scores and the change in perceived safety, but a moderate negative association between SSQ and reported safety in all three zones; therefore, a contribution of simulator sickness to the differences between zones cannot be ruled out.

Keywords: VR; immersion; cybersickness; safety perception; CCT.

Glosario.

Término / sigla	Definición.
CCT	Temperatura de Color Correlacionada (Correlated Colour Temperature): valor en kelvin que describe si una fuente de luz se percibe más cálida (tonos amarillos/anaranjados) o más fría (tonos azulados).
Cibercinetosis	Conjunto de síntomas producidos por conflictos o incongruencias sensoriales asociados a realidad virtual.
Contaminación lumínica	Exceso, mal direccionamiento o intrusión de luz artificial que altera los ecosistemas nocturnos, el descanso humano y la observación astronómica.
Continuous/Snap Turn Provider, Continuous Move Provider	Componentes del XR Interaction Toolkit de Unity que gestionan cómo se mueve y gira la cámara del usuario dentro del entorno virtual (de forma continua o por saltos "snaps", para reducir el mareo).
CPTED	Crime Prevention Through Environmental Design / Prevención del Delito a través del Diseño Ambiental: enfoque que usa el diseño del espacio urbano (incluida la iluminación) para reducir la criminalidad y el miedo al delito.
Draw Calls	Orden enviada a la tarjeta gráfica por el procesador para dibujar un objeto en pantalla.
D.S.	Decreto Supremo: tipo de norma jurídica chilena dictada por el presidente de la República a través de un ministerio (en este caso, el Ministerio del Medio Ambiente).

Escala Likert	Escala de respuesta psicométrica que pide al encuestado indicar su grado de acuerdo o desacuerdo con una afirmación (típicamente en 4 o 5 niveles).
Eye-tracking	Técnica de seguimiento del movimiento ocular, usada para medir atención visual, fatiga o carga cognitiva del usuario.
FPS (frames per second)	Cuadros por segundo: medida de fluidez con la que se renderiza la escena.
Gait variability	Variabilidad de la marcha: variación en el ritmo, ancho del paso y duración de la zancada de una persona al caminar, usada como indicador de estrés motor o inseguridad.
HCVL	Human-Centric Virtual Lighting / Iluminación Virtual Centrada en el Ser Humano: marco conceptual que sistematiza los efectos del espectro lumínico digital sobre la psicología y fisiología del usuario.
HDRP	High Definition Render Pipeline: canal de renderizado de Unity orientado a mayor calidad gráfica y realismo físico de la luz, con mayores requisitos de hardware que URP.
Iluminación Baked / Lightmaps	Técnica en la que la iluminación, sombras y reflejos se calculan previamente (no en tiempo real) y se guardan como texturas ("lightmaps"), reduciendo el costo de procesamiento durante la ejecución en el dispositivo VR.
Inmersión (VR)	Capacidad de un sistema de reemplazar la mayor cantidad posible de estímulos sensoriales del mundo físico por los del entorno virtual.
Kelvin (K) (Iluminación)	Unidad de medida de la temperatura de color de una fuente lumínica; valores bajos (~2000-3000K) corresponden a luz cálida, valores altos (~5000-6500K) a luz fría.

LOD (Level of Detail)	Técnica de optimización gráfica que reduce el nivel de detalle de los modelos 3D (o los elimina) según su distancia respecto a la cámara, para mejorar el rendimiento.
Luz azul	Radiación dentro del rango de onda corta del espectro visible (aprox. 400-500 nm), asociada a mayor impacto en biodiversidad, salud humana y observación astronómica.
lx (lux)	Unidad de iluminancia: cantidad de luz que incide sobre una superficie.
MANOVA	Análisis Multivariado de Varianza: técnica estadística usada para comparar varias variables dependientes entre distintos grupos al mismo tiempo.
Malla digital 3D (3D Mesh) (modelado 3D)	Estructura geométrica de un modelo 3D.
MMA	Ministerio del Medio Ambiente de Chile, organismo que dictó la norma lumínica citada en la tesis.
MSEM	Modelos de Ecuaciones Estructurales Multinivel: técnica estadística que permite analizar relaciones causales entre variables considerando distintos niveles jerárquicos de los datos (p. ej. individuo y grupo).
RECOGE	Sigla del plan de Recuperación, Conservación y Gestión de Especies.
Runtime	Fase en la que un programa se ejecuta, y conjunto de componentes del motor que hacen posible esa ejecución.

SDK	Software Development Kit: conjunto de herramientas de programación que permite a un desarrollador crear aplicaciones compatibles con un hardware o plataforma específica (en este caso, dispositivos VR).
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles, entidad chilena mencionada como responsable de fiscalizar la comercialización de luminarias.
SSQ (Simulator Sickness Questionnaire).	Cuestionario de Malestar por Simulador, desarrollado por Kennedy, Lane, Berbaum y Lilienthal, que mide síntomas de malestar (náusea, problemas oculomotores, desorientación) tras el uso de un simulador o VR.
Transferencia cognitiva	Fenómeno mediante el cual una persona proyecta automáticamente esquemas mentales y respuestas emocionales del mundo físico al evaluar un entorno virtual.
Unlit draw (modo)	Modo de visualización en Unity que muestra los materiales sin aplicar cálculos de iluminación, útil para depurar geometría y texturas.
URP	Universal Render Pipeline: canal de renderizado de Unity optimizado para rendimiento y compatibilidad con múltiples plataformas, usado en este proyecto por sus requisitos de hardware móvil.
Validez ecológica	Grado en que los resultados obtenidos en un entorno simulado (como VR) son extrapolables o representativos de lo que ocurriría en el entorno físico real.
WebGL / ARKit / OpenXR	Estándares y APIs para ejecutar contenido 3D en navegadores web (WebGL), realidad aumentada en dispositivos Apple (ARKit) y un estándar abierto multiplataforma para hardware VR/AR (OpenXR).

XR	Extended Reality: término paraguas que incluye VR, AR y realidad mixta.
XRI	XR Interaction Toolkit, es el paquete/API nativa de Unity para gestionar la interacción con dispositivos VR

Índice de contenidos.

RESUMEN.	2
ABSTRACT	3
GLOSARIO	4
ÍNDICE DE CONTENIDOS	9
ÍNDICE DE FIGURAS.	11
ÍNDICE DE TABLAS	13
1. INTRODUCCIÓN.	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3. HIPÓTESIS	19
4. OBJETIVOS.	20
5. METODOLOGÍA Y FLUJO DE TRABAJO	21
5.1 META QUEST 3S.	21
5.1.1 EQUIPO PCVR.	21
5.2 UNITY	22
5.3 FLUJO DE TRABAJO.	22
5.4 RECOPIACIÓN DE DATOS	24
6. LIMITACIONES INICIALES	25
7. ESTADO DEL ARTE	26
8. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.	33
8.1 DISEÑO	33
8.2 PROTOCOLO EXPERIMENTAL	35
8.3 PATRONES DE DISEÑO	37
8.3.1 PATRONES DE INTERACCIÓN	37
8.3.2 PATRONES DE CÓDIGO Y SCRIPTING.	37
8.4 ILUMINACIÓN.	38
8.4.1 ILUMINACIÓN AMBIENTE.	38
8.4.2 ILUMINACIÓN PÚBLICA	40

8.4.3 ILUMINACIÓN BAKED.	42
8.5 CONFIGURACIÓN DE PIPELINE DE RENDERIZADO	43
8.6 MODELADO	44
8.6.1 <i>ASSETS</i> DE TERCEROS.	44
8.6.2 ESCENAS.	46
8.7 SONIDO.	48
8.7.1 SONIDO AMBIENTAL.	49
8.8 CONTROL E INTEGRACIÓN VR	50
8.8.1 OBJETO JUGADOR	50
8.9 IMPLEMENTACIÓN DE SOFTWARE.	51
ESTRUCTURA DE PROYECTO	52
ESTRUCTURA DE ESCENA	52
SCRIPTS.	54
VERSIONES DE PAQUETES.	63
REPOSITORIO	63
9. VALIDACIÓN.	65
9.1 PARTICIPANTES Y EXPERIMENTO.	65
9.2 SIMULATOR SICKNESS QUESTIONNAIRE (SSQ).	66
9.3 ENCUESTA DE SATISFACCIÓN Y VALIDEZ DEL AMBIENTE.	71
9.4 ENCUESTA DE SENSACIÓN DE SEGURIDAD.	74
9.4.1 RELACIÓN SSQ - PERCEPCIÓN DE SEGURIDAD	81
9.5 RENDIMIENTO.	88
10. CONCLUSIÓN.	93
REFERENCIAS.	95
ANEXO A	99

Índice de Figuras.

Figura 1: Espectro visible y ubicación de la luz azul dentro del rango de radiación no ionizante.	17
Figura 2: Flujo de trabajo iterativo de desarrollo del ambiente virtual.	23
Figura 3: Sectores del parque simulado con la temperatura respectiva de iluminación, en kelvin.	33
Figura 4: Plano del recorrido del parque simulado con las 3 zonas de iluminación (2000K, 2700K y 4000K)	34
Figura 5: Representación del ángulo de luz direccional global	38
Figura 6: Iluminación y cielo resultantes.	39
Figura 7: Representación de una luz de punto	40
Figura 8: Captura aérea dentro del motor, en orden de izquierda a derecha 2000K, 2700K y 4000K.	41
Figura 9: Captura dentro del motor, en orden de izquierda a derecha 2000K, 2700K y 4000K.	41
Figura 10: Captura aérea dentro del motor, zona de 4000K.	41
Figura 11: Captura dentro del motor, zona de 2700K	42
Figura 12: Captura dentro del motor, zona de 2000K	42
Figura 13: Lightmaps de la escena tras generar la iluminación.	43
Figura 14: Visión aérea de la escena en modo unlit draw	47
Figura 15: Captura de la zona de 2700K en modo unlit draw	47
Figura 16: Captura de la zona de 2000K en modo unlit draw	48
Figura 17: Captura de la zona de 4000K en modo unlit draw	48
Figura 18: Componentes de interacción del Objeto Jugador (VR Player).	50
Figura 19: Distribución de participantes por género y por rango de edad.	65
Figura 20: Distribución de participantes por fecha de sesión.	66
Figura 21: Participantes con síntomas vs. sin síntomas (SSQ).	69
Figura 22: Frecuencia de síntomas individuales del SSQ reportados. ...	70
Figura 23: Frecuencia de casos por subescala del SSQ (Náusea, Oculomotor, Desorientación)	71
Figura 24: Resultados de la dimensión de veracidad del sonido y del ambiente	72
Figura 25: Resultados de la dimensión estética ("El ambiente es bonito")	73
Figura 26: Resultados de la dimensión de facilidad de comprensión ("El ambiente es fácil de entender")	74

Figura 27: Distribución de la sensación de seguridad por condición de CCT (n=94). 77

Figura 28: Dirección del cambio en la seguridad percibida al aumentar la temperatura (2000K → 4000K), n=94 78

Figura 29: Sensación de seguridad media por zona del recorrido. Barras: $\pm$ error estándar. 79

Figura 30: Puntos de medición de rendimiento (entrada 1, salida 2, vegetación 3, trayecto 4) en las 3 zonas de CCT 90

Índice de tablas.

Tabla 1: Límites de Radiancia Espectral en Áreas de Protección Especial.	17
Tabla 2: Límites Generales de Radiancia Espectral.	17
Tabla 3: Comparación de estudios de VR aplicados a percepción lumínica y seguridad peatonal	29
Tabla 4: Instrumento de encuesta de sensación de seguridad (protocolo experimental).	36
Tabla 5: Especificaciones de la luz direccional global.	38
Tabla 6: Configuración de iluminación ambiental (cielo, ecuador y suelo).	39
Tabla 7: Configuración de niebla (fog)	39
Tabla 8: Especificaciones de las luces de punto por zona de CCT.	40
Tabla 9: Assets de terceros utilizados en el ambiente	44
Tabla 10: Grabaciones utilizadas para el sonido ambiental	49
Tabla 11: Configuración del Continuous Move Provider	50
Tabla 12: Configuración del Continuous Turn Provider	51
Tabla 13: Configuración del Snap Turn Provider.	51
Tabla 14: Escala de severidad de los síntomas del SSQ.	67
Tabla 15: Distribución de los síntomas del SSQ por subescala.	67
Tabla 16: Escala de interpretación del puntaje total del SSQ	69
Tabla 17: Instrumento de encuesta Likert de satisfacción y validez del ambiente	71
Tabla 18: Instrumento de encuesta de sensación de seguridad (aplicado)	75
Tabla 19: Estadísticos descriptivos de sensación de seguridad por zona de CCT	76
Tabla 20: Media y porcentaje de inseguridad reportado por condición de CCT.	79
Tabla 21: Resultados de la prueba de Wilcoxon para comparación pareada entre condiciones de CCT.	80
Tabla 22: Puntaje SSQ medio y mediano según la dirección del cambio en seguridad	81
Tabla 23: Correlación de Spearman entre subescalas del SSQ y el cambio de seguridad (2000K a 4000K)	82
Tabla 24: Correlación de Spearman entre SSQ y sensación de seguridad por condición de CCT.	83
Tabla 25: Rangos de complejidad gráfica según tipo de simulación.	89

Tabla 26: Draw calls y conteo de triángulos medidos por zona y punto de medición 90

Tabla 27: Matriz de cumplimiento de los objetivos. 92

1. Introducción.

La iluminación pública tiene un gran impacto en el funcionamiento de los ecosistemas, el desarrollo de la astronomía, la seguridad vial, la vida social nocturna y la percepción de comodidad y seguridad de los espacios urbanos. En Chile se encuentra actualmente regulada por la nueva norma lumínica (D.S. N°1/2022 MMA), publicada en 2023 y en vigencia desde octubre de 2024. La norma tiene un gran énfasis en la cobertura nacional, protección de la biodiversidad, reducción del impacto en el cielo nocturno, limitación de la emisión de luz azul y la temperatura de color correlacionada de las fuentes de luz o CCT (Correlated Color Temperature). Sin embargo, la norma no considera cómo los cambios de iluminación pueden impactar la sensación de seguridad.

A partir de este contexto, este trabajo plantea desarrollar un ambiente virtual que replique una zona urbana nocturna con variaciones en la temperatura de la iluminación pública, que permita explotar la capacidad de la tecnología VR de sustituir los estímulos visuales y auditivos del ambiente físico por los del ambiente virtual, y de ofrecer una interacción motriz realista en las manos y cabeza, para generar en el usuario un estado de inmersión que lleva a que se comporte y reaccione como si estuviera físicamente al interior del ambiente virtual simulado, pese a estar intelectualmente consciente de lo contrario. Esta propiedad permite que los datos fisiológicos o de comportamiento adquiridos sobre el usuario en el ambiente virtual sean también extrapolables a un ambiente físico. El ambiente se podrá utilizar en un contexto experimental para estudiar la forma en que las distintas temperaturas de iluminación impactan la sensación de seguridad y comportamiento del usuario, lo que permite generar datos experimentales de manera eficiente, controlada y segura.

Para la construcción y renderizado del ambiente virtual se utilizará el motor gráfico Unity, en conjunto con la extensión XR Plugin para el manejo de compatibilidad con dispositivos VR y preparación para un despliegue específicamente en plataformas de la línea Meta Quest con capacidad de escalabilidad a otros sistemas.

2. Planteamiento del problema.

En abril de 2019 se inició un proceso para actualizar la norma que rige la instalación de luminaria pública nacional y reemplazar el Decreto Supremo N°43/2012 por la nueva norma lumínica D.S. N°1/2022 [10], buscando crear una legislación que combata la creciente contaminación lumínica que afectaba la salud y biodiversidad. Sus principales puntos fueron:

- Alcance de la extensión de aplicación territorial a todo el territorio nacional.
- Incorporación de la biodiversidad, salud humana y calidad astronómica del cielo como objetos de protección ambiental.
- Restricción de la emisión de luz azul que favorece la iluminación cálida, de un 15% previo a un 7% o 1% en áreas de protección especial definidas como:
 - Áreas con valor para la observación astronómica.
 - Áreas de protección de biodiversidad o protegidas.
 - Zonas de reproducción y comunas con mayor impacto en el plan de recuperación, conservación y gestión de especies (RECOGE) amenazadas por contaminación lumínica.
- Incorporación del control de la comercialización de luminarias por parte de la SEC.
- Aplicación diferenciada a fuentes emisoras de luz según ubicación geográfica.

[10]

La restricción principal en la que se centra este estudio es la política de limitación de emisión de luz azul, que corresponde a las luces que se encuentran dentro del rango de ondas cortas del espectro visible entre 400 nm y 500 nm aprox. [17]. La norma IEC 62471, que evalúa la seguridad fotobiológica de lámparas y sistemas de lámparas, pondera el riesgo por luz azul con una función que alcanza su máximo cerca de los 440 nm [22].

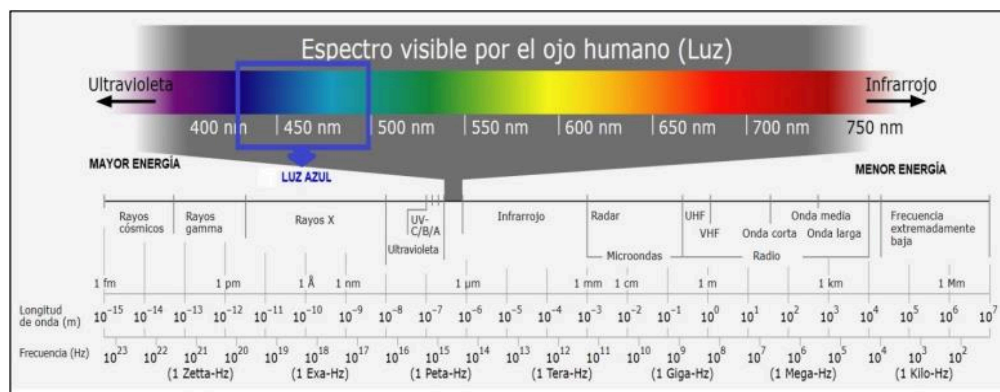


Figura 1: Espectro visible y ubicación de la luz azul dentro del rango de radiación no ionizante.

Fuente: [17]

Las limitaciones quedan explicitadas en el artículo 5 “Límites para alumbrado peatonal, vehicular e industrial” punto 3 “Radiancia espectral”, que plantea que la instalación de luminarias no puede superar los límites impuestos por las siguientes tablas.

Tabla 1: Límites de Radiancia Espectral en Áreas de Protección Especial.

Fuente: [18]

Tabla 2: Límites Generales de Radiancia Espectral.

Fuente: [18]

Tabla 2 Límites de Radiancia Espectral en Áreas de Protección Especial

Radiancia espectral	Límites Máximos Permisibles
300 nm a 379 nm	1% radiancia espectral del Rango Visible
380 nm a 499 nm	1% radiancia espectral del Rango Visible
781 nm a 1000 nm	10% radiancia espectral del Rango Visible

Nota: Rango Visible corresponde a la porción del espectro entre 380 nm y 780 nm.

Tabla 3 Límites Generales de Radiancia Espectral

Radiancia espectral	Límites Máximos Permisibles
300 nm a 379 nm	1% radiancia espectral Rango Visible
380 nm a 499 nm	7% radiancia espectral Rango Visible
781 nm a 1000 nm	10% radiancia espectral Rango Visible

Nota: Rango Visible corresponde a la porción del espectro entre 380 nm y 780 nm.

Las luces que emiten radiación dentro de este espectro tienen un efecto negativo en la biodiversidad al impactar orientación, migración, reproducción y alimentación de aves, murciélagos o insectos; en las personas al interrumpir el ritmo circadiano y suprimir la melatonina y en la calidad astronómica de los cielos nocturnos donde tienen un mayor impacto que otros rangos de radiancia.

Para cumplir con este límite de radiación se recurre a luces de temperatura más baja y color más cálido (sub 3000K, amarillentas) en la instalación. La temperatura de la iluminación tiene un impacto psicológico al influir en la visibilidad, concentración y estado de ánimo. Se considera que las luces más cálidas son más “acogedoras” en espacios interiores; sin embargo, en espacios exteriores iluminados por el alumbrado peatonal se considera que estas tienen un impacto negativo en la seguridad al reducir considerablemente la visibilidad con relación a luces con temperaturas más frías. Es con esto que llegamos al problema principal que explora este trabajo: existe una extensiva documentación del impacto en los ecosistemas, descanso, calidad astronómica del cielo y rendimiento energético, pero no del impacto psicológico en la sensación de seguridad de transeúntes.

3. Hipótesis.

Es posible estudiar el impacto psicológico descrito en la introducción explotando la capacidad de la tecnología VR de generar inmersión. En un ambiente virtual, inmersión se define como la capacidad de producir una sensación de presencia, la sensación del usuario de estar ahí. La capacidad de un ambiente virtual de generar presencia recae en la capacidad de "remover la mayor cantidad de sensaciones del mundo real posible y sustituirlas con aquellas sensaciones correspondientes al ambiente virtual". La presencia generalmente se asocia con experiencias recreativas, artísticas o sociales, pero también tiene aplicaciones prácticas como en la capacitación, diseño, terapia y estudios psicológicos. Esto se debe a que la presencia "suele ser concebida como un signo de la "validez ecológica" de los dispositivos VR, también un signo de potencial transferencia positiva de habilidades o conocimientos aprendidos en VR al mundo real".

[19]

La presencia se considera un indicio, aunque no una garantía, de validez ecológica [19]. Por ello, el ambiente se propone como herramienta para explorar la siguiente hipótesis, cuyos resultados requerirían confirmación en entornos físicos:

1. La iluminación cálida (menor a 3000K) genera mayor sensación de inseguridad que las luces frías (mayor o igual a 4000K) en transeúntes que recorren ambientes urbanos al aire libre.

4. Objetivos.

Para explorar dicha hipótesis se plantea el siguiente objetivo general:

- Desarrollar experimentalmente un entorno inmersivo en realidad virtual para evaluar la percepción de seguridad peatonal bajo distintas temperaturas de color del alumbrado público.

Para desarrollar un ambiente de calidad que cumpla con las necesidades del estudio se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Recrear valores lumínicos de alumbrado público en el modelo de iluminación de Unity URP que al menos 70% de los usuarios consideren veraz.
- Construir una escena coherente e intuitiva que cumpla patrones de diseño de aplicaciones VR que al menos un 70% de usuarios evalúen como fácil de entender y bonita.
- Mantener los draw calls y el conteo de triángulos por cuadro de cada escena dentro de los rangos oficiales de Meta para Quest 3S en categoría de Simulación Ligera a Media.

5. Metodología y flujo de trabajo.

La metodología del desarrollo se asienta sobre 2 herramientas principales: Unity y Meta Quest 3S.

5.1 Meta Quest 3S.

Las lentes utilizadas para desarrollo, validación y experimentación son el modelo Meta Quest 3S principalmente por su disponibilidad en el inventario de la universidad. El ambiente se desplegará a través del Meta Quest Link en formato PCVR. El renderizado y la lógica del ambiente funcionarán paralelamente en el hardware del equipo conectado.

Este modelo presenta las siguientes especificaciones:

- Resolución por ojo y frecuencia de actualización: 1.832 x 1.920 a 72 Hz, 90 Hz o 120 Hz.
- Campo de visión en grados: 110° horizontal, 96° vertical.
- Peso, comodidad y cantidad de componentes: 515 g, completamente integrado, amarras simples, batería autosuficiente.
- Sensores: 4 cámaras de reconocimiento térmico y 2 cámaras RGB con modelo de visión computarizada y aprendizaje automático.
- Precio: 500 USD.
- Compatibilidad con herramientas de desarrollo: mediante *SDK* o *plugin XR*.
- Procesador: Qualcomm Snapdragon XR2 Gen 2.
- Memoria RAM: 8 GB.
- Memoria de almacenamiento: 128 GB o 512 GB.
- Audio interno o externo: interno.

[11]

5.1.1 Equipo PCVR.

Dado que el ambiente se ejecutó en modalidad PCVR mediante Meta Quest Link, el renderizado y la lógica de la simulación se procesaron en el computador del laboratorio, con las siguientes especificaciones:

- Procesador (CPU): Intel Core i7-14700.
- Tarjeta gráfica (GPU): NVIDIA GeForce RTX 4060 con 8 GB de VRAM.
- Memoria RAM: 16 GB DDR5-5600.

La integración PCVR fue manejada con el software oficial de meta Meta Horizon Link en su versión 83.0.

5.2 Unity.

Unity en su versión 6000.2.9f1 (versión estable más reciente con soporte VR) es el motor gráfico utilizado para el desarrollo del ambiente.

- Capacidad de renderizado en 3D: Sí.
- Manejo de iluminación realista: Sí.
- Lenguaje de script: C#.
- Integración con VR: API nativa.
- Plataformas compatibles: iOS, Android, Windows, Mac, Linux, PlayStation, Xbox, Nintendo Switch, WebGL, ARKit, Meta Quest, Apple visionOS, PlayStation VR2 y otros lentes OpenXR.
- Disponibilidad de *assets*: tienda de *assets*.
- Precio: licencia gratuita.

Unity destaca por su compatibilidad multiplataforma que incluye casi la totalidad del mercado VR; esto permite al ambiente adaptarse a la mayoría de las plataformas para la fase de experimentación.

[20]

[21]

[12]

5.3 Flujo de trabajo.

Al depender este trabajo de la experiencia del usuario para recabar los datos necesarios y los riesgos de mareo o náuseas que acarrea la utilización de VR, se plantea un ciclo de trabajo iterativo que permita tener una validación constante del desarrollo, por lo que el flujo de trabajo se considera dentro de 4 etapas, 2 estáticas y 2 iterativas.

1. Asesoría con expertos y diseño inicial.
 - Mantener reuniones con expertos en el área para coincidir en un diseño de alto nivel que cumpla con las necesidades del estudio y sea alcanzable, además de decidir metodologías y flujos de trabajo.
2. Desarrollo.

- Programación y construcción del ambiente en el motor Unity, en conjunto con pruebas constantes con equipamiento VR.
3. Prueba con usuarios.
- Pruebas en vivo supervisadas con usuarios a quienes se introduce en el ambiente virtual y se les pedirá que realicen todo el recorrido; se solicitará retroalimentación abierta y las siguientes encuestas de validación:
 - Test Likert de satisfacción.
 - *Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)*.
 - Se discuten resultados con expertos y se decide si volver a la fase de desarrollo para implementar la retroalimentación para nuevas pruebas o pasar a la experimentación.
4. Implementación en contexto de experimentación.
- Emplear el ambiente en demografías variadas, acompañado de instrumentos estadísticos que permitan evaluar el impacto sobre sensación de seguridad y probar o desmentir la hipótesis.

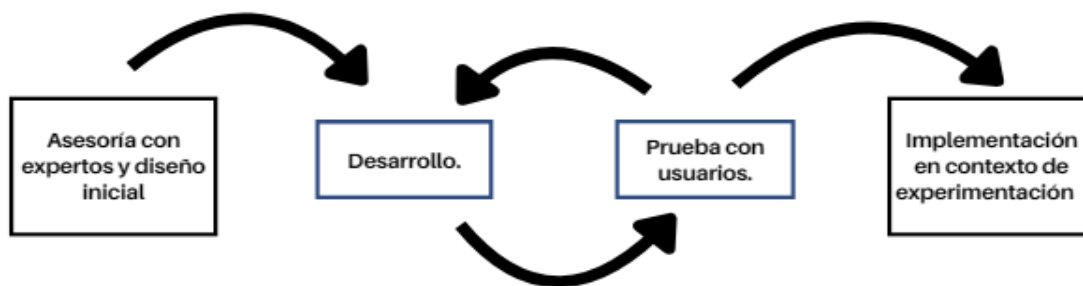


Figura 2: Flujo de trabajo iterativo de desarrollo del ambiente virtual.

Fuente: Elaboración propia.

5.4 Recopilación de datos.

Las tres encuestas aplicadas a los participantes (Simulator Sickness Questionnaire, satisfacción/validez del ambiente, y sensación de seguridad) se administraron en formato de hoja impresa, que cada participante completó manualmente y de forma individual, inmediatamente después de retirarse las gafas VR. No se utilizó ningún sistema de captura digital embebido en el ambiente virtual ni formulario en línea durante la sesión.

Una vez finalizadas todas las sesiones experimentales, las hojas de respuesta impresas se almacenaron en un espacio de acceso restringido y se digitalizaron manualmente en una planilla Excel a la que solo tuvo acceso la autora. Los datos de identificación (nombre y correo electrónico) se eliminaron de la planilla y se reemplazaron por un código correlativo (P01–P94), asignado a los 94 participantes incluidos en el análisis. Durante la digitalización, los ítems del SSQ dejados en blanco se codificaron como 0 («sin síntoma»). Esta planilla constituye la base de datos utilizada en los análisis reportados en las Secciones 9.1 a 9.4.1.

El análisis estadístico sobre esta planilla (estadísticos descriptivos, prueba de Wilcoxon signed-rank, prueba U de Mann-Whitney, correlación de Spearman y d de Cohen) se realizó mediante un script en Python, incluido al final de la Sección 9.4.1.

6. Limitaciones iniciales.

El desarrollo experimental presentó las siguientes limitaciones:

1. Falta de un artista 3D profesional:
 - Al no contar con un artista 3D que pueda crear modelos, texturas o materiales personalizados, el desarrollo se limita a los assets disponibles en la tienda de Unity.
2. Hardware VR:
 - Se empleó el Meta Quest Link en modalidad PCVR en lugar de un despliegue nativo en el dispositivo. Esto implica que el renderizado fue ejecutado por la GPU del computador conectado y no por el chipset de la Meta Quest 3S. Queda pendiente como línea de trabajo futura el desarrollo en un formato nativo autónomo.
 - Pipeline URP empleada para aplicaciones VR no posee iluminación físicamente modelada. La evaluación de los niveles de iluminación corresponde únicamente a condiciones visuales aproximadas con CCT nominal y no a una calibración fotométrica física de alumbrado público.

7. Estado del arte.

El análisis de las metodologías utilizadas para evaluar la influencia del diseño lumínico sobre la psicología humana muestra un uso creciente de la realidad virtual (VR) en entornos experimentales. Tradicionalmente, la medición de factores como el riesgo de accidentes o la percepción de seguridad se realizaba mediante estudios de campo directos [6]. No obstante, la investigación empírica en entornos físicos enfrenta limitaciones metodológicas: la dificultad de controlar variables ambientales fluctuantes y concurrentes, como el tráfico vehicular, la nubosidad y el ruido urbano, que impiden aislar el efecto de las propiedades físicas de la luz artificial [4].

Frente a estas restricciones, la tecnología VR se ha convertido en una herramienta útil para la investigación arquitectónica y el diseño vial preventivo [7], [4]. Con estos sistemas, los investigadores pueden manipular de forma controlada variables como la iluminancia, la presencia de fuentes de luz y la temperatura de color correlacionada (CCT) [1], [4], [8].

A partir de los principios de la iluminación centrada en el ser humano (HCL), Ronft et al. [5] propusieron el marco de Iluminación Virtual Centrada en el Ser Humano (HCVL) para optimizar la experiencia del usuario en espacios digitales. Según los autores, sus resultados muestran una transferencia cognitiva de los efectos de la iluminación desde los espacios físicos a los virtuales. Ronft et al. [5] evaluaron estos principios en dos experimentos con 12 imágenes estáticas de oficinas virtuales (stands de exposición y salas de reuniones), presentadas en pantallas convencionales y no en visores de realidad virtual. En el primero, 95 participantes de 22 nacionalidades respondieron en línea desde sus propios dispositivos, sin control del brillo ni de la luz ambiente. En el segundo, 106 estudiantes universitarios observaron las mismas imágenes en monitores calibrados idénticos, bajo iluminación controlada. En ambos experimentos, los participantes distinguieron la luz cálida de la fría, lo que confirma que la manipulación fue percibida, y evaluaron las imágenes con luz cálida como más relajantes, menos estimulantes y amplias. Solo en condiciones de laboratorio la luz cálida se percibió además más bella, agradable y con menos deslumbramiento, mientras que otros atributos, como la luminosidad, el orden visual y la privacidad, mostraron resultados opuestos entre ambos experimentos. La luz diurna se percibió en los dos experimentos más bella, luminosa y amplia que la iluminación artificial

del recinto, y fue la condición preferida en el cuestionario de preferencias [5].

La relación entre el color de la luz y la percepción del ambiente también se ha estudiado en interiores. Chinazzo et al. [2] combinaron estímulos térmicos reales con estímulos visuales en VR para evaluar la interacción entre la temperatura del aire (24 y 29 °C) y el color de la luz natural simulada a través de vidrios naranja, azul y neutro. Cada uno de los 57 participantes fue expuesto a una sola combinación de color y temperatura. El color de la luz modificó la percepción térmica, y la aceptabilidad del espacio dependió tanto del color como de la temperatura, pero el color no tuvo efectos sobre las respuestas fisiológicas (frecuencia cardíaca, conductancia y temperatura de la piel) [2]. Por su parte, Du et al. [3] simularon en VR tres configuraciones lumínicas comunes de un aula universitaria y registraron movimiento ocular y respuestas fisiológicas. Estas medidas se relacionaron con la percepción general del ambiente, pero no distinguieron con claridad los cambios de CCT. En cambio, la percepción subjetiva sí respondió a la CCT: a menor CCT, mayor calidez percibida, y con 4500 K el espacio se percibió más luminoso, amplio y relajado [3].

Masullo et al. [1] llevaron este enfoque a un espacio exterior: los participantes observaron, sentados y desde un punto fijo, un parque real de Aversa (Italia) modelado en VR, bajo nueve combinaciones de tres CCT (2500, 4500 y 6500 K) y tres niveles de flujo luminoso, mientras se registraban su mirada y su actividad pupilar. El estudio no midió la seguridad de forma directa: evaluó la calidad percibida de la iluminación, y la percepción de peligro solo se infiere de una de sus dimensiones, asociada al confort. Los autores concluyeron que la iluminancia influye más que la CCT en la calidad percibida de la iluminación: la CCT afectó solo dos ítems del cuestionario y no tuvo efecto principal en el diámetro pupilar ni en la carga cognitiva, aunque sí interactuó con la iluminancia. Según sus conclusiones, una CCT baja con iluminancia intermedia favorecería la accesibilidad percibida del parque [1].

La estructuración de un entorno urbano seguro durante la noche se vincula con la Prevención del Delito a través del Diseño Ambiental (CPTED), marco en el que la iluminación favorece la visibilidad y la vigilancia natural [6]. Además, el alumbrado nocturno contribuye a la estabilidad emocional y al confort de las personas [4]. Mediante una calle residencial de baja altura de Seúl modelada en VR, Son et al. [4]

evaluaron el miedo al delito de 100 adultos jóvenes, con una edad media de 23,6 años, en ocho horarios entre las 18:00 y las 22:30, antes y después del ocaso. Los análisis mostraron que el miedo aumenta al disminuir la luz natural, especialmente poco después del ocaso; que el efecto de la luz natural se reduce al encenderse el alumbrado público; y que, desde las 20:30, el miedo depende de la proporción de luces interiores encendidas en los edificios [4]. Un estudio de campo realizado por Ceccato et al. [6] en una estación del metro de Estocolmo aplicó filtros sobre las luminarias existentes y evaluó la seguridad percibida de 92 personas: 67 estudiantes y 25 personas con discapacidad visual de 40 a 70 años. En los andenes, ni la reducción del 30% de la intensidad de la luz blanca neutra (4000 K) ni los filtros de color con una reducción similar cambiaron significativamente la seguridad percibida. En los pasillos, más estrechos, los filtros de color con reducciones de intensidad cercanas al 60%, tanto ámbar (2000 K) como azul (24.000 K), redujeron la seguridad percibida en un 17%. Las personas con discapacidad visual reportaron sistemáticamente menor seguridad. Los autores advierten que el color y la intensidad quedaron confundidos, por lo que no es posible aislar el efecto de la CCT [6].

Finalmente, la percepción de riesgo no solo se manifiesta en encuestas, sino también en el comportamiento peatonal. En una calle residencial de 8 metros de ancho simulada en VR, con y sin vereda segregada, Kwon et al. [7] variaron seis atributos del entorno: el tipo de calle, las barreras visuales, los patrones geométricos, la señalización en el pavimento, el límite de velocidad y la iluminación diurna o nocturna. A diferencia de este trabajo, la variable de interés fue el riesgo percibido de atropello y no la seguridad frente al delito. Con 200 participantes y modelos de regresión de efectos aleatorios y de ecuaciones estructurales multinivel (MSEM), encontraron que las barreras visuales aumentaron el riesgo percibido, que los patrones geométricos y la señalización lo redujeron, y que la condición nocturna lo aumentó en el modelo estructural. Estos efectos variaron según el tipo de calle. El riesgo percibido medió la relación entre el entorno y el comportamiento de cruce: quienes percibieron más riesgo tardaron más en decidir cruzar y cruzaron con mayor prisa [7]. La selección muestra un precedente internacional relevante, con estudios en Europa y Asia, pero ninguno en el contexto chileno ni vinculado a la norma D.S. N°1/2022, que limita el contenido de luz azul del alumbrado exterior y, en la práctica, favorece fuentes de menor CCT. Además, la mayoría de los estudios recurre a la VR para controlar las condiciones de iluminación,

y cuatro de ellos la aplican al estudio de la percepción en espacios urbanos exteriores [1], [4], [7], [8].

Tabla 3: Comparación de estudios de VR aplicados a percepción lumínica y seguridad peatonal.

Fuente: Elaboración propia, a partir de [1]–[8].

Año	Tecnología	Variable Lumínica	Tamaño de muestra	Métricas	Hallazgos	Limitaciones
Masullo et al., 2023 [1]	Parque urbano real modelado en VR (Aversa, Italia), con HTC Vive Pro Eye y Unreal Engine 4.26, eye-tracking integrado. Participante sentado, sin locomoción.	CCT (2500K/4500K/6500K) cruzada con flujo luminoso (250/500/1000 lm): 9 escenarios.	N=26	Cuestionario POLQ (PSQ/PCQ), fijaciones oculares, diámetro pupilar e índice de actividad pupilar (IPA).	La iluminancia influye más que la CCT. La CCT no tuvo efecto principal en la pupila ni en la carga cognitiva (IPA), pero sí interactuó con la iluminancia.	Muestra pequeña (N=26), sin locomoción (vista fija), y HMD que reproduce un rango de luminancia limitado frente a condiciones reales (limitación reconocida por los autores).
Chinazzo et al., 2021 [2]	Oficina con estímulos térmicos reales y luz natural simulada en VR (montaje híbrido); cada participante vio una sola combinación de color y temperatura.	Color de la luz natural filtrada por vidrios naranja, azul y neutro, cruzado con temperatura del aire (24 y 29 °C). No manipula CCT de luz artificial.	N=57	Percepción térmica, visual y global; aceptabilidad; frecuencia cardíaca, conductancia y temperatura de la piel.	El color de la luz modificó la percepción térmica y la aceptabilidad del espacio; el color de la luz no afectó las respuestas fisiológicas.	Entorno interior, no exterior ni peatonal. La variable dependiente es el confort, no la seguridad.
Du et al., 2023 [3]	Aula universitaria simulada en VR.	Tres configuraciones lumínicas comunes de aula; solo se informa una CCT (4500 K) pero utiliza otras en conclusiones.	N y perfil de participantes no reportados en el resumen.	Percepción subjetiva, diámetro pupilar, frecuencia de sacadas, variabilidad cardíaca (LF/HF) y conductancia de la piel.	A menor CCT, mayor calidez percibida; con 4500 K el espacio se percibió más luminoso y relajado. Los datos oculares y fisiológicos no distinguieron la CCT.	Contexto educativo interior; no aborda seguridad peatonal exterior.
Son et al., 2024 [4]	Calle residencial de baja altura de Seúl	Luz natural, encendido de postes y proporción	N=100 adultos jóvenes (edad	Miedo al delito propio y de terceros	El miedo aumenta al disminuir la luz natural; el	No manipula CCT directamente. La cohorte homogénea (adultos jóvenes)

	modelada en VR (Unity, HTC Vive Pro).	de luces interiores de edificios según la hora; no CCT.	media 23,6 años; cada uno expuesto a 4 de 8 ambientes, asignación aleatoria).	(escala de 7 puntos); regresión logística ordinal.	alumbrado público reduce ese efecto y, más tarde, influyen las luces interiores de los edificios.	limita la generalización a otros grupos etarios.
Ronft, Beck & Lachmann, 2025 [5]	Renderizados de espacios virtuales vistos en pantalla (no visor VR). Dos experimentos: entorno real no controlado y laboratorio. Marco HCVL.	CCT cálida (aprox. 2300 K) vs. fría (aprox. 8000 K), con y sin luz natural virtual.	N=95 (Exp. 1) y N=106 (Exp. 2)	Escala de diferencial semántico: calidez, luminosidad, amplitud, belleza, agrado, deslumbramiento y preferencia.	En ambos experimentos, la luz cálida se percibió más relajante, menos estimulante y amplia; solo en laboratorio, además más bella, agradable y con menos deslumbramiento. La luz natural virtual fue la condición preferida.	Imágenes estáticas en pantalla, sin inmersión. No aborda seguridad peatonal ni contexto urbano exterior.
Ceccato et al., 2025 [6]	Estación de metro real en Estocolmo, estudio de campo (no VR), con filtros sobre luminarias existentes.	Intensidad (atenuación de 30% y cercana a 60%) y color (filtros ámbar de 2000 K y azul de 24.000 K).	N=92 (67 estudiantes y 25 personas con discapacidad visual de 40 a 70 años)	Seguridad y atributos de la iluminación autorreportados; MANOVA de medidas repetidas y regresión.	Atenuar 30% la luz neutra en andenes no cambió la seguridad; los filtros de color con atenuación cercana a 60% la redujeron 17% en pasillos. Menor seguridad en personas con discapacidad visual.	Estudio de campo, no VR. Color e intensidad quedaron confundidos (reconocido por los autores). Una sola medición por participante.
Kwon et al., 2022 [7]	Calle residencial simulada de 8 m de ancho (Corea), con Unity y HTC Vive Pro.	Seis atributos del entorno: tipo de calle, barreras visuales, patrones geométricos, señalización, límite de velocidad e iluminación diurna o	N=200 estudiantes (21 a 39 años)	Riesgo percibido de atropello, tiempo de espera y reacción, velocidad de cruce y gait variability; regresión de efectos aleatorios y MSEM.	Las barreras visuales aumentaron el riesgo percibido y los patrones geométricos y la señalización lo redujeron; el riesgo medió el comportamiento de cruce y la noche lo aumentó.	No manipula CCT. Depende de un cuestionario de seguimiento para identificar atributos visuales (posible sesgo de autopercepción).

		nocturna; no CCT.				
Maciejewski, 2020 [8]	Plaza de Pakość (Polonia) modelada en VR, con HTC Vive.	CCT del alumbrado público (3000, 5000 y 6500 K).	N=10 (23 a 35 años)	Preferencia de seguridad personal en comparaciones por pares, con orden contrabalanceado.	Los participantes se sintieron más seguros con las CCT más altas (6500 K frente a 3000 K: 15 contra 5 preferencias).	Muestra muy pequeña. Publicado en una revista técnica (Czasopismo Techniczne) de menor indexación que el resto de esta tabla.

Este contraste metodológico revela un patrón relevante para el presente trabajo. Tres estudios manipulan explícitamente la CCT en contextos comparables: Masullo et al. [1], en un parque urbano en VR con tres CCT cruzadas con tres niveles de flujo luminoso; Ronft et al. [5], con renderizados vistos en pantalla; y Maciejewski [8], en una plaza modelada en VR. Du et al. [3] también varían la CCT, pero en un aula interior. El resto investiga variables lumínicas relacionadas pero distintas: luz natural, encendido de postes y luces de edificios (Son et al. [4]), atributos del entorno con iluminación diurna o nocturna en relación con el riesgo de atropello (Kwon et al. [7]), intensidad y color sin aislar la CCT (Ceccato et al. [6]) o el color de la luz natural en un interior (Chinazzo et al. [2]). Ceccato et al. [6] es el único estudio de campo, Ronft et al. [5] utiliza imágenes en pantalla y los demás emplean VR inmersiva. Masullo et al. [1] es el antecedente más cercano en diseño, aunque difiere en aspectos relevantes: participantes sentados y sin locomoción, una muestra de 26 personas, medición de la calidad percibida de la iluminación y no de la seguridad, y un parque italiano. Maciejewski [8] es el antecedente más similar en la variable y la medida: manipula la CCT del alumbrado público en VR y evalúa la seguridad percibida, con participantes de pie en un punto fijo y orden contrabalanceado. Sus participantes se sintieron más seguros con CCT altas, en la misma dirección de la hipótesis inicial de este trabajo, aunque con una muestra de solo 10 personas. Frente a estos antecedentes, el aporte de este trabajo está en la combinación de un recorrido peatonal continuo por tres zonas de distinta CCT, la sensación de seguridad como variable de interés, un rango de CCT acotado a valores relevantes para la norma chilena (2000–4000 K) y una muestra

de 94 participantes de 19 a 77 años, mayor que la de los estudios en VR que manipulan la CCT.

8. Propuesta de solución.

Para abordar la brecha de estudio del impacto de la norma en la sensación de seguridad y evaluar la hipótesis, se plantea el desarrollo de un ambiente VR que permite estudiar el efecto del cambio de temperatura en la iluminación pública sobre un transeúnte.

El ambiente debe resultar inmersivo para el usuario, tener un contexto urbano, implementar cambios en la temperatura de la luz de manera natural, permitir al usuario tránsito libre y mantenerse dentro de las limitaciones de desarrollo.

La experiencia del usuario en el ambiente debe tener un impacto en su sensación de seguridad manteniendo la duración entre los 3 y 5 minutos para asegurar una toma de datos eficiente y evitar el desarrollo de síntomas adversos de simulador debido a la larga exposición a gafas VR.

8.1 Diseño.

Teniendo en cuenta los factores previamente nombrados se eligió el tránsito por un parque urbano durante el horario nocturno como el contexto del ambiente virtual.

Un parque permite mantener el contexto dentro de un área urbana sin las complicaciones que resultan de tener que modelar e implementar automóviles, lo que facilita mantenerse dentro de las limitaciones del proyecto. Además, el parque permite el movimiento libre del usuario dentro de márgenes bien delimitados pero orgánicos en el contexto.

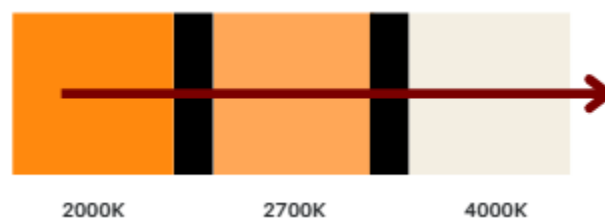
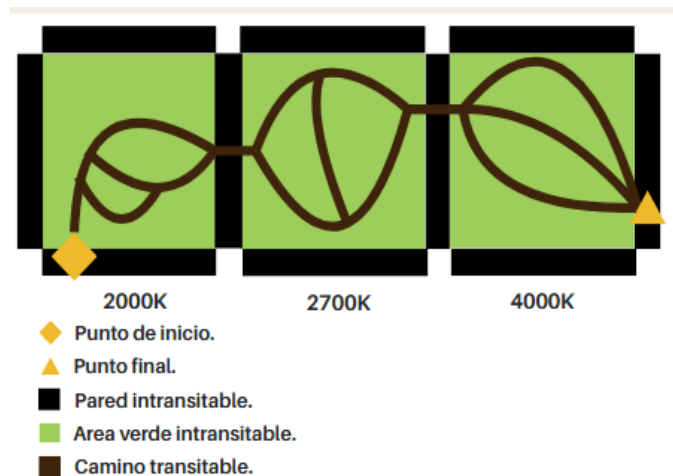


Figura 3: Sectores del parque simulado con la temperatura respectiva de iluminación, en kelvin.

Fuente: Elaboración propia.



El diagrama anterior describe el diseño desde una perspectiva de alto nivel. El parque cuenta con 3 zonas separadas por paredes. Esto permite la transición natural entre los 3 niveles de iluminación mientras que el usuario avanza en el recorrido del ambiente hasta un punto final donde terminará la prueba.

Figura 4: Plano del recorrido del parque simulado con las 3 zonas de iluminación (2000K, 2700K y 4000K).

Fuente: Elaboración propia.

La simulación cuenta con un trazado de caminos de tierra basado en parques de la Quinta Región como Plaza Vergara, Parque Italia y Plaza Colombia, pero manteniendo una estructura lineal que el usuario pueda completar en 3 minutos.

Este diseño prioriza la inmersión, pero tiene una limitación metodológica: el orden de las condiciones fue fijo. Por eso, la CCT de cada zona queda confundida con al menos cuatro factores: el orden de presentación; el tiempo acumulado en la simulación, con efectos como la fatiga, el malestar o la cibercinetosis; las características espaciales de cada zona; y los eventos sonoros del recorrido. En consecuencia, los resultados se interpretan como diferencias entre zonas sucesivas y no como efectos causales de la CCT, y el ambiente queda limitado a un uso exploratorio. Como trabajo futuro, aleatorizar o contrabalancear el orden de las condiciones permitiría estudiar con más solidez la relación causal entre CCT y sensación de seguridad.

8.2 Protocolo experimental.

Para obtener información exploratoria sobre la hipótesis, el objetivo es obtener una muestra experimental cercana a 100 participantes. Por la disponibilidad y seguridad del hardware, las pruebas se realizarán completamente dentro de la sede de Viña del Mar de la Universidad Técnica Federico Santa María. A fin de reunir a las personas necesarias manteniendo una diversidad demográfica y particularmente de edad, se realizó un llamado voluntario abierto a cualquier estamento. Los criterios de exclusión fueron estar previamente familiarizado con el diseño o el desarrollo del experimento, o presentar previamente síntomas relacionados con los efectos adversos por simulador.

Previo al inicio de la prueba, el participante debía leer y firmar un documento de consentimiento informado para aceptar participar del estudio y permitir el uso de sus datos exclusivamente en un contexto de investigación y publicación por parte del equipo de investigación.

Las pruebas se realizaron en una sala aislada con un participante a la vez, para minimizar posibles estímulos auditivos externos a la simulación que menoscaban la sensación de inmersión. Acompañando al participante se encuentra un supervisor, que lo guía por el proceso de habituación a los controles y la simulación, y explica que para finalizar la prueba tiene que recorrer la totalidad del camino del ambiente, además de poder intervenir en caso de confusión o la manifestación de alguno de los síntomas de malestar por la simulación.

El procedimiento constó de 3 partes. Primero, al participante se le explica su objetivo dentro de la simulación, el esquema de controles y se colocan las gafas de forma que estén firmes y cómodas con ayuda del supervisor. El participante tendrá un tiempo de no más de un minuto dentro de una escena vacía para habituarse a la sensación de la simulación y luego el supervisor iniciará la simulación del ambiente experimental.

Luego el participante realiza el recorrido dentro del simulador; el supervisor debe mantenerse en silencio y sin hacer ruido, solo respondiendo dudas que podría tener el participante para la correcta finalización del escenario. La prueba se detenía de inmediato si el participante lo solicitaba o si el supervisor observaba signos de malestar intenso. Ningún participante debió interrumpir la prueba.

Por último, el participante se retira las gafas y tendrá que responder encuestas de síntomas de malestar asociados a la VR (SSQ), de satisfacción y validez del ambiente, y de sensación de seguridad (Tabla 4).

Tabla 4: Instrumento de encuesta de sensación de seguridad (protocolo experimental).

Fuente: Elaboración propia.

	Inseguro/a	Incómodo/a	Neutral	Cómodo/a	Seguro/a
¿Qué tan seguro se sintió en el primer escenario? (2000 kelvin)					
¿Qué tan seguro se sintió en el segundo escenario? (2700 kelvin)					
¿Qué tan seguro se sintió en el tercer escenario? (4000 kelvin)					

La escala de cinco puntos fue elaborada para este trabajo y no corresponde a un instrumento validado. Combina dos constructos distintos: seguridad (inseguro/a, seguro/a) y comodidad (incómodo/a, cómodo/a). Una persona puede sentirse segura y a la vez incómoda por el visor o la locomoción, por lo que la escala tiene limitaciones de validez de constructo y sus respuestas no miden seguridad de forma exclusiva.

8.3 Patrones de diseño.

8.3.1 Patrones de interacción.

A diferencia de los patrones de diseño de software, los patrones de interacción VR describen soluciones recurrentes desde la perspectiva del usuario, independientes de su implementación técnica [13].

En el diseño del sistema de locomoción se aplicó el patrón de opciones de comodidad, ofreciendo al usuario la posibilidad de alternar entre giro continuo y giro discreto (*snap turning*) durante la experiencia, dado que este último reduce la disonancia entre el sistema vestibular y el visual, reduciendo síntomas adversos por VR.

Se optó por locomoción continua en lugar de teletransporte, priorizando la continuidad espacial del recorrido peatonal y la sencillez por sobre la comodidad sensorial adicional que ofrece el teletransporte, dado que la variable de estudio depende de una experiencia de desplazamiento ininterrumpida a través de las distintas condiciones lumínicas evaluadas.

Se evitó cualquier uso de elementos de interfaz de usuario en el ambiente virtual. Primero, porque no eran esencialmente necesarios para la tarea experimental y segundo, porque el uso de interfaces no diagéticas, que no pertenecen al “mundo ficticio”, tiene un impacto adverso en la inmersión y se relaciona con mayor sintomatología adversa [9].

8.3.2 Patrones de código y scripting.

El ambiente virtual se apoya principalmente en los patrones de diseño ya incorporados en Unity y en el XR Interaction Toolkit. El sistema de locomoción utiliza el patrón Strategy mediante la clase base LocomotionProvider, que permite intercambiar dinámicamente entre proveedores de locomoción sin modificar el resto del sistema.

En este proyecto se emplean tres proveedores nativos del toolkit: Continuous Move Provider para el desplazamiento, y Continuous Turn Provider y Snap Turn Provider para el giro, siendo estos dos últimos intercambiables en tiempo de ejecución mediante un script personalizado, que alterna la estrategia de giro activa según la entrada del usuario.

Al no incluir objetos interactivos adicionales, la interacción del usuario se limita deliberadamente a la locomoción dentro del ambiente, manteniendo el código personalizado acotado a lo estrictamente necesario para la experiencia. A nivel general, el proyecto sigue el paradigma de

composición por componentes propio de Unity, agregando comportamiento mediante componentes independientes según las funciones que se requieran en lugar de jerarquías de herencia complejas.

8.4 Iluminación.

La iluminación fue manejada mediante la Pipeline URP; la principal consecuencia de esto es que no posee un modelo físico de iluminación como HDRP, por lo que se utilizan valores arbitrarios de intensidad que tuvieron que ser visualmente aproximados a cómo se verían en realidad. Emplear un modelo de iluminación que simule el alumbrado público de manera físicamente validada en unidades de lux o radiancia espectral para resultados más extrapolables queda abierto como línea de trabajo futura.

8.4.1 Iluminación ambiente.

El ambiente cuenta con una iluminación global direccional, iluminando la escena 90 grados respecto al piso a una muy baja intensidad con una temperatura baja que simula la luz de una medianoche sin luna visible.

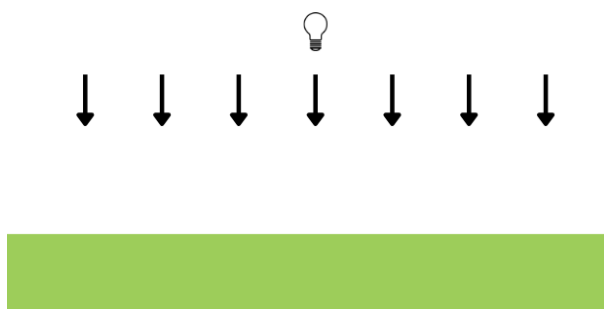


Figura 5: Representación del ángulo de luz direccional global.

Fuente: Elaboración propia.

La fuente de luz cuenta con las siguientes especificaciones:

Tabla 5: Especificaciones de la luz direccional global.

Fuente: Elaboración propia.

Light appearance	Filter and Temperature
Filter (hexadecimal)	FFFFFF (default)
Intensity	0.001
Indirect multiplier	1

Temperature	6500K
-------------	-------

A la iluminación direccional se le agregan también las variables de iluminación ambiental y una configuración de niebla en posprocesamiento para replicar la visibilidad nocturna limitada ambiental.

Tabla 6: Configuración de iluminación ambiental (cielo, ecuador y suelo).

Fuente: Elaboración propia.

Source	Gradient		
Sky color (RGB)	R=1	G=1	B=2
Equator color (RGB)	R=6	G=6	B=7
Ground color (RGB)	R=59	G=44	B=26

8.4.1.1 Niebla.

Tabla 7: Configuración de niebla (fog).

Fuente: Elaboración propia.

Color	0A0D1A
Mode	Exponential
Density	0.009

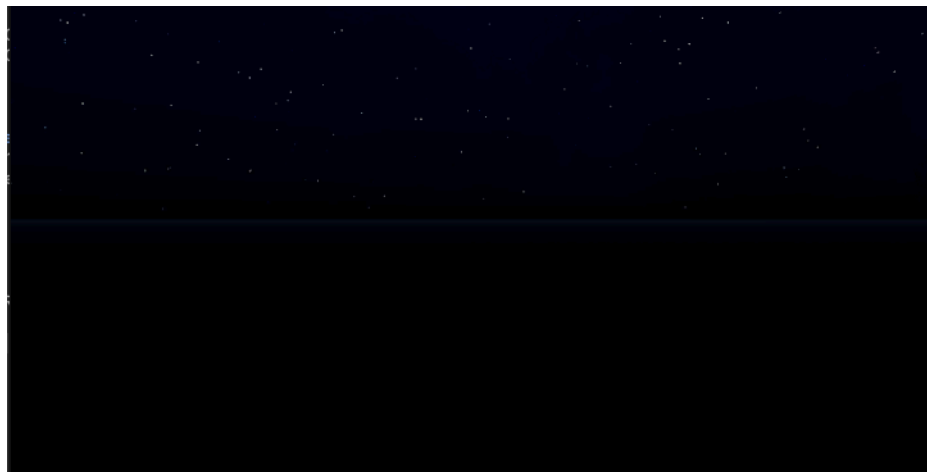


Figura 6: Iluminación y cielo resultantes.

Fuente: Elaboración propia.

8.4.2 Iluminación pública.

Para simular las luces de los postes del parque se empleó una luz de punto que emite luz en todas direcciones en un rango limitado.

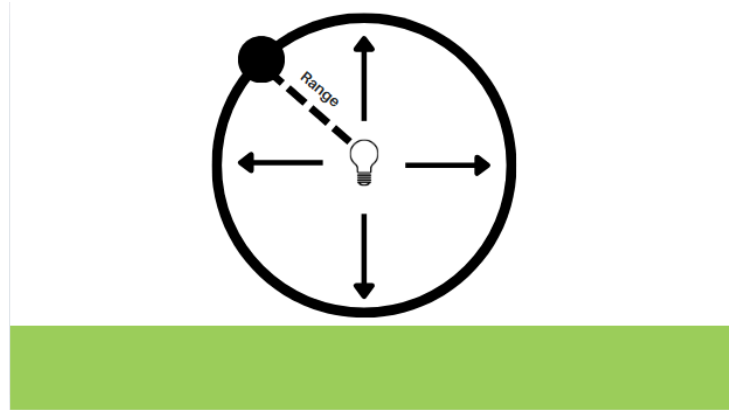


Figura 7: Representación de una luz de punto.

Fuente: Elaboración propia.

Las luces de punto de las tres zonas comparten intensidad, multiplicador indirecto, filtro y rango, y difieren en su temperatura nominal. Esto no garantiza que la iluminación resultante sea equivalente: las zonas tienen distinta geometría, vegetación y número y tipo de postes, y no se midieron iluminancia ni luminancia en la escena. Por lo tanto, cada zona difiere de las otras en más de un aspecto además de la CCT.

Tabla 8: Especificaciones de las luces de punto por zona de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Light appearance	Filter and temperature		
Filter (Hexadecimal)	FFFFFF		
Temperatura	2000K	2700K	4000K
Intensity	10		
Indirect Multiplier	1		
Range	15		



Figura 8: Captura aérea dentro del motor, en orden de izquierda a derecha 2000K, 2700K y 4000K.

Fuente: Elaboración propia.

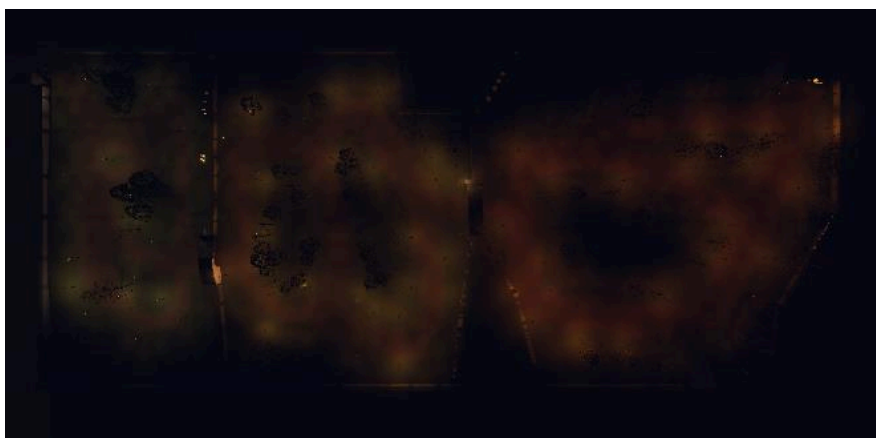


Figura 9: Captura dentro del motor, en orden de izquierda a derecha 2000K, 2700K y 4000K.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 10: Captura aérea dentro del motor, zona de 4000K.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 11: Captura dentro del motor, zona de 2700K.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 12: Captura dentro del motor, zona de 2000K.

Fuente: Elaboración propia.

8.4.3 Iluminación baked.

La totalidad de la iluminación, sombras y reflejos se encuentran previamente calculados en la tarjeta gráfica del equipo de desarrollo y se almacenan en forma de light maps. Esta técnica permite lograr una iluminación realista con un bajo impacto en el rendimiento al no requerir cálculos en tiempo real.

La totalidad de la iluminación de la escena se encuentra almacenada en 10 *light maps* de 1024x1024 píxeles que luego son cargados durante la ejecución a bajo costo de recursos.

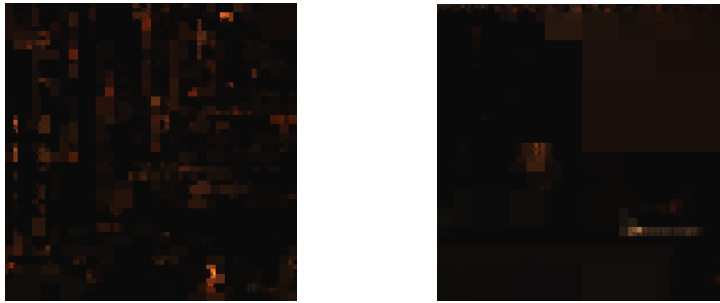


Figura 13: Lightmaps de la escena tras generar la iluminación.

Fuente: Elaboración propia.

8.5 Configuración de pipeline de renderizado.

Se configuró un asset dedicado de Universal Render Pipeline orientado a la optimización para Meta Quest 3S y la estrategia de iluminación *baked* empleada. Se realizaron las siguientes modificaciones:

- Renderizado:
 - Ruta de renderizado: Forward.
 - Depth Texture: desactivado.
 - Opaque Texture: desactivado.
- Calidad:
 - HDR: desactivado
 - Anti aliasing (MSAA): 4x
 - Render Scale: 1.0
- Iluminación:
 - Main light - Cast shadows: desactivado
 - Additional lights - Rendering Mode:
 - Per vertex.
 - Per object Limit: 4.
 - Additional lights - Cast shadows: desactivado.
- Post-procesamiento:
 - Grading Mode: Low Dynamic Range.

8.6 Modelado.

Siguiendo lo definido en el diseño del ambiente, se necesitan modelos 3D para poblar el ambiente con los detalles necesarios: paredes, árboles, flores, pasto, bancas, papeleras, etc., además de texturas de pasto, tierra y cielo. Se creó una copia *variada* de los modelos utilizados, configurados para desactivar *light probes* utilizando solo los *lightmaps* para la interacción de los modelos con la luz.

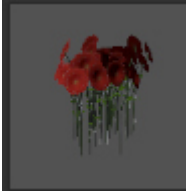
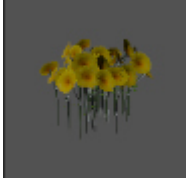
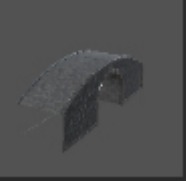
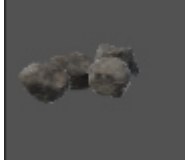
8.6.1 Assets de terceros.

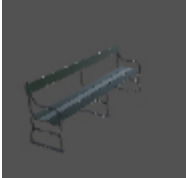
El ambiente cuenta con los siguientes assets de terceros:

Tabla 9: Assets de terceros utilizados en el ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Paquete	Imagen de referencia	Creador
SkyMidnight	Day-Night Skyboxes		Wello Soft
Park_post_1-lamp	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_flower_red	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_flower_yellow	City park – exterior props		Estudio Mixall

Park_flowerbed_red	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_flowerbed_yellow	City park – exterior props		Estudio Mixall
Bridge	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_maple	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_poplar	City park – exterior props		Estudio Mixall
Steps	City park – exterior props		Estudio Mixall
Grass	City park – exterior props		Estudio Mixall
Pack of Stones	City park – exterior props		Estudio Mixall

Grass_layer	City park – exterior props		Estudio Mixall
Gravel_layer	City park – exterior props		Estudio Mixall
Grass_Soil_layer	City park – exterior props		Estudio Mixall
Park_bench	City park – exterior props		Estudio Mixall

8.6.2 Escenas.

Se emplearon todos los assets dentro de una sola instancia de Unity Scene con el propósito de evitar pantallas de carga que produzcan

interrupciones en el flujo natural de la experiencia.



Figura 14: Visión aérea de la escena en modo unlit draw.
Fuente: Elaboración propia.

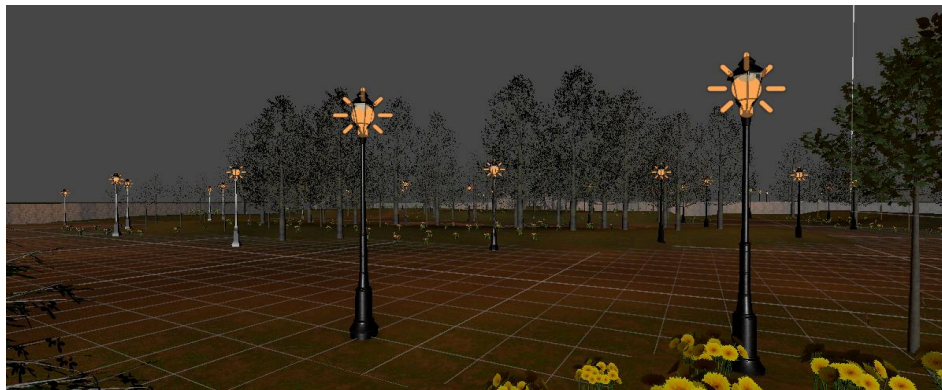


Figura 15: Captura de la zona de 2700K en modo unlit draw.
Fuente: Elaboración propia.

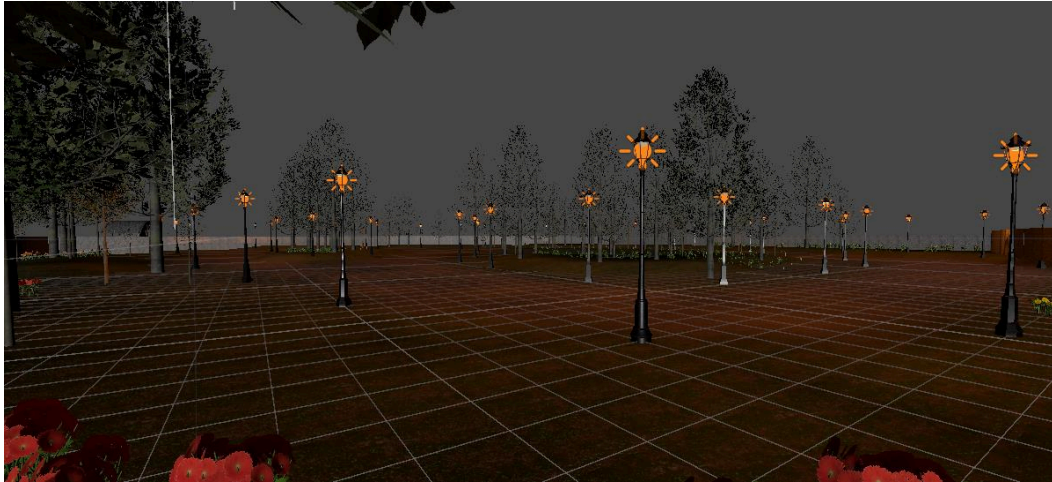


Figura 16: Captura de la zona de 2000K en modo unlit draw.
Fuente: Elaboración propia.

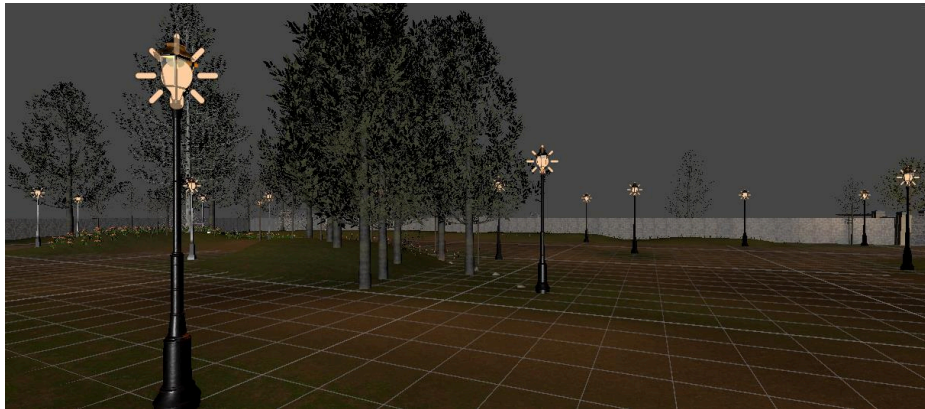


Figura 17: Captura de la zona de 4000K en modo unlit draw.
Fuente: Elaboración propia.

Se empleó la estrategia de optimización LOD, en la que, según la distancia desde el punto de vista de renderizado, los objetos lejanos utilizan un modelo distinto con menos polígonos o son completamente eliminados, lo que permite crear una escena tan grande como esta con poco impacto en el rendimiento.

8.7 Sonido.

Para lograr una mayor sensación de presencia que mejore los resultados del experimento, es vital que el ambiente virtual reemplace la mayor

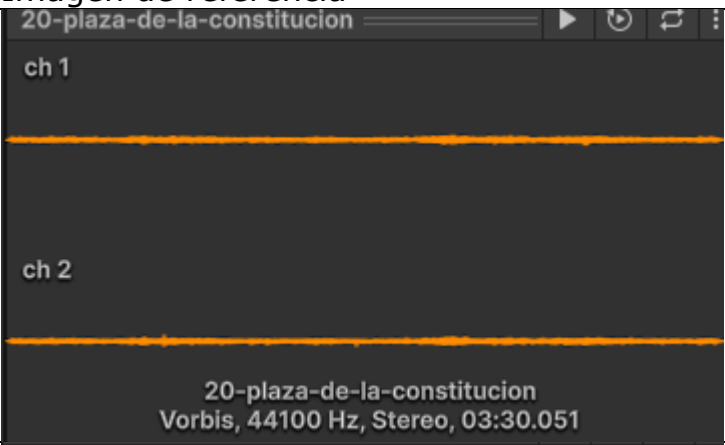
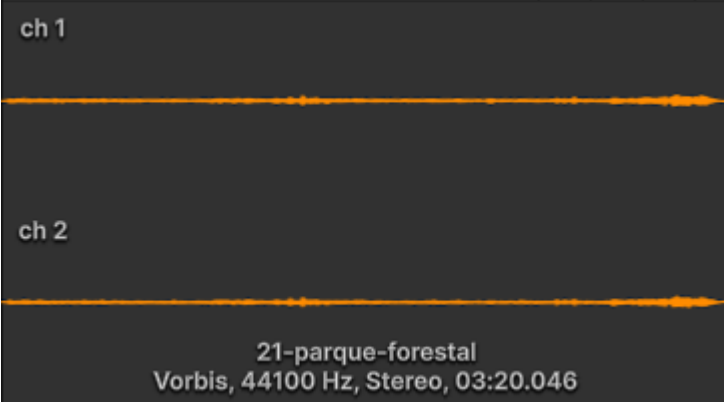
cantidad de sentidos del usuario, por lo que se implementó sonido de fondo y estímulos auditivos específicos [13].

8.7.1 Sonido ambiental.

Para crear el sonido ambiental del parque urbano se unieron 2 grabaciones reales tomadas en parques urbanos de Santiago por acústica UACH, ligeramente editadas para remover sonidos molestos y crear un *loop* más natural. Entre las 2 alcanzan una duración de 6 minutos 50 segundos, más que la duración esperada de la experiencia.

Tabla 10: Grabaciones utilizadas para el sonido ambiental.

Fuente: [14]

Nombre	Imagen de referencia
20 Plaza de la Constitución	
21 Parque Forestal	

Además del sonido ambiental, el recorrido incluye eventos sonoros puntuales (sirenas de policía y de ambulancia, y un frenazo), que se activan en momentos específicos del tiempo de recorrido y, por lo tanto, quedan asociados a zonas determinadas del parque. Estos eventos son

iguales para todos los participantes, pero no se distribuyen por igual entre las tres zonas, por lo que forman parte de las diferencias entre ellas señaladas en la Sección 8.1.

8.8 Control e integración VR.

La integración VR del ambiente 3D se realiza mediante la API nativa XRI que mantiene componentes que permiten seguimiento de la posición de la cabeza, detección del movimiento de ojos, uso de sensores de movimiento y detección de inputs de periféricos VR de Meta Quest, y además ofrece funcionalidades básicas personalizables adaptadas a las necesidades de las aplicaciones VR como movimiento del jugador por teletransportación o locomoción continua, movimiento de cámara continuo o instantáneo, entre otras.

8.8.1 Objeto Jugador.

El Objeto *VR player* se encarga de reunir los componentes que manejan la interacción con la VR. El usuario tendrá disponibles inputs para moverse por el ambiente, girar la cámara o cambiar el modo del giro de cámara.

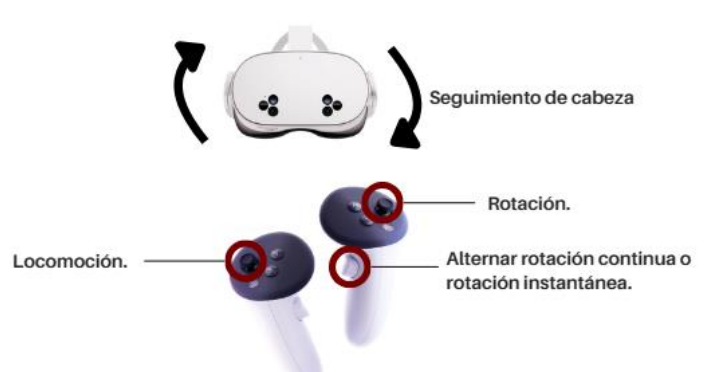


Figura 18: Componentes de interacción del Objeto Jugador (VR Player).

Fuente: Elaboración propia.

Esto se maneja mediante los siguientes componentes y configuraciones: Continuous Move Provider.

Tabla 11: Configuración del Continuous Move Provider.

Fuente: Elaboración propia.

Transformation Priority	0
Move Speed	1.5

In Air Control Modifier	0.5
Enable strafe	True
Enable fly	False
Forward source	Main Camera (transform)
Left hand move input	XRI Left Locomotion/move
Right hand move input	None
Use gravity	true

Continuous Turn Provider.

Tabla 12: Configuración del Continuous Turn Provider.

Fuente: Elaboración propia.

Transformation Priority	0
Turn Speed	15
Enable Turn Left Right	True
Enable Turn Around	false
Left hand turn input	None
Right hand turn input	XRI right Locomotion/turn

Snap Turn Provider.

Tabla 13: Configuración del Snap Turn Provider.

Fuente: Elaboración propia.

Transformation priority	0
Turn amount	30
Debounce time	0.5
Enable left & right snap turns	True
Enable turn around	true
Delay time	0
Left hand turn input	None
Right hand turn input	XRI Right Locomotion/snapturn

8.9 Implementación de software.

Estructura de proyecto.

El proyecto se organiza en Unity 6000.2.9f1 bajo una carpeta raíz Assets/_Project/, que contiene todo el contenido propio del trabajo, separado de los paquetes de Unity/Meta y de los assets de terceros:

- _Project/Scripts/Sonido/ — SoundscapePlaylistManagement.cs, SoundEffectManagement.cs
- _Project/Scripts/VR/ — SwitchMovementMode.cs
- _Project/Prefabs/PlayerControl/ — VRPlayer.prefab
- _Project/Audio/city/ — 2 grabaciones de sonido ambiental (ver Tabla 10)
- _Project/Audio/puntuales/ — 4 clips de sonidos puntuales (sirenas, frenazo)
- _Project/Lighting/SkyboxSettings/ — Lighting Settings baked (default.lighting, night.lighting)
- _Project/Terrain/ — Park.asset + 4 TerrainData
- Scenes/NightPark.unity — escena única (ver 8.6.2)
- ThirdParty/ — assets de terceros

El resto de las carpetas de primer nivel (Resources/, Samples/, Settings/, XR/, XRI/, Plugins/, Oculus/, TextMeshPro/) corresponden a contenido generado y gestionado automáticamente por los paquetes de Unity y del Meta XR SDK, y no fueron modificadas.

Estructura de escena.

La jerarquía de GameObjects de la escena principal se agrupa en 8 contenedores de primer nivel. Las instancias repetidas de un mismo prefab dentro de un mismo nivel (p. ej. los postes de luz de una zona) se colapsan en una sola línea con su conteo ("×N") para legibilidad; en el proyecto real cada una es un GameObject independiente.

► 2DCanvas

- tech

► AUDIO

- GlobalSound
 - SonidoAmbiental
- SoundEffects
 - ambulancia

- frenazo
- policia
- ▶ **ENVIRONMENT**
 - Map
 - TerrainExterior
 - TerrainInterior
 - LimitEntry
 - LimitExit
 - LimiteExitSide
 - Walls
 - WallMesh
 - Zone2000K
 - Lamps
 - park_post_3_lamp ×32
 - Park_bridge_steps (2)
 - Zone2700K
 - Lamps
 - park_post_2_lamp ×40
 - Park_bridge_steps (1)
 - Zone4000K
 - Brick_Fence_03 (2)
 - Exit
 - park_Path_Wide_Turn_30
 - steps ×3
 - Fence_Big_Pillar (1)
 - Lamps
 - park_post_1_lamp ×25
 - P_Brick_Fence_03 (1)
 - Park_bridge_steps
 - bridge
 - ▶ **EventSystem**
 - ▶ **MANAGERS**
 - GameControl
 - Global Volume
 - MoonLight
 - ▶ **PLAYER**
 - vr player

- **PROPS**
- **UI**

Scripts.

Se implementaron funciones personalizadas en el ambiente utilizando scripts escritos en C#, el lenguaje de scripting predeterminado en Unity.

Script	Responsabilidad	Usado en
SwitchMovementMode.cs	Alterna en tiempo de ejecución entre Continuous Turn Provider y Snap Turn Provider según el input del botón secundario del control (ver 8.3.2)	Objeto raíz VRPlayer (prefab del jugador)
SoundscapePlaylistManagement.cs	Reproduce en cola/loop la playlist de sonido ambiental del parque urbano (2 grabaciones de acústica UACH, ver Tabla 10)	Objeto SonidoAmbiental, dentro de AUDIO/GlobalSound
SoundEffectManagement.cs	Dispara eventos de audio puntuales (sirena de policía, sirena de ambulancia, frenazo) en momentos específicos del recorrido	Objeto GameController, dentro de MANAGERS

SwitchMovementMode.cs

Assets/_Project/Scripts/VR/SwitchMovementMode.cs — alterna entre Continuous Turn Provider y Snap Turn Provider (ver 8.3.2 y Tabla de scripts, 8.9).

```

1 using UnityEngine;
2 using UnityEngine.InputSystem;
3 using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit;
4 using UnityEngine.XR.Interaction.Toolkit.Locomotion.Turning;
```

```

5
6 public class SwitchMovementMode : MonoBehaviour
7 {
8     [SerializeField] private ContinuousTurnProvider continuousTurnProvider;
9     [SerializeField] private SnapTurnProvider snapTurnProvider;
10    [SerializeField] private InputActionReference secondaryButtonAction;
11
12    private bool isContinuousTurnActive = true;
13    private float inputCheckDelay = 0.3f;
14    private float lastSwitchTime = 0f;
15
16    void Start()
17    {
18        if (continuousTurnProvider == null || snapTurnProvider == null || secondaryButtonAction == null)
19        {
20            Debug.LogError("switchMovementMode: Please assign all required components in the inspector");
21            return;
22        }
23
24        // Start with continuous turn enabled
25        continuousTurnProvider.enabled = true;
26        snapTurnProvider.enabled = false;
27    }
28
29    void Update()
30    {
31        // Check for secondary trigger input with debounce
32        if (Time.time - lastSwitchTime < inputCheckDelay)
33            return;
34
35        if (secondaryButtonAction.action.WasPressedThisFrame())
36        {

```

```

37         SwitchTurnProvider();
38         lastSwitchTime = Time.time;
39     }
40 }
41
42 private void SwitchTurnProvider()
43 {
44     isContinuousTurnActive = !isContinuousTurnActive;
45
46     if (isContinuousTurnActive)
47     {
48         continuousTurnProvider.enabled = true;
49         snapTurnProvider.enabled = false;
50         Debug.Log("Switched to Continuous Turn");
51     }
52     else
53     {
54         continuousTurnProvider.enabled = false;
55         snapTurnProvider.enabled = true;
56         Debug.Log("Switched to Snap Turn");
57     }
58 }
59 }

```

SoundscapePlaylistManagement.cs

Assets/_Project/Scripts/Sonido/SoundscapePlaylistManagement.cs — reproduce en cola/loop la playlist de sonido ambiental (ver 8.7.1 y Tabla 10).

```

1 using UnityEngine;
2 using System.Collections;
3
4 public class SoundscapePlaylistManagement : MonoBehaviour
5 {

```

```

6     [Header("Playlist")]
7     [SerializeField] private AudioClip[] tracks;
8     [SerializeField] private bool playOnStart = true;
9     [SerializeField] private bool loopPlaylist = true;
10    [SerializeField, Min(0f)] private float gapBetweenTracks = 0f;
11
12    private AudioSource source;
13    private int index = 0;
14    private Coroutine playRoutine;
15
16    void Awake()
17    {
18        source = GetComponent<AudioSource>();
19        if (source == null)
20        {
21            // Ensure there's an AudioSource on this GameObject
22            source = gameObject.AddComponent<AudioSource>();
23        }
24        source.playOnAwake = false;
25        source.loop = false; // We handle looping at the playlist level
26    }
27
28    void Start()
29    {
30        if (playOnStart)
31            Play();
32    }
33
34    public void Play(int startIndex = -1)
35    {
36        if (tracks == null || tracks.Length == 0)
37        {

```

```

38         Debug.LogWarning($"{nameof(SoundscapePlaylistManagement)}: No tracks assigned.", this);
39         return;
40     }
41
42     if (startIndex >= 0)
43         index = Mathf.Clamp(startIndex, 0, tracks.Length - 1);
44
45     if (playRoutine != null)
46         StopCoroutine(playRoutine);
47
48     playRoutine = StartCoroutine(PlayLoop());
49 }
50
51 public void Stop()
52 {
53     if (playRoutine != null)
54     {
55         StopCoroutine(playRoutine);
56         playRoutine = null;
57     }
58     if (source != null)
59         source.Stop();
60 }
61
62 public void Next()
63 {
64     if (tracks == null || tracks.Length == 0) return;
65     index = (index + 1) % tracks.Length;
66     RestartFromCurrent();
67 }
68
69 public void Previous()

```

```

70     {
71         if (tracks == null || tracks.Length == 0) return;
72         index = (index - 1 + tracks.Length) % tracks.Length;
73         RestartFromCurrent();
74     }
75
76     private void RestartFromCurrent()
77     {
78         if (playRoutine != null)
79         {
80             StopCoroutine(playRoutine);
81             playRoutine = StartCoroutine(PlayLoop());
82         }
83         else
84         {
85             Play(index);
86         }
87     }
88
89     private IEnumerator PlayLoop()
90     {
91         do
92         {
93             for (; index < tracks.Length; index++)
94             {
95                 var clip = tracks[index];
96                 if (clip == null) continue;
97
98                 source.clip = clip;
99                 source.time = 0f;
100                 source.Play();
101

```

```

102         // Wait until the current track finishes
103         while (source.isPlaying)
104             yield return null;
105
106         if (gapBetweenTracks > 0f)
107             yield return new WaitForSeconds(gapBetweenTracks);
108     }
109
110     index = 0; // loop back to start
111 } while (loopPlaylist);
112
113     playRoutine = null;
114 }
115
116 void OnDisable()
117 {
118     if (playRoutine != null)
119     {
120         StopCoroutine(playRoutine);
121         playRoutine = null;
122     }
123 }
124 }

```

SoundEffectManagement.cs

Assets/_Project/Scripts/Sonido/SoundEffectManagement.cs — dispara eventos de audio puntuales en tiempos específicos del recorrido.

```

1 using UnityEngine;
2 using System.Collections.Generic;
3
4 public class SoundEffectManagement : MonoBehaviour
5 {
6     [System.Serializable]

```

```

7     public class AudioEvent
8     {
9         public float time;
10        public AudioSource audioSource;
11    }
12
13    [SerializeField] private List<AudioEvent> audioEvents = new List<AudioEvent>();
14    [SerializeField] private bool playOnStart = true;
15
16    private float elapsedTime = 0f;
17    private bool isPlaying = false;
18    private int lastPlayedIndex = -1;
19
20    void Start()
21    {
22        if (playOnStart)
23        {
24            StartPlayback();
25        }
26    }
27
28    void Update()
29    {
30        if (!isPlaying)
31            return;
32
33        elapsedTime += Time.deltaTime;
34
35        // Check each audio event
36        for (int i = 0; i < audioEvents.Count; i++)
37        {
38            // Play audio if time threshold is reached and it hasn't been played yet

```

```

39         if (elapsedTime >= audioEvents[i].time && i > lastPlayedIndex)
40         {
41             if (audioEvents[i].audioSource != null)
42             {
43                 audioEvents[i].audioSource.Play();
44                 lastPlayedIndex = i;
45                 Debug.Log($"Playing audio at time: {audioEvents[i].time}s");
46             }
47         }
48     }
49 }
50
51 public void StartPlayback()
52 {
53     elapsedTime = 0f;
54     isPlaying = true;
55     lastPlayedIndex = -1;
56     Debug.Log("Audio playback started");
57 }
58
59 public void StopPlayback()
60 {
61     isPlaying = false;
62     elapsedTime = 0f;
63     Debug.Log("Audio playback stopped");
64 }
65
66 public void ResetPlayback()
67 {
68     StopPlayback();
69     foreach (var audioEvent in audioEvents)
70     {

```

```

71         if (audioEvent.audioSource != null)
72         {
73             audioEvent.audioSource.Stop();
74         }
75     }
76 }
77
78 public void AddAudioEvent(float time, AudioSource audioSource)
79 {
80     audioEvents.Add(new AudioEvent { time = time, audioSource = audioSource });
81     audioEvents.Sort((a, b) => a.time.CompareTo(b.time));
82 }
83 }

```

Versiónes de paquetes.

Paquete	Versión
Unity Editor	6000.2.9f1
Universal Render Pipeline (URP)	17.2.0
XR Interaction Toolkit	3.2.2
XR Plugin Management	4.5.3
OpenXR Plugin	1.15.1
Meta XR SDK (All)	205.0.0
Input System	1.14.2
ProBuilder	6.0.8
AI Navigation	2.0.9

Repositorio.

El código fuente del proyecto Unity se encuentra disponible en el repositorio: <https://github.com/SofiaJRL/iluminacionVR>. El repositorio

incluye el proyecto completo necesario para reproducir la escena descrita en la Sección 8. Para abrir el proyecto: clonar el repositorio, abrirlo con Unity Hub especificando la versión 6000.2.9f1 (o superior compatible), y permitir que el Package Manager de Unity resuelva automáticamente las dependencias listadas arriba. El proyecto contiene una única escena llamada NightPark que ejecuta el ambiente en su versión de experimento.

9. Validación.

9.1 Participantes y experimento.

La muestra analizada fue de 94 participantes, con edades entre 19 y 77 años.

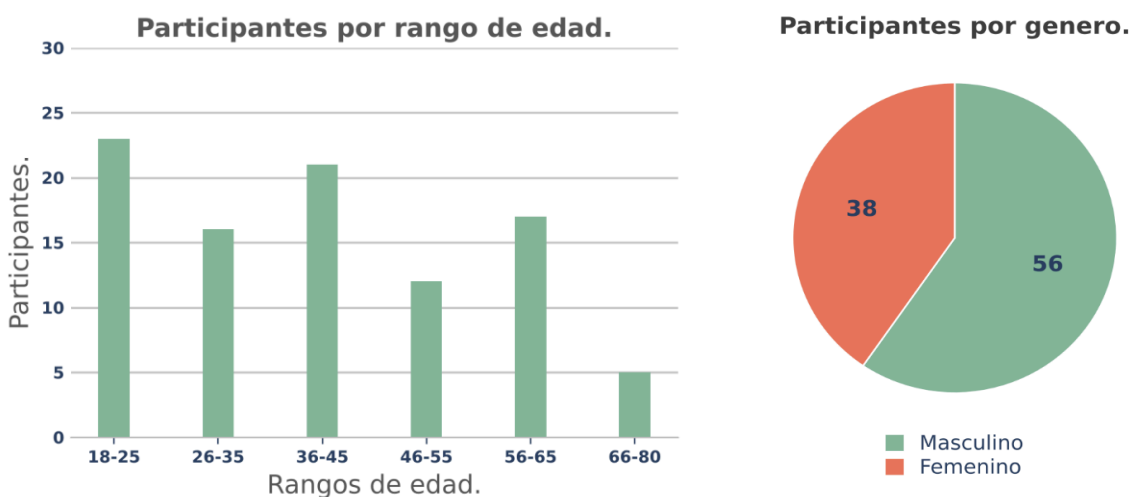


Figura 19: Distribución de participantes por género y por rango de edad.

Fuente: Elaboración propia.

Estos estuvieron distribuidos durante 4 días de estudio: el 15 de diciembre de 2025, el 17 de diciembre de 2025, el 20 de enero de 2026 y el 22 de enero de 2026.



Figura 20: Distribución de participantes por fecha de sesión.

Fuente: Elaboración propia.

Todas las iteraciones del experimento fueron realizadas con el mismo equipo Meta Quest 3S en conexión Meta Quest Link PCVR con el computador del laboratorio descrito en la Sección 5.1.1, en una misma habitación de reuniones del edificio U2 de la sede de Viña del Mar de la Universidad Técnica Federico Santa María, en un horario entre las 10:00 AM y las 4:00 PM.

9.2 Simulator Sickness Questionnaire (SSQ).

El *Simulator Sickness Questionnaire* (Cuestionario de malestar por simulador) de Kennedy, Lane, Berbaum y Lilienthal es el instrumento más extendido para medir la sintomatología adversa asociada al uso prolongado de simuladores. Aunque fue desarrollado originalmente para simuladores de vuelo, también se aplica al hardware VR comercial utilizado en este proyecto.

El estudio separa los síntomas en 16 puntos.

1. Malestar general
2. Cansancio
3. Dolor de cabeza
4. Vista cansada

5. Dificultad para enfocar
6. Aumento de salivación
7. Sudoración
8. Náusea
9. Dificultad para concentrarse
10. Pesadez de cabeza
11. Visión borrosa
12. Mareos con ojos abiertos
13. Mareos con ojos cerrados
14. Vértigo
15. Estómago revuelto
16. Eructos

Los participantes evalúan cada uno de sus síntomas en 4 niveles inmediatamente después de abandonar el entorno simulado.

Tabla 14: Escala de severidad de los síntomas del SSQ.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de [16].

0	1	2	3
Ninguno	Leve	Moderado	Severo

Para evaluar la puntuación final del estudio, estos síntomas se agrupan en 3 subescalas.

- Náusea: aquellos relacionados con malestar gastrointestinal
- Oculomotor: problemas visuales y cansancio ocular
- Desorientación: relacionados con mareos y vértigo.

Tabla 15: Distribución de los síntomas del SSQ por subescala.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de [16].

Náusea	Oculomotor	Desorientación
Malestar general	Malestar general	
	Cansancio	
	Dolor de cabeza	
	Vista cansada	

	Dificultad para enfocar	Dificultad para enfocar
Aumento de salivación		
Sudoración		
Náusea		Náusea
Dificultad para concentrarse	Dificultad para concentrarse	
		Pesadez de cabeza
	Visión borrosa	Visión borrosa
		Mareos con ojos abiertos
		Mareos con ojos cerrados
		Vértigo
Estómago revuelto		
Eructos		

El puntaje de cada subescala para comparación se obtiene sumando las respuestas brutas de sus siete ítems (Tabla 15) y multiplicando esa suma por su factor de ponderación. El puntaje total se obtiene a partir de la suma de las tres sumas brutas, multiplicada por 3,74 [16]:

$$\text{Náusea} = (\text{suma bruta de Náusea}) \times 9,54$$

$$\text{Oculomotor} = (\text{suma bruta de Oculomotor}) \times 7,58$$

$$\text{Desorientación} = (\text{suma bruta de Desorientación}) \times 13,92$$

$$\text{PUNTUACIÓN TOTAL} = (\text{Náusea suma bruta} + \text{Oculomotor suma bruta} + \text{Desorientación suma bruta}) \times 3,74$$

Los ítems que pertenecen a dos subescalas se contabilizan en ambas, según el diseño del instrumento. Los puntajes se calcularon directamente desde las respuestas a los 16 ítems mediante el script de análisis incluido en la Sección 9.4.1.

Para evaluar la puntuación final se utiliza la siguiente escala [16].

Tabla 16: Escala de interpretación del puntaje total del SSQ.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de [16].

Rango de puntuación total.	Interpretación.
< 5	Insignificante
5 - 10	Mínimo
10 - 15	Significativo
15 - 20	Preocupante
>20	Simulador problemático.

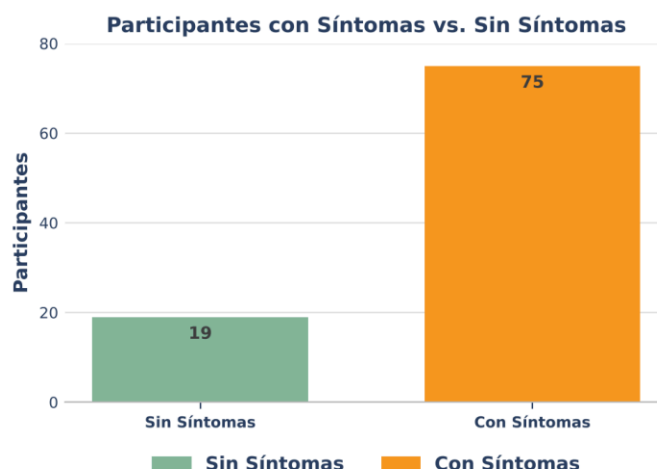


Figura 21: Participantes con síntomas vs. sin síntomas (SSQ).

Fuente: Elaboración propia.

Entre los participantes hubo una prevalencia de 19 (20% del total de la muestra) que no reportó ningún síntoma, frente a 75 (un 80%) que reportó al menos un síntoma de cualquier clase. Ningún participante se vio obligado a abandonar la prueba por síntomas adversos. El puntaje total SSQ de la muestra obtuvo una media de 26,46. La media supera el

umbral de 20 que la escala asocia a un simulador problemático, lo que confirma un nivel notable de sintomatología.

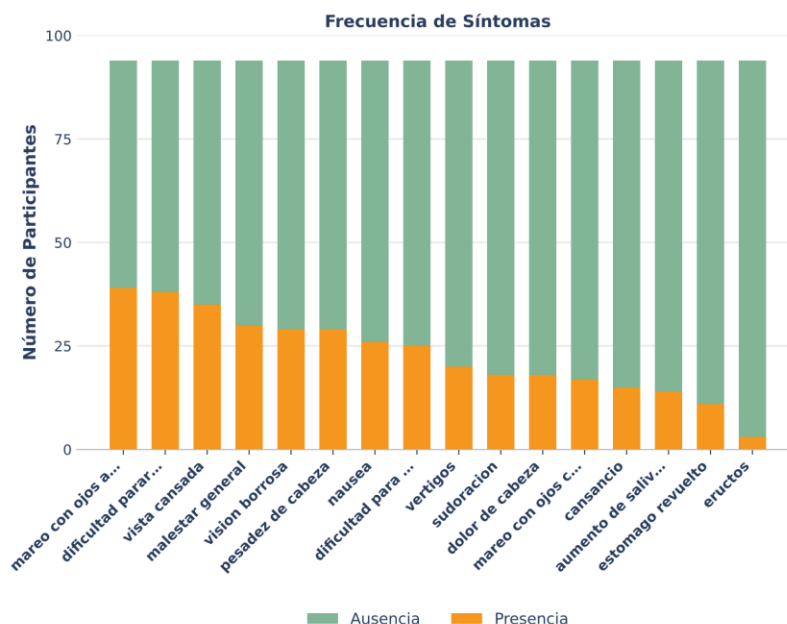


Figura 22: Frecuencia de síntomas individuales del SSQ reportados.

Fuente: Elaboración propia.

Los síntomas más comúnmente reportados fueron mareo con ojos abiertos (n=39), dificultad para enfocar (n=38) y vista cansada (n=35). Los menos reportados fueron eructos (n=3), estómago revuelto (n=11) y aumento de salivación (n=14).

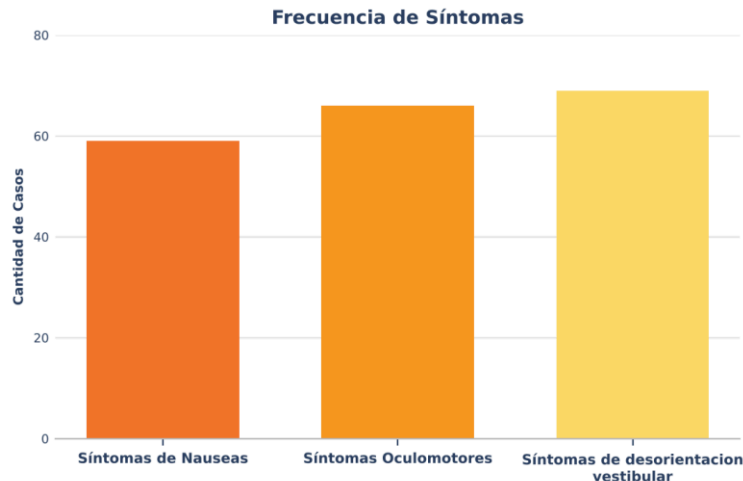


Figura 23: Frecuencia de casos por subescala del SSQ (Náusea, Oculomotor, Desorientación).

Fuente: Elaboración propia.

Los síntomas relacionados a la desorientación del sistema vestibular fueron los más comunes con 69 participantes experimentando al menos uno de esa clase, seguido de síntomas oculomotores con 66 participantes, y finalmente 59 participantes manifestaron síntomas de náuseas.

9.3 Encuesta de satisfacción y validez del ambiente.

Tras finalizar la prueba con usuarios se aplicó una encuesta Likert; se eligió este instrumento estadístico gracias a la facilidad al responder para los usuarios y la agilidad para tabular y obtener conocimiento de los resultados. La encuesta mide en 4 dimensiones la satisfacción con la experiencia en el ambiente virtual. Estas dimensiones son veracidad, estética, veracidad del sonido y facilidad de comprensión y fueron medidas con las siguientes preguntas y escalas:

Tabla 17: Instrumento de encuesta Likert de satisfacción y validez del ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

	1. Muy en desacuerdo.	2. En desacuerdo.	3. De acuerdo.	4. Muy de acuerdo.
--	-----------------------	-------------------	----------------	--------------------

El ambiente es veraz.				
El ambiente es bonito.				
El sonido es veraz.				
Me resultó fácil entender qué hacer.				

La dimensión de veracidad mide la credibilidad percibida del ambiente. Una alta credibilidad es deseable, pero no demuestra validez ecológica: para ello habría que comparar las respuestas en VR con las de un entorno físico equivalente.

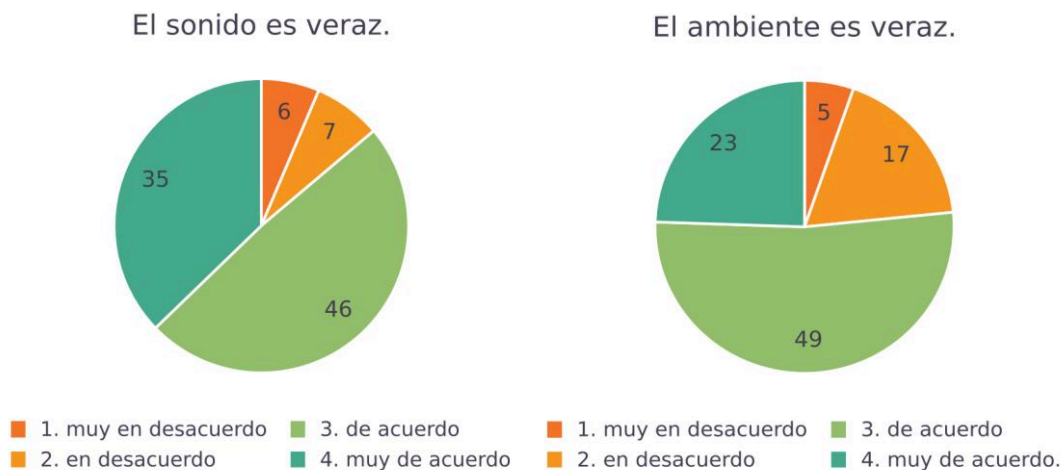


Figura 24: Resultados de la dimensión de veracidad del sonido y del ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que 72 usuarios (77% de la muestra total) consideraron el ambiente veraz y 81 usuarios (86% de la muestra

total) consideraron específicamente el sonido veraz. Ambos porcentajes lograron superar el propuesto en los objetivos iniciales e indica que la mayoría de los participantes consideró el ambiente creíble.

La pregunta aplicada evalúa la veracidad del ambiente en su conjunto y no específicamente la de la iluminación. Por ello, el 77% obtenido respalda la credibilidad general de la escena, pero solo de forma indirecta el objetivo de recrear valores lumínicos veraces.

La dimensión estética tiene la función de evaluar la satisfacción del usuario con el aspecto gráfico y estético del ambiente utilizado para la prueba. Permite evaluar finalmente el impacto que tuvo la falta de un artista técnico en el diseño y construcción del ambiente.

El ambiente es bonito.

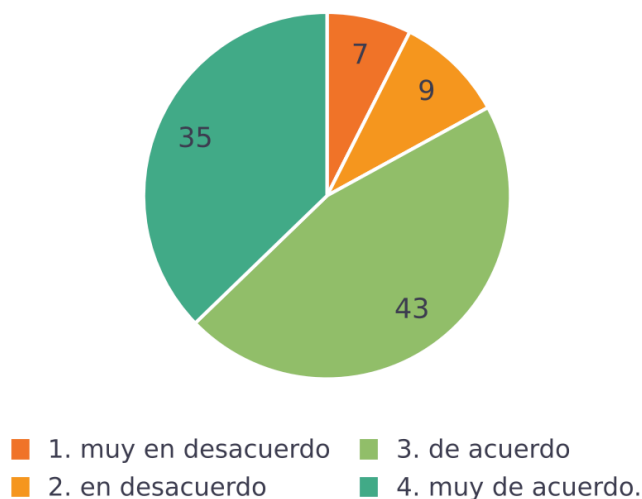


Figura 25: Resultados de la dimensión estética (“El ambiente es bonito”).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que 78 usuarios (83% de la muestra) consideran el ambiente bonito. El porcentaje supera el objetivo y sugiere una satisfacción de los usuarios con la experiencia del ambiente.

La variable de facilidad de comprensión evalúa la topología de la ruta del ambiente y el esquema de controles motrices en su capacidad para no generar confusión o frustración en el usuario.

El ambiente es fácil de entender.

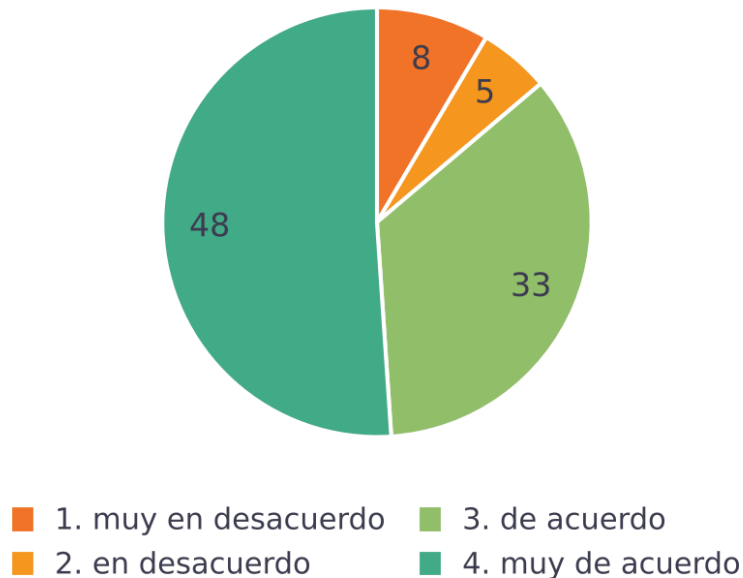


Figura 26: Resultados de la dimensión de facilidad de comprensión (“El ambiente es fácil de entender”).

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que 81 usuarios (86% de la muestra) consideraron el ambiente intuitivo y fácil de entender. El porcentaje supera el objetivo propuesto e indica que la mayoría de los participantes percibió el ambiente como fácil de entender. Una sola pregunta no constituye una evaluación de usabilidad, y como no se registró la experiencia previa con VR, no es posible saber si influyó en los resultados.

9.4 Encuesta de sensación de seguridad.

El impacto en la sensación de seguridad fue evaluado utilizando una encuesta Likert de 3 preguntas que evalúan la sensación en una escala de 5 partes: inseguro/a, incómodo/a, neutral, cómodo/a y seguro/a. Las preguntas se administraron mediante un documento inmediatamente después de finalizar el experimento.

Tabla 18: Instrumento de encuesta de sensación de seguridad (aplicado).

Fuente: Elaboración propia.

	Inseguro/ a	Incómodo/ a	Neutral	Cómodo/a	Seguro/a
¿Qué tan seguro se sintió en el primer escenario? (2000 kelvin)					
¿Qué tan seguro se sintió en el segundo escenario? (2700 kelvin)					
¿Qué tan seguro se sintió en el tercer escenario? (4000 kelvin)					

La utilización de este instrumento estadístico limita el alcance del estudio a la experiencia subjetiva del usuario en la experiencia VR. Esto deja pendientes como líneas de trabajo futuro la recolección de datos fisiológicos como movimientos oculares y ritmo cardíaco; o la recolección de métricas implícitas en el comportamiento dentro del ambiente, como el trazado del recorrido virtual.

La naturaleza ordinal de los datos nos permite realizar un análisis estadístico de la muestra para buscar si existe una tendencia que pruebe o anule la hipótesis planteada. Inicialmente se extrajeron estadísticos descriptivos según las 3 zonas separadas por CCT.

Tabla 19: Estadísticos descriptivos de sensación de seguridad por zona de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Zona	Media	Mediana	Desv. estándar	% inseguro/a o incómodo/a (1-2)	% cómodo/a o seguro/a (4-5)
2000K	3.93	4	1.04	10.6%	67.0%
2700K	3.93	4	0.99	8.5%	68.1%
4000K	3.69	4	1.262	22.3%	61.7%

La respuesta más frecuente en las tres zonas fue «seguro/a» (35, 32 y 33 participantes). En la Zona 3 aumentaron las respuestas «inseguro/a» (de 1 a 5) e «incómodo/a» (de 7 a 16 respecto de la Zona 2), mientras que «neutral» disminuyó (de 22 a 15).

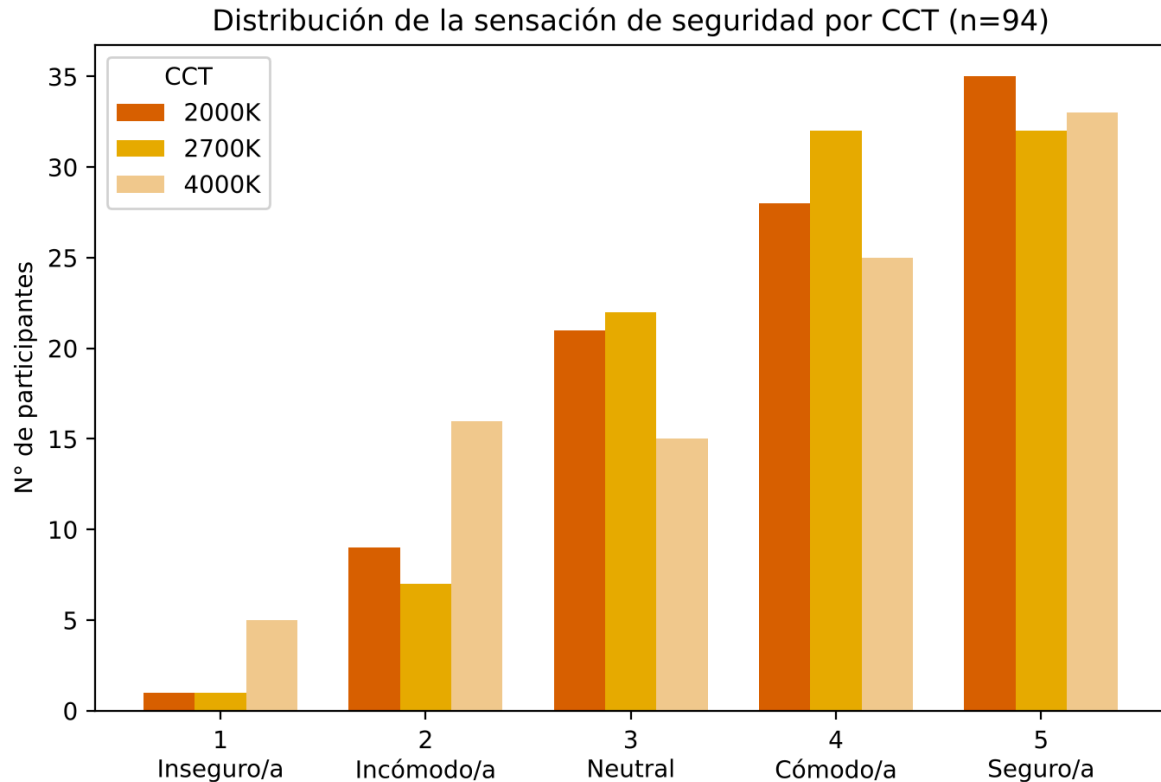


Figura 27: Distribución de la sensación de seguridad por condición de CCT (n=94).

Fuente: Elaboración propia.

Parte del aumento en la Zona 3 corresponde a la categoría «incómodo/a». Dado que el 80% de la muestra reportó al menos un síntoma de malestar, estas respuestas pueden reflejar incomodidad física y no necesariamente una percepción de amenaza. Por ello, la disminución en la Zona 3 se interpreta como menor seguridad o comodidad percibida, y no exclusivamente como menor seguridad.

Analizando esto como una tendencia de aumento o reducción de seguridad, se puede observar un 48,9% (n=46) que no experimentó ningún cambio en su sensación de seguridad, seguido de un 33,0% (n=31) que sufrió una reducción y finalmente un 18,1% (n=17) que percibió un aumento.

El grupo más grande es el de participantes sin cambio: 46 de 94 dieron la misma respuesta en la primera y la última zona, y 40 respondieron igual en las tres. La disminución media se concentra en un tercio de la

muestra, y 17 participantes reportaron más seguridad en la última zona. Esta heterogeneidad indica que la diferencia entre zonas no fue una respuesta generalizada.

**Dirección del cambio en seguridad percibida
al aumentar la temperatura (2000K → 4000K), n=94**

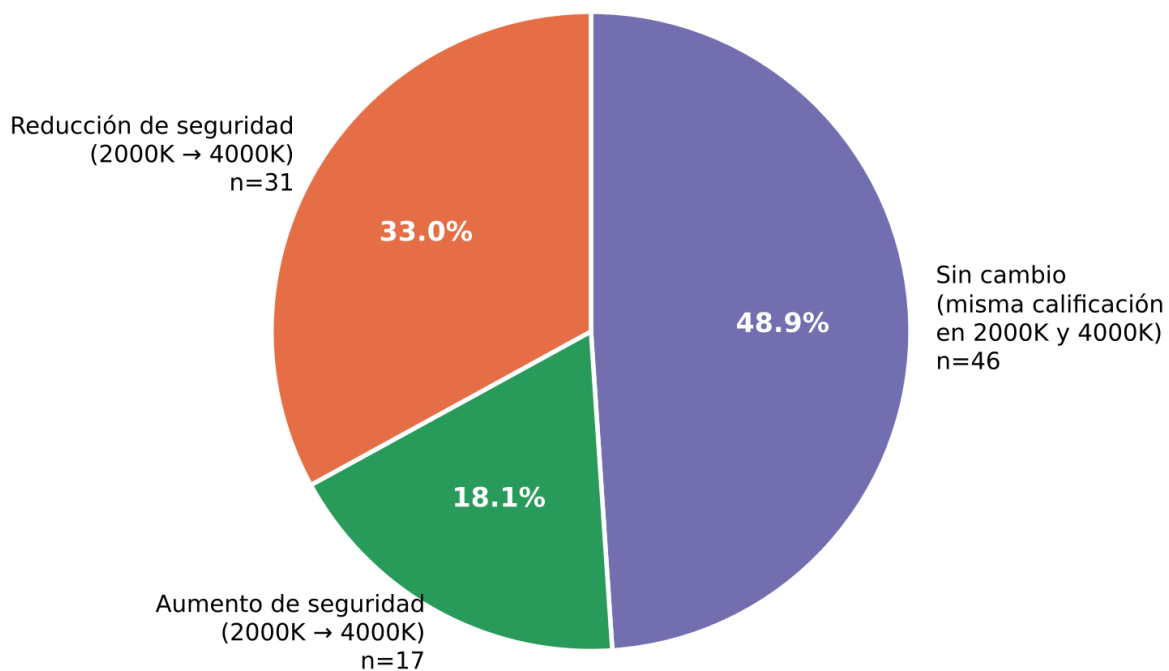


Figura 28: Dirección del cambio en la seguridad percibida al aumentar la temperatura (2000K → 4000K), n=94.

Fuente: Elaboración propia.

Las medias muestran una seguridad reportada menor en la última zona del recorrido (4000K). Esta diferencia no coincide con la dirección de la hipótesis.

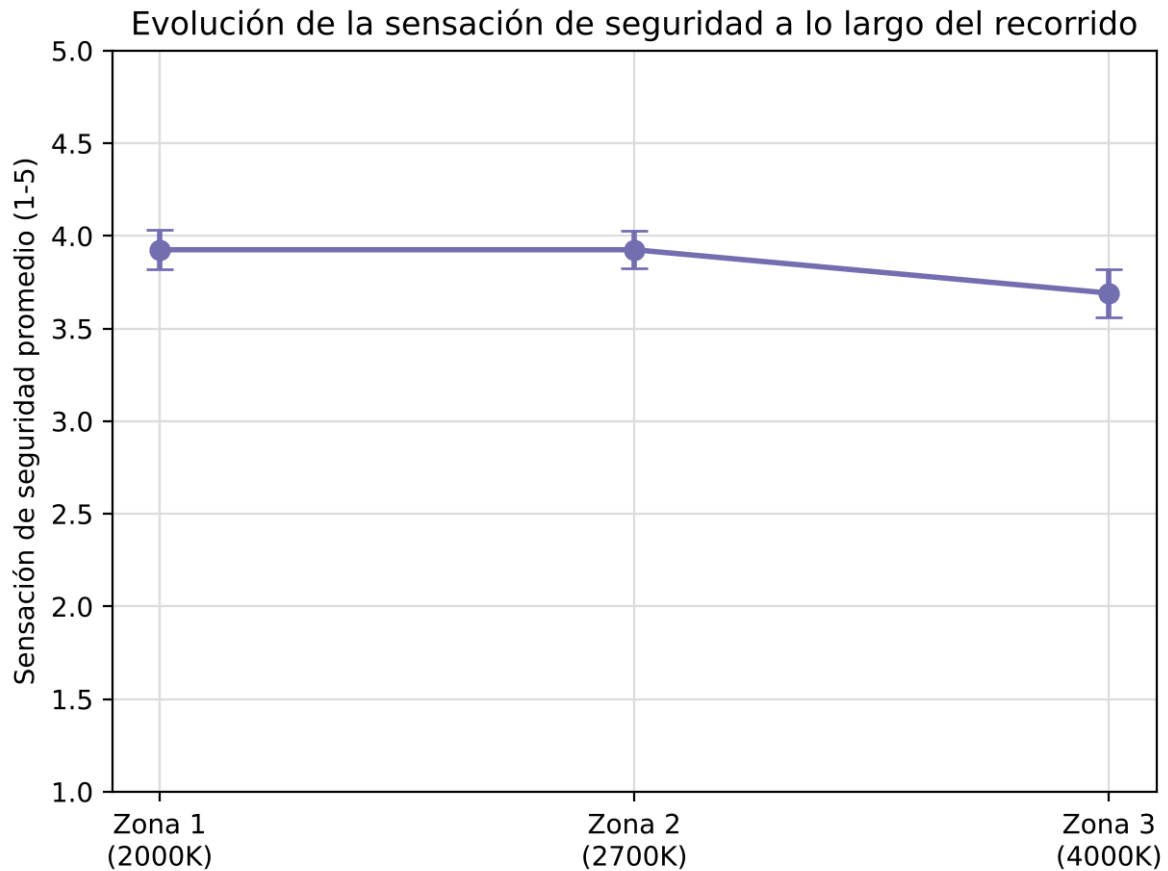


Figura 29: Sensación de seguridad media por zona del recorrido.
Barras: $\pm$ error estándar.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20: Media y porcentaje de inseguridad reportado por condición de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Condición (CCT)	Media	% inseguro/a o incómodo/a (1-2)
2000K	3.93	10.6%
2700K	3.93	8.5%

4000K	3.69	22.3%
-------	------	-------

En la figura se puede observar un descenso en la sensación de seguridad en la zona de CCT fría (4000K). Para evaluar si la diferencia entre zonas es estadísticamente significativa se aplicó la prueba de Wilcoxon para comparación pareada, utilizando un umbral de significancia de $\alpha = 0,05$. Como se realizaron tres comparaciones pareadas, se aplicó también la corrección de Bonferroni ($\alpha = 0,05/3 = 0,0167$).

Tabla 21: Resultados de la prueba de Wilcoxon para comparación pareada entre condiciones de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Comparación	p	d de Cohen (dz)	Significativa	Significativa (Bonferroni)
2000K y 2700K	0.737	0.00	No	No
2000K y 4000K	0.056	0.20	No	No
2700K y 4000K	0.009	0.28	Sí	Sí

No hubo diferencia entre la Zona 1 (2000K) y la Zona 2 (2700K). La seguridad reportada en la Zona 3 (4000K) fue menor que en la Zona 2, la única diferencia significativa, que además se mantiene tras la corrección de Bonferroni ($p = 0,009$; $dz = 0,28$). La diferencia entre la Zona 1 y la Zona 3 no alcanzó significancia ($p = 0,056$; $dz = 0,20$). Los tamaños de efecto son pequeños, por lo que, aun sin factores de confusión, la diferencia sería de magnitud acotada. Como las zonas se recorrieron siempre en el mismo orden y difieren también en su disposición espacial, estas diferencias describen el recorrido y no permiten atribuir el cambio a la CCT por sí sola.

El tamaño de efecto se calculó como dz, la media de las diferencias pareadas dividida por su desviación estándar. Valores cercanos a 0,2 se consideran pequeños y cercanos a 0,5, medianos. Como la escala es

ordinal, dz se informa como referencia descriptiva junto a la prueba de Wilcoxon.

9.4.1 Relación SSQ - percepción de seguridad.

La diferencia observada en la Zona 3 tiene que contextualizarse en varias limitaciones de la metodología, entre ellas las siguientes: la simulación tenía un orden estricto de 2000K, 2700K y finalmente 4000K y existe una presencia notable de síntomas adversos al uso de simulador representados por el alto SSQ en los participantes. Un gran factor causante de síntomas adversos es el tiempo total en simulación; por lo tanto, se podría argumentar que el puntaje SSQ actuó como una variable de confusión: que la baja percepción de seguridad en 4000K se debe en realidad a que estaba al final de la simulación y por lo tanto cuando se lleva mayor tiempo. Si fuera así, parte de la menor seguridad en la Zona 3 se debería al malestar y no a la CCT.

Para explorar esta posibilidad se analizó la relación entre el SSQ y la seguridad reportada.

Primero, se calculó el puntaje SSQ medio y mediano en participantes que reportaron una reducción de su sensación de seguridad en el trayecto y se comparó con el de aquellos que reportaron un aumento.

Tabla 22: Puntaje SSQ medio y mediano según la dirección del cambio en seguridad.

Fuente: Elaboración propia.

Grupo	n	Media de puntaje SSQ	Mediana de puntaje SSQ
Redujo su seguridad en 4000K	31	37.16	26.2
Aumentó su seguridad en 4000K	17	37.18	26.2

Se puede observar en la tabla que ambos grupos tuvieron unas métricas similares que permiten conocer que aquellos que experimentaron un aumento en su seguridad también experimentaron síntomas adversos.

Sometiendo estos datos a la prueba U de Mann-Whitney, con un umbral $\alpha = 0,05$, se obtuvo un $U = 273,5$; $p = 0,837$. El resultado no muestra una diferencia significativa en el puntaje SSQ entre ambos grupos. Esto no demuestra que los grupos sean equivalentes en malestar: con 31 y 17 participantes la prueba tiene poca potencia para detectar diferencias moderadas. Además, esta comparación no resuelve el problema del orden fijo, porque ambos grupos recorrieron las zonas en la misma secuencia.

Segundo, se estudió la relación entre SSQ y la reducción de seguridad en la última zona utilizando el coeficiente de correlación de Spearman por su naturaleza no paramétrica. Se consideró el umbral de significancia $\alpha = 0,05$.

Se calcularon siete correlaciones de Spearman (cuatro en la Tabla 23 y tres en la Tabla 24). Cada una se evaluó con $\alpha = 0,05$, sin ajustar el umbral por el número de pruebas realizadas (corrección por comparaciones múltiples), debido a que se trata de análisis exploratorios.

Tabla 23: Correlación de Spearman entre subescalas del SSQ y el cambio de seguridad (2000K a 4000K).

Fuente: Elaboración propia.

Subescala SSQ	ρ de Spearman	p	Significativa ($\alpha = 0,05$)
Náuseas	-0.031	0.764	No
Oculomotor	-0.197	0.057	No
Desorientación	-0.094	0.365	No
SSQ total	-0.129	0.217	No

Ninguna subescala se asoció significativamente con el cambio de seguridad. La asociación más alta fue la oculomotora ($\rho = -0,197$; $p = 0,057$), débil y en el límite de la significancia, por lo que no permite afirmar ni descartar que los síntomas visuales se relacionen con la caída de seguridad en la última zona. Además, el SSQ se aplicó una sola vez, al terminar el recorrido, por lo que no mide cómo evolucionaron los síntomas en cada zona. Para separar el efecto del malestar del efecto de la zona, un estudio posterior debería medir los síntomas al salir de cada zona.

Por último, se aplicó la correlación de Spearman con el mismo umbral de significancia al reporte de seguridad percibida en cada zona de CCT con el valor de SSQ.

Tabla 24: Correlación de Spearman entre SSQ y sensación de seguridad por condición de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Zona	ρ de Spearman	p
2000K	-0.383	<0.001
2700K	-0.350	0.0005
4000K	-0.410	<0.001

Este análisis destaca una relación negativa moderada y significativa entre altos puntajes SSQ y baja sensación de seguridad de forma uniforme en los 3 niveles de CCT. Esto implica reportar una menor sensación de seguridad asociada a un alto nivel de SSQ, con una magnitud similar en las tres zonas (ρ entre $-0,35$ y $-0,41$). Que las correlaciones sean parecidas no demuestra que el malestar haya afectado por igual a cada zona, porque el SSQ se midió solo al final. Por lo tanto, el malestar pudo influir en el nivel general de seguridad reportado, y no puede descartarse que también haya contribuido a la diferencia de la Zona 3.

En conjunto, estos análisis exploratorios no permiten identificar ni excluir el efecto del malestar sobre las diferencias entre zonas. Ni el puntaje SSQ total ($\rho = -0,129$; $p = 0,217$) ni sus subescalas se asociaron significativamente con el cambio de seguridad, aunque la subescala oculomotora quedó cerca del umbral ($\rho = -0,197$; $p = 0,057$), y el SSQ se asoció negativamente con la seguridad reportada en las tres zonas. La menor seguridad en la Zona 3 debe interpretarse considerando tanto la CCT como el malestar y el tiempo acumulado en la simulación.

Script empleado para variables de análisis:
analisis_estadistico.py

Reproduce las Tablas 19 a 24 y la Figura 28 (Secciones 9.4/9.4.1) a partir de la planilla de datos digitalizada (Sección 5.4). Requiere pandas, numpy y scipy.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from scipy import stats
4
5 RUTA_DATOS = 'resultados_estudio.xlsx' # planilla digitalizada de las encuestas impresas.
6
7 df = pd.read_excel(RUTA_DATOS, sheet_name='Hoja1', header=1)
8 df = df[df['edad'].notna()].copy()
9
10 print(f"N = {len(df)} participantes\n")
11
12 # -----
13 # 0. Cálculo del SSQ desde los 16 ítems
14 #   Subescala = suma bruta de sus 7 ítems x factor (9.54 / 7.58 / 13.92)
15 #   Total     = (suma bruta N + suma bruta O + suma bruta D) x 3.74
16 # -----
17 ITEMS_N = ['malestar general', 'aumento de salivacion', 'sudoracion', 'nausea',
18            'dificultad para concentrarse', 'estomago revuelto', 'eructos']
19 ITEMS_O = ['malestar general', 'cansancio', 'dolor de cabeza', 'vista cansada',
20            'dificultad parar enfocar', 'dificultad para concentrarse', 'vision borrosa']
21 ITEMS_D = ['dificultad parar enfocar', 'nausea', 'pesadez de cabeza', 'vision borrosa',
22            'mareo con ojos abiertos', 'mareo con ojos cerrados', 'vertigos']
23 ITEMS = list(dict.fromkeys(ITEMS_N + ITEMS_O + ITEMS_D)) # 16 ítems únicos
24 it = df[ITEMS]
25 assert it.isin([0, 1, 2, 3]).all().all(), "Respuesta SSQ fuera del rango 0-3"
26 bruto_N = it[ITEMS_N].sum(axis=1)
27 bruto_O = it[ITEMS_O].sum(axis=1)
28 bruto_D = it[ITEMS_D].sum(axis=1)
29 df['SSQ_N'] = bruto_N * 9.54
30 df['SSQ_O'] = bruto_O * 7.58
31 df['SSQ_D'] = bruto_D * 13.92
32 df['SSQ_T'] = (bruto_N + bruto_O + bruto_D) * 3.74

```

```

33 print(f"SSQ total: media={df['SSQ_T'].mean():.2f}  mediana={df['SSQ_T'].median():.2f}  "
34       f"DE={df['SSQ_T'].std():.2f}  rango={df['SSQ_T'].min():.2f}-{df['SSQ_T'].max():.2f}")
35 print()
36
37 # -----
38 # 1. Estadísticos descriptivos por condición de CCT (Tabla 19)
39 # -----
40 print("=== Tabla 19: Estadísticos descriptivos de sensación de seguridad por zona ===")
41 for col in ['2000K', '2700K', '4000K']:
42     media = df[col].mean()
43     mediana = df[col].median()
44     de = df[col].std()
45     pct_inseguro = (df[col] <= 2).mean() * 100
46     pct_seguro = (df[col] >= 4).mean() * 100
47     print(f"{col}: media={media:.2f}  mediana={mediana:.0f}  DE={de:.3f}  "
48           f"%inseguro(1-2)={pct_inseguro:.1f}%  %seguro(4-5)={pct_seguro:.1f}%")
49 print()
50
51 # -----
52 # 2. Prueba de Wilcoxon signed-rank pareada, con d de Cohen (Tabla 21)
53 # -----
54 def cohen_d_paired(x, y):
55     """d de Cohen para muestras pareadas (dz): media de las diferencias / DE de las diferencias.
56     Fórmula: dz = mean(x - y) / std(x - y, ddof=1)"""
57     diff = x - y
58     return diff.mean() / diff.std(ddof=1)
59
60 print("=== Tabla 21: Wilcoxon signed-rank pareado (Bonferroni: alfa=0.0167 para 3 comparaciones) ===")
61 pares = [('2000K', '2700K'), ('2000K', '4000K'), ('2700K', '4000K')]
62 ALPHA = 0.05
63 ALPHA_BONF = 0.05 / 3
64 for a, b in pares:

```

```

65     w, p = stats.wilcoxon(df[a], df[b])
66     d = cohen_d_paired(df[a], df[b])
67     sig = "Sí" if p < ALPHA else "No"
68     sig_bonf = "Sí" if p < ALPHA_BONF else "No"
69     print(f"{a} vs {b}: W={w:.1f}  p={p:.4f}  d={d:.2f}  "
70           f"Significativo(a=.05)={sig}  Significativo(Bonferroni)={sig_bonf}")
71 print()
72
73 # -----
74 # 3. Tabla 20: Media y % de inseguridad reportado por condición de CCT
75 # -----
76 print("=== Tabla 20: Media y % de inseguridad reportado por condición de CCT ===")
77 for col in ['2000K', '2700K', '4000K']:
78     media = df[col].mean()
79     pct_inseguro = (df[col] <= 2).mean() * 100
80     print(f"{col}: media={media:.2f}  %Inseguro={pct_inseguro:.1f}%")
81 print()
82
83 # -----
84 # 4. Figura 28: dirección del cambio de seguridad 2000K -> 4000K
85 # -----
86 def clasificar(row):
87     if row['2000K'] > row['4000K']:
88         return 'reduccion_seguridad'
89     elif row['2000K'] < row['4000K']:
90         return 'aumento_seguridad'
91     else:
92         return 'sin_cambio'
93
94 df['direccion'] = df.apply(clasificar, axis=1)
95 print("=== Figura 28: dirección del cambio en seguridad percibida (2000K -> 4000K), n=94 ===")
96 print(df['direccion'].value_counts())

```

```

97 print((df['direccion'].value_counts(normalize=True) * 100).round(1))
98 print()
99
100 # -----
101 # 4. Puntaje SSQ según dirección del cambio + Mann-Whitney U (Tabla 22)
102 # -----
103 grupo_red = df[df['direccion'] == 'reduccion_seguridad']['SSQ_T']
104 grupo_aum = df[df['direccion'] == 'aumento_seguridad']['SSQ_T']
105
106 print("=== Tabla 22: SSQ según dirección del cambio + Mann-Whitney U ===")
107 print(f"Redujo seguridad en 4000K (n={len(grupo_red)}): ")
108     f"SSQ media={grupo_red.mean():.2f} mediana={grupo_red.median():.1f}")
109 print(f"Aumentó seguridad en 4000K (n={len(grupo_aum)}): ")
110     f"SSQ media={grupo_aum.mean():.2f} mediana={grupo_aum.median():.1f}")
111 u, p = stats.mannwhitneyu(grupo_red, grupo_aum, alternative='two-sided')
112 print(f"Mann-Whitney U = {u:.1f}, p = {p:.4f}")
113 print()
114
115 # -----
116 # 5. Spearman: cambio de seguridad (4000K-2000K) vs subescalas SSQ (Tabla 23)
117 # -----
118 df['delta_seguridad'] = df['4000K'] - df['2000K']
119 ssq_subescalas = {
120     'Náuseas': 'SSQ_N',
121     'Oculomotor': 'SSQ_O',
122     'Desorientación': 'SSQ_D',
123     'SSQ Total': 'SSQ_T',
124 }
125 print("=== Tabla 23: Spearman delta_seguridad (4000K-2000K) vs subescalas SSQ ===")
126 for etiqueta, col in ssq_subescalas.items():
127     rho, p = stats.spearmanr(df['delta_seguridad'], df[col])
128     print(f"{etiqueta:15s}: rho={rho:+.3f} p={p:.4f}")

```

```

129 print()
130
131 # -----
132 # 6. Spearman: SSQ total vs seguridad percibida, por condición (Tabla 24)
133 # -----
134 print("=== Tabla 24: Spearman SSQ total vs seguridad percibida, por condición ===")
135 for cond in ['2000K', '2700K', '4000K']:
136     rho, p = stats.spearmanr(df[cond], df['SSQ_T'])
137     print(f"{cond}: rho={rho:+.3f}  p={p:.4f}")

```

9.5 Rendimiento.

Los rangos de draw calls y triángulos de Meta se definen para aplicaciones que se ejecutan en el visor autónomo. En este trabajo el renderizado lo realizó la GPU del computador (NVIDIA GeForce RTX 4060; Sección 5.1.1), por lo que esos rangos se usan solo como referencia de complejidad gráfica y como preparación para un despliegue autónomo futuro, que requeriría su propia validación.

Durante la ejecución del ambiente existió una limitación: no se contó con telemetría en tiempo real que almacenara indicadores de rendimiento directos como FPS, frame time, GPU/CPU timing y otras mediciones que necesitan realizarse en el dispositivo nativo, por lo que, para evaluar el rendimiento del ambiente, se midió el desempeño mediante el análisis de complejidad gráfica por *frame* (draw calls y conteo de triángulos). Los draw calls y el conteo de triángulos constituyen indicadores de carga gráfica independientes del hardware específico de renderizado, lo que permite evaluar la viabilidad de desempeño de la escena contra los lineamientos oficiales publicados por el fabricante del dispositivo. Fueron utilizados los parámetros de desempeño publicados por Meta para Meta Quest 3S [11], los cuales categorizan la carga gráfica esperada según el tipo de aplicación:

- Simulación ligera: Aplicaciones con cantidad mínima de cambios en el estado del *pipeline* gráfico. Ejemplos: juegos de *escape room*, juegos de puzzles, juegos cooperativos. Debido a la baja cantidad de cambios de estado en el *pipeline* y la ausencia de sistemas *back-end* complejos, el ambiente desarrollado entraría en esta categoría.

- Simulación media: Mundos de tamaño mediano con menor cantidad de jugadores o NPCs. Por ejemplo: shooters de un jugador, aplicaciones sociales medianamente pobladas. La mayoría de las aplicaciones caen en esta categoría.
- Simulación intensa: Aplicaciones con simulaciones exhaustivas, VoIP, networking, animaciones, modelos personalizados para jugadores o múltiples NPCs. Por ejemplo, shooters multijugador y aplicaciones sociales pobladas.

Tabla 25: Rangos de complejidad gráfica según tipo de simulación.

Fuente: Elaboración propia, adaptado de [11], [15].

Simulación.	Conteo de triángulos máximos.	Conteo de draw calls máximos.
Ligera.	1.3 Millones -1.8 Millones.	700-1000.
Media.	1.3 Millones -1.8 Millones.	400-600.
Intensa.	1.3 Millones -1.8 Millones.	200-300.

Estas categorías reflejan principalmente la carga de CPU asociada a la lógica de simulación, elementos que podrían considerarse back-end de la aplicación (física, inteligencia artificial, conexión a internet, telemetría, animaciones). Comparar los valores reales en múltiples puntos de la simulación nos permitirá saber si es compatible con el hardware objetivo y además qué tanto “presupuesto” de rendimiento queda disponible para trabajo futuro.

Para asegurar la validez de los datos se utilizó el mismo pipeline antes configurado, resolución de 1832 x 1920 px por pantalla de ojo (correspondientes a la resolución nativa por ojo de Meta Quest 3S) y Meta

XR simulator como runtime. Este *runtime* simula el renderizado estereoscópico con *Single Pass Instanced*, de la misma forma que una compilación real de Meta Quest 3S.

La medición se realizó midiendo los valores en un frame utilizando el overlay de estadísticas de Unity en puntos críticos del ambiente. Por cada una de las 3 áreas se tomó la entrada, salida, punto medio en el trayecto y un punto de vegetación densa.

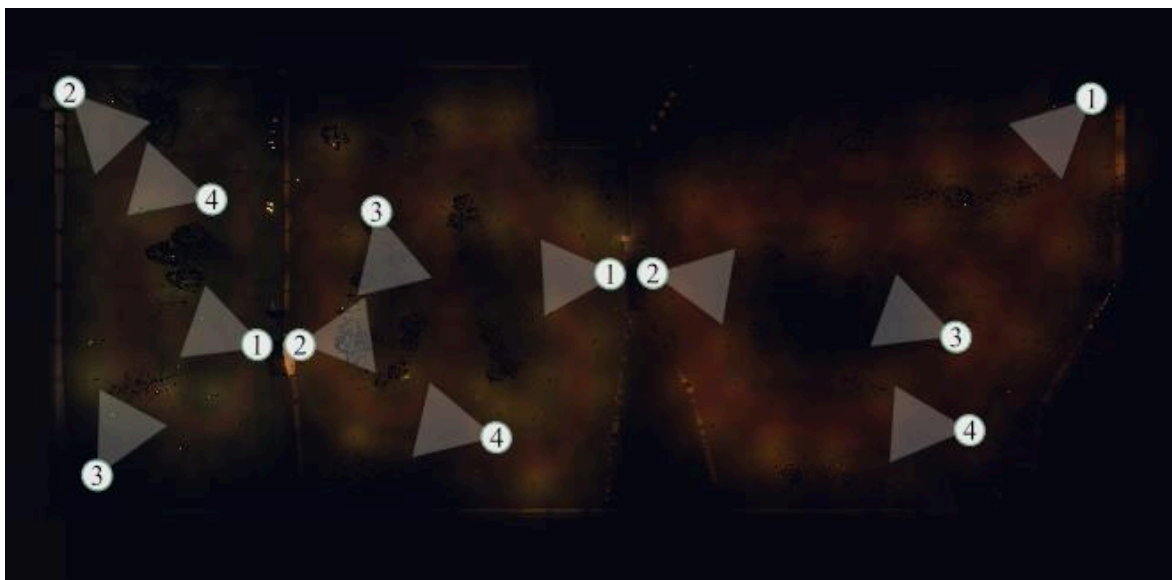


Figura 30: Puntos de medición de rendimiento (entrada 1, salida 2, vegetación 3, trayecto 4) en las 3 zonas de CCT.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26: Draw calls y conteo de triángulos medidos por zona y punto de medición.

Fuente: Elaboración propia.

Zona (en CCT).	Punto de medición.	Draw calls.	Triángulos.
2000K	Entrada (1)	305	1.3 Millones

2000K	Salida (2)	240	0.88 Millones
2000K	Vegetación (3)	280	1.2 Millones
2000K	Trayecto (4)	260	1.0 Millones
2700K	Entrada (1)	280	1.0 Millones
2700K	Salida (2)	380	1.4 Millones
2700K	Vegetación (3)	240	1.2 Millones
2700K	Trayecto (4)	230	1.1 Millones
4000K	Entrada (1)	152	0.97 Millones
4000K	Salida (2)	500	1.3 Millones
4000K	Vegetación (3)	240	1.1 Millones
4000K	Trayecto (4)	212	1.2 Millones

Observando los valores anteriores encontramos un número máximo de triángulos de 1,4 millones y 500 draw calls. Estos valores cumplen el objetivo de mantener la complejidad gráfica dentro de los rangos sugeridos por Meta. Sin embargo, no aseguran por sí solos un buen rendimiento: este depende también del hardware y de la carga de CPU, y no se midieron la frecuencia de cuadros ni el tiempo de cuadro durante las sesiones. Además, nos indican que existe un espacio muy acotado para incrementar la complejidad gráfica del ambiente, con tan solo una diferencia de 400 mil triángulos entre el valor máximo encontrado y el límite superior del hardware. Sin embargo, la baja cantidad de *draw calls*, dentro de lo que podría soportar una simulación de complejidad media, abre espacio para implementar lógica compleja en el ambiente, como, por ejemplo, telemetría en tiempo real de comportamiento del usuario, rendimiento, indicadores fisiológicos, entre otros posibles datos importantes.

La siguiente tabla resume el grado de cumplimiento de cada objetivo según la evidencia obtenida.

Tabla 27: Matriz de cumplimiento de los objetivos.

Fuente: Elaboración propia.

Objetivo	Indicador	Evidencia	Grado de cumplimiento
Recrear valores lumínicos que al menos el 70% de los usuarios considere veraces	% de acuerdo con «El ambiente es veraz»	72 de 94 (77%)	Cumplido parcialmente: los participantes evaluaron el ambiente como veraz, pero no existió calibración fotométrica para afirmar veracidad objetiva de la iluminación del ambiente.
Construir una escena que al menos el 70% evalúe como fácil de entender y bonita	% de acuerdo en ambas preguntas	Fácil de entender: 81 (86%). Bonita: 78 (83%)	Cumplido: los participantes evaluaron positivamente el ambiente por sobre el porcentaje esperado.
Mantener draw calls y triángulos dentro de los rangos de Meta	Máximos medidos por zona	500 draw calls; 1,4 millones de triángulos	Cumplido: el ambiente cumple con los rangos de complejidad gráfica.
General: ambiente VR para evaluar la percepción de seguridad bajo distintas CCT	Aplicación completa del protocolo	94 participantes; ningún abandono	Cumplido como herramienta exploratoria; no permite afirmaciones causales.

10. Conclusión.

El presente trabajo buscó desarrollar un ambiente VR para evaluar la percepción de seguridad peatonal bajo distintas temperaturas de color del alumbrado público. El objetivo general se cumplió como herramienta exploratoria: el protocolo se aplicó de forma completa a 94 participantes, sin abandonos. Los resultados muestran una menor seguridad o comodidad reportada en la última zona del recorrido (4000K) respecto de la zona anterior (2700K), con un tamaño de efecto pequeño y una respuesta heterogénea entre participantes. Debido al orden fijo de las zonas, sus diferencias espaciales y sonoras, el malestar acumulado y una escala que combina seguridad y comodidad, esta diferencia no puede atribuirse únicamente a la CCT y no permite confirmar ni refutar la hipótesis inicial. Constituye una observación exploratoria que justifica un estudio con orden contrabalanceado.

Respecto de los objetivos específicos, el ambiente superó las metas de percepción planteadas: el 77% de los participantes lo consideró veraz, el 86% fácil de entender y el 83% bonito, frente al 70% propuesto. Estos resultados deben matizarse. La pregunta de veracidad evaluó la escena en su conjunto y no la iluminación, y no se realizó una calibración fotométrica, por lo que el objetivo de recrear valores lumínicos veraces se cumple solo de forma parcial. Del mismo modo, una sola pregunta por dimensión no constituye una evaluación de usabilidad. En cuanto al rendimiento, la escena se mantuvo dentro de los rangos de complejidad gráfica sugeridos por Meta, con un máximo de 500 draw calls y 1,4 millones de triángulos, pero no se midieron la frecuencia ni el tiempo de cuadro, por lo que el rendimiento efectivo en el visor no fue verificado.

Pese a una valoración subjetiva positiva, se reportó una cantidad considerable de sintomatología adversa asociada al malestar por simulador. Como posible causa de los altos niveles de SSQ se propone el uso prolongado de la rotación continua de cámara en lugar del giro por pasos (snap) y de la locomoción continua en lugar del teletransporte. Se priorizó la continuidad espacial del recorrido peatonal y la naturalidad de la rotación continua sobre la comodidad adicional que ofrecen las técnicas de locomoción discretas, lo cual quedó patente con los niveles de sintomatología registrados.

Múltiples líneas de trabajo futuras fueron identificadas. Primero, incorporar telemetría que mida en tiempo real la frecuencia y el tiempo

de cuadro directamente en el visor, complementada con indicadores fisiológicos (frecuencia cardíaca, conductancia de la piel, dilatación pupilar) que permitan enriquecer las medidas de autorreporte con evidencia objetiva del estado de activación del usuario. Segundo, para atribuir diferencias a la CCT, un estudio posterior debería: (1) contrabalancear el orden de las condiciones entre participantes; (2) usar zonas con la misma geometría, vegetación y número de postes, cambiando solo la temperatura de color; (3) calibrar fotométricamente la escena, verificando su iluminancia o luminancia; y (4) controlar los eventos sonoros, ya sea eliminándolos o distribuyéndolos por igual entre zonas. Tercero, medir seguridad y comodidad con escalas separadas, idealmente con un instrumento validado de percepción de seguridad.

Finalmente, existe un precedente internacional relevante en el estudio del impacto de la iluminación pública sobre la percepción y el comportamiento de los transeúntes, contrastado con una notoria brecha de investigación local en esta materia dentro de Chile. El principal aporte de este trabajo es el diseño, la implementación y la evaluación de un ambiente VR reutilizable para estudiar la percepción de seguridad bajo distintas CCT, junto con su aplicación exploratoria a 94 participantes en el contexto de la norma chilena. El ambiente, sus scripts y el protocolo quedan disponibles como base para estudios posteriores que incorporen contrabalanceo, zonas equivalentes y medición fotométrica.

Referencias.

[1] M. Masullo, R. A. Toma, L. Maffei y A. Pascale, «Urban Park Lighting Quality Perception: An Immersive Virtual Reality Experiment», *Sustainability*, vol. 15, n.º 3, art. 2069, feb. 2023, doi: 10.3390/su15032069.

[2] G. Chinazzo, K. Chamilothori, J. Wienold y M. Andersen, «Temperature–Color Interaction: Subjective Indoor Environmental Perception and Physiological Responses in Virtual Reality», *Human Factors*, vol. 63, n.º 3, pp. 474–502, mayo 2021, doi: 10.1177/0018720819892383.

[3] X. Du, S. Zhao, D. Zhang y Y. Yu, «Comparative analysis of light environment perception, eye movement and physiology in university professional classroom based on virtual reality experiment», *Indoor and Built Environment*, vol. 32, n.º 6, pp. 1152–1169, ene. 2023, doi: 10.1177/1420326X231153922.

[4] D. Son, B. Im, J. Her, W. Park, S.-J. Kang y S.-N. Kim, «Street lighting environment and fear of crime: a simulated virtual reality experiment», *Virtual Reality*, vol. 29, n.º 1, art. 8, dic. 2024, doi: 10.1007/s10055-024-01080-2.

[5] S. Ronft, A.-K. Beck y T. Lachmann, «Human-centric virtual lighting: Effects of color temperature and daylight simulation in virtual environments», *Applied Ergonomics*, vol. 129, art. 104601, jul. 2025, doi: 10.1016/j.apergo.2025.104601.

[6] V. Ceccato, U. Besenecker, B. Ariel, H. Eizadi, M. Höglund y P. Näsman, «Assessing safety perceptions and lighting conditions in a

metro station», *Journal of Experimental Criminology*, ago. 2025, doi: 10.1007/s11292-025-09683-8.

[7] J.-H. Kwon, J. Kim, S. Kim y G.-H. Cho, «Pedestrians safety perception and crossing behaviors in narrow urban streets: An experimental study using immersive virtual reality technology», *Accident Analysis & Prevention*, vol. 174, art. 106757, sep. 2022, doi: 10.1016/j.aap.2022.106757.

[8] W. F. Maciejewski, «Using Virtual Reality in Quantifying the Relation Between Colour Temperature of Public Lighting and Perceived Personal Safety», *Technical Transactions / Czasopismo Techniczne*, vol. 2020, pp. 182–192, 2020.

[9] J. Murphy y A. Hamam, «Diegetic and non-diegetic user interface and user experience design in virtual reality», *Authorea*, preprint, feb. 2025, doi: 10.22541/au.175186670.51928490/v1.

[10] Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile, «Norma de Emisión para la Regulación de la Contaminación Lumínica». [En línea]. Disponible en: <https://luminica.mma.gob.cl/norma-luminica/> [Accedido: 25-sep-2025].

[11] Meta, «Meta Quest 3: Visor de Realidad Mixta», 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.meta.com/es/quest/quest-3/> [Accedido: 25-sep-2025].

[12] Unity Technologies, «Render pipelines feature comparison», *Unity Documentation*, v. 6000.2. [En línea]. Disponible en: <https://docs.unity3d.com/6000.2/Documentation/Manual/render-pipelines-feature-comparison.html> [Accedido: 25-sep-2025].

[13] J. Jerald, *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. Nueva York, NY, EE. UU.: ACM Books / Morgan & Claypool Publishers, 2015.

[14] Laboratorio de Acústica UACH, «Grabaciones binaurales: Mapa sonoro de la zona centro del Gran Santiago». [En línea]. Disponible en: <https://www.acusticauach.cl/mapa/santiago/grabaciones.php> [Accedido: 25-sep-2025].

[15] Meta Horizon Developers, «Testing and performance analysis in Unity», Meta Horizon Documentation, 2025. [En línea]. Disponible en: <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-perf/> [Accedido: 25-sep-2025].

[16] S. A. Balk, M. A. Bertola y V. W. Inman, «Simulator sickness questionnaire: Twenty years later», en *Proc. 7th Int. Driving Symp. Human Factors Driver Assessment, Training, and Vehicle Design*, Bolton, UK, 2013, pp. 257–263.

[17] D. A. Giraldo García, *La luz azul y sus interacciones: Un recorrido desde la Biología hasta la Fisiopatología*. Academia.edu, 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/125763575/LA_LUZ_AZUL_Y_SUS_INTERACCIONES_Un_recorrido_desde_la_Biolog%C3%ADa_hasta_la_Fisiopatolog%C3%ADa [Accedido: 25-sep-2025].

[18] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Decreto 1: Norma de Emisión de Luminosidad Artificial Generada por Fuentes Emisoras que Indica», *LeyChile*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1197027> [Accedido: 25-sep-2025].

[19] D. Mestre, P. Fuchs, A. Berthoz y J. L. Vercher, «Immersion et présence», en *Le traité de la réalité virtuelle*, París, Francia: École des Mines de Paris, 2006, pp. 309–338.

[20] Unity Technologies, «Unity - Manual: Programming in Unity». [En línea]. Disponible en: <https://docs.unity3d.com/Manual/scripting.html> [Accedido: 25-sep-2025].

[21] Unity Technologies, «Unity - Manual: VR and MR development in Unity». [En línea]. Disponible en: <https://docs.unity3d.com/Manual/VROverview.html> [Accedido: 25-sep-2025].

[22] International Electrotechnical Commission, «Photobiological safety of lamps and lamp systems», IEC 62471:2006, Ginebra, Suiza, 2006.

Anexo A

Documento de consentimiento informado.



DOCUMENTO DE CONSENTIMIENTO INFORMADO (PARA PARTICIPANTE)

El propósito del presente documento es invitarlo a participar en el estudio a cargo de los investigadores Dra. Heilym Ramirez, Prof. Denis Riquelme, Prof. Ricardo Ciudad y la alumna Sofia Ramos.

Para que usted pueda tomar una decisión informada, le explicaremos en qué consistiría su colaboración:

1. Riesgos: No existe ningún riesgo para el participante.
2. Costos: En caso de haber algún tipo de gasto éste será asumido por el departamento de Electrotecnia e Informática de la USM, sede Viña del Mar.
3. Derechos del participante: El participante tiene derecho a manifestar sus dudas al investigador en cualquier momento.
4. El participante puede retirarse del estudio en cualquier momento si lo considera necesario comunicándose al investigador; su retiro no lo perjudicará.
5. Reserva de la identidad del participante: El nombre del participante no será revelado públicamente en ningún momento de la investigación.
6. Confidencialidad de los datos: Los datos y encuestas se usarán exclusivamente para fines académicos e investigación. Los datos serán almacenados de forma segura y no se divulgará su identidad.
7. Utilización y Publicación de los hallazgos: Los resultados podrán publicarse en informes académicos, pero sin información personal identificable. Sólo el equipo de investigación.

Datos de contacto:

Si requiere más información o comunicarse por cualquier motivo relacionado con esta investigación, puede contactar a los Investigadores Responsables de este estudio:

Investigadora Responsable: Heilym Ramirez

Dirección: Departamento de Electrotecnia e Informática, Edificio J, Oficina 207 – USM, Viña del Mar.

Correo Electrónico: heilym.ramirez@usm.cl



DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Al aceptar participar usted declara que lo hace de forma informada, es decir, que ha leído y comprendido las condiciones de su participación en este estudio en los términos antes señalados, y ha tenido la oportunidad de hacer preguntas y que estas han sido respondidas adecuadamente, sin que le queden dudas al respecto.

Si acepta participar en este estudio, por favor marque la celda y firme abajo que indica que acepta participar voluntariamente.

Sí, acepto voluntariamente participar en este estudio

☐

Firmas Obligatorias:

- Participante:

Nombre:

Edad:

Sexo:

☐ Femenino

☐ Masculino

☐ Otro

Correo electrónico:

Firma:

Fecha: